

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Estudio del impacto de las señales de difusión FM en los sistemas de radionavegación aérea

Autor: José Ángel Delgado López

Tutora: María José Madero Ayora

Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Estudio del impacto de las señales de difusión FM en los sistemas de radionavegación aérea

Autor:

José Ángel Delgado López

Tutora:

María José Madero Ayora

Profesora titular

Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Grado:

Estudio del impacto de las señales de difusión FM en los sistemas de radionavegación aérea

Autor: José Ángel Delgado López

Tutora: María José Madero Ayora

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Sevilla, 2021

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a la tutora de este trabajo, María José Madero, su disposición a la hora de guiar y resolver las dudas surgidas durante la realización de este TFG con gran dedicación. Su profesionalidad y preocupación por el trabajo son aspectos que agradezco.

También quería dar las gracias a mis padres por ofrecerme la oportunidad de estudiar este grado y darme ánimos en todo momento, así como a mi hermana por estar ahí.

Gracias a Carmen, por la especial confianza que me ha aportado durante esta etapa en la universidad y que me ha permitido afrontar con ganas la recta final del grado.

Y, por último, gracias a aquellas personas que me han demostrado verdadera empatía en esta etapa, ya sean familiares, compañeros de piso, amigos o compañeros de clase.

Sevilla, 2021

Resumen

En este trabajo, se realizan una serie de simulaciones destinadas a modelar los sistemas de radionavegación aérea del Aeropuerto de Sevilla y analizar el impacto de las señales FM en estos sistemas.

El proyecto se basa en dos grandes pilares. Por un lado, una primera base la constituyen un conjunto de conocimientos teóricos y referencias bibliográficas que permiten elegir cómo se va a modelar el proyecto, proporcionando suficiente coherencia y solidez. Por otro lado, la segunda base es una herramienta software ampliamente usada en el mundo de las telecomunicaciones, llamada HTZ Communications, que simula las comunicaciones entre los equipos de interés partiendo de los datos teóricos elegidos.

A partir de las simulaciones, se pueden obtener una gran variedad de resultados. Respecto al modelado, han destacado especialmente los mapas de cobertura y los valores numéricos de niveles de señal en los puntos de recepción. Conforme a las interferencias, son relevantes los datos de potencias y ganancias, así como la obtención de informes de interferencias donde se especifican frecuencias de interferencias y otros detalles interesantes, obteniendo así conclusiones sobre el estudio.

Abstract

In this work, it has been carried out a series of simulations intended to model the radionavigation systems in the Seville Airport and analyze the impact of the FM signals in these systems.

The project is based on big two foundations. On the one hand, the first base is established by an integration of theoretical knowledge and bibliographic references which allow to choose the model in the project. They provide consistency and robustness. On the other hand, the second base is a software which it is widely used in telecommunications, called HTZ Communications. The program simules the communications between the equipments of interest from the chosen theoretical data.

From the simulatios, it is possible to get a big variety of results. Respect to the model, it is especially featured the coverage maps and the numeric values of the level signal in the reception points. Related to the interferences, nominal powers and gains are relevant, as well as the interference reports which specify the interference frequencies and other interesting details.

Índice

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Abstract	XI
Índice	XIII
Índice de Tablas	XV
Índice de Figuras	XVII
1 Introducción	1
1.1 <i>Objetivos</i>	1
1.2 <i>Estructura</i>	2
2 Fundamentos de radionavegación aérea y difusión fm	3
2.1 <i>Instrument Landing System: ILS</i>	3
2.1.1 Localizador	3
2.1.2 Senda de planeo	5
2.1.3 Radiobalizas	6
2.1.4 Conceptos de funcionamiento de ILS	6
2.1.5 Limitaciones del ILS	7
2.2 <i>Very High Frequency Omnidirectional Range: VOR</i>	7
2.3 <i>Difusión en frecuencia modulada, FM</i>	11
2.4 <i>Interferencias asociadas</i>	12
2.5 <i>Frecuencias de los canales aeronáuticos</i>	14
3 Herramientas de simulación	17
3.1 <i>HTZ Communications</i>	17
3.1.1 Método de trabajo en HTZ Communications	18
3.2 <i>Modelo de propagación</i>	20
3.2.1 Propagación en espacio libre	20
3.2.2 Propagación sobre Tierra plana y otras simplificaciones	21
3.2.3 Propagación por difracción	22
3.2.4 Modelo de propagación aeronáutico	23
3.3 <i>Patrones de radiación</i>	24
3.3.1 Patrón de radiación de ILS	24
3.3.2 Patrón de radiación de VOR	26
3.3.3 Patrón de radiación de antenas FM comerciales	26
3.4 <i>Evaluación de interferencias según Recomendaciones ITU-R</i>	31
3.4.1 Requisitos de inmunidad a la interferencia de los sistemas receptores	31
3.4.2 Umbrales específicos de interferencia en radionavegación aeronáutica	32
4 Resultados	33
4.1 <i>Aeropuerto de San Pablo, Sevilla: SVQ</i>	33
4.1.1 Tráfico del aeropuerto de San Pablo, Sevilla	33
4.1.2 Terminales en el aeropuerto de San Pablo, Sevilla	34
4.1.3 Pistas en el aeropuerto de San Pablo, Sevilla	34
4.2 <i>Simulación del sistema ILS en SVQ</i>	37
4.2.1 Simulación de localizadores ILS en SVQ	38
4.2.2 Simulación de <i>Glide Paths</i> en SVQ	43

4.3	<i>Simulación del sistema VOR en SVQ</i>	48
4.4	<i>Cuantificación de las señales recibidas ILS y VOR</i>	53
4.5	<i>Concreción de las estaciones FM evaluadas</i>	54
4.6	<i>Análisis de interferencias</i>	58
4.6.1	Análisis de interferencias en el escenario inicial	59
4.6.2	Análisis de interferencias modificando las potencias	61
4.6.3	Análisis de interferencias modificando las frecuencias de transmisión de las estaciones FM	62
4.6.4	Método alternativo de análisis de interferencias	66
5	Conclusiones y líneas futuras	71
5.1	<i>Conclusiones</i>	71
5.2	<i>Posibles líneas futuras del trabajo</i>	72
	Referencias	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1. Datos de las estaciones FM escogidas [56].	55
Tabla 4-2. Análisis de interferencias con modificación de las frecuencias de las estaciones FM.	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Funcionamiento de las modulaciones en el localizador [4].	4
Figura 2-2. Imagen real de un localizador [37].	5
Figura 2-3. Imagen real de la antena correspondiente al Glide Slope [38].	5
Figura 2-4. Ubicación y distancias entre componentes del ILS [8].	6
Figura 2-5. Imagen de una estación VOR en tierra [39].	7
Figura 2-6. Esquema de marcación del VOR [8].	8
Figura 2-7. Esquemático de un VOR convencional [6].	9
Figura 2-8. Esquema gráfico de la diferencia de fases en el funcionamiento del VOR [57].	9
Figura 2-9. Visualización estándar del indicador VOR en una aeronave [4].	10
Figura 2-10. Ejemplo de una transmisión y su correspondiente señal modulada en FM [10].	11
Figura 2-11. Representación frecuencial de la intermodulación [13].	13
Figura 2-12. Espectro de frecuencias de la banda aeronáutica [11].	15
Figura 3-1. Organización en capas de cada proyecto en HTZ Communications [21].	18
Figura 3-2. Visualización típica con los distintos proyectos disponibles [20].	18
Figura 3-3. Panel típico de descarga de mapas en HTZ Communications [20].	19
Figura 3-4. Configuración de parámetros en caso de una comunicación Tx/Rx [20].	19
Figura 3-5. Representación de la simplificación de propagación en Tierra plana [42].	21
Figura 3-6. Atenuación específica debida a los gases atmosféricos [42].	21
Figura 3-7. Ejemplos del fenómeno de difracción según el tamaño de la rendija [45].	22
Figura 3-8. Representación gráfica de las variables implicadas en el cálculo de la primera zona de Fresnel [42].	22
Figura 3-9. Panel de opciones en el modelo aeronáutico de HTZ Communications [47].	24
Figura 3-10. Antena log-periódicas de tipo LPDA [36].	25
Figura 3-11. Diagrama horizontal de radiación de una antena LPDA [5].	25
Figura 3-12. Diagrama vertical de radiación de una antena LPDA [5].	26
Figura 3-13. Diagrama estándar de radiación de un VOR [26].	26
Figura 3-14. Imagen de una antena GP [30].	27
Figura 3-15. Diagramas de radiación de una antena GP [30].	27
Figura 3-16. Imagen de una antena MP [31].	28
Figura 3-17. Diagramas de radiación de una antena MP [31].	28
Figura 3-18. Imagen de una antena SGP [32].	29
Figura 3-19. Diagramas de radiación de una antena SGP [32].	29
Figura 3-20. Imagen de una antena VER LB [33].	30
Figura 3-21. Diagramas de radiación de una antena VER LB [33].	30
Figura 4-1. Fotografía de una de las entradas a la terminal del aeropuerto de Sevilla [64].	33

Figura 4-2. Fotografía de satélite del aeropuerto de Sevilla [61].	34
Figura 4-3. Fotografía del mapa del aeropuerto de Sevilla [61].	35
Figura 4-4. Fotografía de la pista con orientación 9 [61].	35
Figura 4-5. Fotografía más ampliada de la pista con orientación 9 [61].	35
Figura 4-6. Fotografía de la pista con orientación 27 [61].	36
Figura 4-7. Fotografía más ampliada de la pista con orientación 27 [61].	36
Figura 4-8. Carta aeronáutica en las inmediaciones de SVQ para vuelo visual [65].	36
Figura 4-9. Carta aeronáutica en las inmediaciones de SVQ para vuelo instrumental [65].	37
Figura 4-10. Creación del proyecto en HTZ Communications.	37
Figura 4-11. Localizador de ILS de la pista 09 marcado en HTZ Communications.	38
Figura 4-12. Parámetros generales del localizador de ILS de la pista 09 en HTZ Communications.	38
Figura 4-13. Parámetros de radiación del localizador de ILS de la pista 09 en HTZ Communications.	39
Figura 4-14. Parámetros para el cálculo de cobertura del ILS LOC.	39
Figura 4-15. Representaciones generales, en HTZ Communications, de la cobertura del localizador del ILS de la pista 09.	40
Figura 4-16. Representación más ampliada, en HTZ Communications, de la cobertura del localizador de la pista 09.	41
Figura 4-17. Localizador de ILS de la pista 27 marcado en HTZ Communications.	41
Figura 4-18. Parámetros generales del localizador de ILS de la pista 27 en HTZ Communications.	42
Figura 4-19. Parámetros de radiación del localizador de ILS de la pista 09 en HTZ Communications.	42
Figura 4-20. Representación general, en HTZ Communications, de la cobertura del localizador del ILS de la pista 27.	43
Figura 4-21. Representación más ampliada, en HTZ Communications, de la cobertura del localizador de la pista 27.	43
Figura 4-22. Senda de planeo de ILS de la pista 09 marcada en HTZ Communications.	44
Figura 4-23. Senda de planeo de ILS de la pista 27 marcada en HTZ Communications.	44
Figura 4-24. Parámetros generales del GP de ILS de la pista 09 en HTZ Communications.	45
Figura 4-25. Parámetros de radiación del GP de ILS de la pista 09 en HTZ Communications.	45
Figura 4-26. Parámetros de radiación del GP de ILS de la pista 27 en HTZ Communications.	46
Figura 4-27. Representación general, en HTZ Communications, de la cobertura del GP del ILS de la pista 09. Antenas receptoras a 1,5 metros de altura.	46
Figura 4-28. Representación ampliada, en HTZ Communications, de la cobertura del GP del ILS de la pista 09. Antenas receptoras a 1,5 metros de altura.	47
Figura 4-29. Representación general, en HTZ Communications, de la cobertura del GP del ILS de la pista 09. Antenas receptoras a 150 ft.	47
Figura 4-30. Representación ampliada, en HTZ Communications, de la cobertura del GP del ILS de la pista 09. Antenas receptoras a 150 ft.	47
Figura 4-31. Representación general, en HTZ Communications, de la cobertura del GP del ILS de la pista 27. Antenas receptoras a 1,5 metros de altura.	48
Figura 4-32. Representación ampliada, en HTZ Communications, de la cobertura del GP del ILS de la pista 27. Antenas receptoras a 1,5 metros de altura.	48
Figura 4-33. Fotografía en la que se aprecia la distancia entre el aeropuerto SVQ (azul) y la	

correspondiente estación VOR-DME (etiquedada) [61].	49
Figura 4-34. Fotografía de satélite de la zona donde está situado el VOR correspondiente a SVQ. [61].	49
Figura 4-35. Fotografía en la que se aprecia de manera ampliada la situación del VOR de SVQ [66].	49
Figura 4-36. Parámetros generales del VOR de Sevilla en HTZ Communications.	50
Figura 4-37. Diagrama de radiación vertical del VOR de Sevilla en HTZ Communications.	50
Figura 4-38. Parámetros para el cálculo de cobertura del VOR.	51
Figura 4-39. Representación general, en HTZ Communications, de la cobertura del VOR de SVL.	51
Figura 4-40. Segunda representación, en HTZ Communications, de la cobertura del VOR de SVL.	52
Figura 4-41. Representación más ampliada, en HTZ Communications, de la cobertura del VOR de SVL.	52
Figura 4-42. Visualización de todos los transmisores simulados en el proyecto.	56
Figura 4-43. Configuración de parámetros para la estación FM de Almadén de la Plata.	56
Figura 4-44. Configuración del diagrama de radiación del Tx de la estación FM de Almadén de la Plata.	57
Figura 4-45. Cobertura en un radio de 8 km correspondiente a la emisión de la estación FM de Pilas.	57
Figura 4-46. Mapa de coberturas de las estaciones FM consideradas en el estudio.	58
Figura 4-47. Ventana de configuración en “ <i>Interference C/P</i> ”.	59
Figura 4-48. Opciones de configuración dentro de “ <i>Global interference analysis</i> ”.	59
Figura 4-49. Análisis de interferencias de estaciones FM sobre radionavegación aérea en SVL.	60
Figura 4-50. Ventana de configuración del método basado en SM 1009.	60
Figura 4-51. Análisis alternativo de interfeerencias basado exclusivamente en SM 1009.	61
Figura 4-52. Reconfiguración de la estación de FM SEVILLA 9 (factor $\times 10$ en potencia).	61
Figura 4-53. Análisis de interferencias de estaciones FM sobre radionavegación aérea en SVL (factor $\times 10$ en potencia).	62
Figura 4-54. Cambio de simulación fijando la frecuencia de “Almadén de la Plata” en torno a los 108,0 MHz.	63
Figura 4-55. Cambio de simulación fijando la frecuencia de “Sevilla 9” en torno a los 108,0 MHz.	63
Figura 4-56. Opción <i>Scanner</i> para el análisis de interferencias.	66
Figura 4-57. Configuración de la opción <i>Scanner</i> para el análisis de interferencias.	67
Figura 4-58. Muestra parcial de resultados de Scanner para el escenario inicial.	67
Figura 4-59. Muestra parcial del análisis multiplicando potencias de las FM por 10.	68
Figura 4-60. Muestra parcial del análisis multiplicando potencias de las FM por 1000.	68
Figura 4-61. Muestra parcial del análisis fijando las frecuencias de las FM en 108 MHz.	69
Figura 4-62. Segunda muestra parcial del análisis fijando las frecuencias de las FM en 108 MHz.	69
Figura 4-63. Tercera muestra parcial del análisis fijando las frecuencias de las FM en 108 MHz.	70

1 INTRODUCCIÓN

El mundo de las telecomunicaciones se ha convertido en un sector imprescindible en el siglo XXI, que no para de crecer. Se trata de un campo transversal, que compete a todas las ramas de la ingeniería, incluida la industria aeroespacial. Las aeronaves requieren un diseño, complejo y exhaustivo, pero además hay que volarlas, y en este aspecto se hacen necesarias las comunicaciones, que por su parte deben ser robustas, con las mínimas interferencias posibles.

Las interferencias son causantes de eventos no deseados, ya sea por ausencia completa de comunicación o alteración parcial de la misma. En definitiva, un receptor puede no recibir la comunicación deseada de un transmisor o recibirla en un estado deficiente que impida una correcta interpretación de la información. Estos fenómenos son causados por señales no deseadas, pudiendo ser captadas por los receptores de los sistemas de radioayuda. En este sentido, las señales de difusión FM constituyen un abanico de señales relativamente cercanas en frecuencia a algunas de las señales de radionavegación aérea. Además, son muy usuales, por lo que es conveniente prestar atención a las mismas y analizar el posible impacto en materia de interferencias que puedan causar en los sistemas de navegación aérea.

1.1 Objetivos

Partiendo de estos conceptos, este trabajo pretende realizar un análisis de las posibles interferencias de la difusión FM en la radionavegación aérea que cumpla con dos premisas:

- Análisis fundamentado de manera teórica. Es decir, los datos de los que se parta en el análisis deben ser realistas, siguiendo escrupulosamente las diferentes referencias bibliográficas y con valores numéricos ampliamente contrastados.
- Análisis ejecutado de manera práctica. Se podría realizar un análisis puramente teórico, a través de ecuaciones, pero en este proyecto, se opta por realizar el análisis a través de una serie de simulaciones ejecutadas por una herramienta software, que permite dotar al trabajo de dinamismo, manteniendo la efectividad y evitando una excesiva complejidad.

Con estos aspectos en mente, la intención es realizar un trabajo en el que, partiendo de una serie de datos realistas introducidos en el programa, se ejecuten una serie de simulaciones que permitan realizar valoraciones sobre las posibles interferencias FM en el ámbito aeronáutico.

En concreto, la idea es trasladar estos objetivos al contexto que se detalla a continuación:

- El espacio de estudio será el Aeropuerto de Sevilla y sus inmediaciones.
- Las señales deseadas, correspondientes al ámbito aeronáutico, serán las transmitidas por dos sistemas de radionavegación aérea, equipos que se encuentran instalados en el Aeropuerto de Sevilla.
- Las señales no deseadas, correspondientes a la difusión FM, serán aquellas que se encuentren en un cierto radio alrededor del aeropuerto. Se seguirán una serie de criterios para determinar cuáles son las estaciones FM que se van a considerar.

El objetivo final es realizar comentarios acerca de las coberturas observadas y del comportamiento de las comunicaciones simuladas, así como de las posibles interferencias que haya o no, probando incluso a modificar ciertos parámetros para saber cuál es el margen de seguridad en el que se encuentran las comunicaciones aeronáuticas respecto a las interferencias.

1.2 Estructura

El documento se estructura en tres grandes bloques: base teórica, herramientas de trabajo y resultados de simulación. Esta organización en el documento se materializa en los capítulos 2, 3 y 4, con una previa introducción en el presente capítulo 1, que permite adentrarse en la organización del trabajo y trasladar las líneas principales del mismo.

El capítulo 2 trata los fundamentos que dotan de una base sólida al trabajo. En primer lugar, se explica qué son y cómo funcionan los sistemas de radionavegación aérea que se van a escoger para el estudio. Se eligen, por su gran uso, los sistemas ILS (*Instrument Landing System*) y VOR (*Very High Frequency Omnidirectional Range*). Además, se destacan datos relevantes que serán de utilidad para configurar las diferentes simulaciones, como alturas de las antenas transmisoras, potencias nominales o umbrales mínimos de señal, entre otros. Tras ello, se concretan cómo funcionan las difusiones FM y las señales que las portan, que en este estudio constituyen las señales no deseadas. Para cerrar el capítulo, se habla de cómo funcionan y qué tipos de interferencias hay, enfatizando en cuáles son las frecuencias y canales de unos y otros sistemas (señales deseadas y no deseadas).

El capítulo 3 se centra en describir las herramientas que se van a usar y qué se va a considerar en ellas. Se parte de una breve explicación de la herramienta software, describiendo sus características más relevantes. Se continúa concretando qué datos de partida van a ser elegidos en el programa. Esta parte es un punto de unión con el primer capítulo, en tanto que se usa toda la base teórica anterior para elegir qué datos va a escoger de inicio el software para ejecutar sus simulaciones. En estos datos de partida se encuentran: uno, los modelos de propagación que permiten escoger qué ecuaciones se van a tener en cuenta; y dos, los diagramas de radiación que permitirán elegir cómo radian las antenas transmisoras. Tras ello, se realizarán consideraciones sobre qué se puede considerar interferencia y qué no en este ámbito; es decir, se trata de un criterio para valorar los resultados una vez estén realizadas las simulaciones.

El capítulo 4 es la parte que se realiza tras la ejecución de las simulaciones. Previamente, se realiza una valoración global de los datos obtenidos y una vez realizada, se plasman en el documento los resultados más relevantes, manteniendo un equilibrio en el número de datos mostrados. En definitiva, es un capítulo con mayor carga de mapas, informes y valores numéricos que permite observar cuáles son los resultados clave del estudio.

Finalmente, en el capítulo 5 se detallan las conclusiones del proyecto, para poder así cerrar el trabajo cumpliendo con los objetivos anteriormente descritos.

2 FUNDAMENTOS DE RADIONAVEGACIÓN AÉREA Y DIFUSIÓN FM

En este capítulo se van a describir los conceptos fundamentales bajo los que se enmarca el Trabajo Fin de Grado. Se trata de describir aspectos relevantes relacionados con la radionavegación aérea y la difusión FM. El interés por la radionavegación aérea se ha visto sometido a un continuo aumento debido a la modernización progresiva de la ingeniería aeronáutica, en el que el mundo de las telecomunicaciones y la aviónica han adquirido cada vez un mayor peso en el sector.

En lo concerniente a la estructura del capítulo, en primer lugar, se van a explicar conceptos asociados a los principales sistemas de radionavegación aérea, en concreto ILS y VOR. Posteriormente, se va a presentar la difusión FM como método de transmisión. En último lugar, se van a tratar los conceptos clave asociados a las posibles interferencias y se detallarán las frecuencias de los canales aeronáuticos en VHF.

2.1 Instrument Landing System: ILS

ILS es un sistema de radionavegación aérea que parte de una serie de desarrollos en Alemania y Estados Unidos en 1920, adquiriendo uso civil a mediados del siglo XX. Actualmente, presenta un uso común, mundial y estandarizado por ICAO [1].

El origen de su desarrollo se encuentra en la necesidad de facilitar la compleja y precisa tarea de aterrizaje. El aterrizaje reúne condiciones que requieren ayudas: se trata de una operación irreversible, realizada a altas velocidades que pueden alcanzar los 400 km/h y con gran pérdida de altura en un tiempo corto relativamente [4].

El ILS ha cambiado de manera relevante desde que fue introducido en 1946 mediante el equipo americano SCS 51. A partir de ahí, los cambios se centraron en el aumento del rendimiento, dándose una optimización progresiva hasta el año 1971, cuando ya se incorporaron los desarrollos relativos a circuitos de estado sólido. Desde ese momento, se comenzaron a categorizar las aproximaciones y aterrizajes atendiendo a varios factores, entre ellos el equipamiento de ILS de la aeronave, ya que la integridad del sistema permitía avanzar en su implantación [6].

Es un sistema de radionavegación que opera en bandas *Very High Frequency*, VHF, y *Ultra High Frequency*, UHF, cuya instalación debe regirse por unos criterios comunes [5]. El sistema se compone de tres partes que transmiten información a la aeronave: localizador (LOC), senda de planeo (*Glide Slope* GS o *Glide Path* GP) y radiobalizas [1].

2.1.1 Localizador

El localizador es un sistema que se compone generalmente de *arrays* de antenas direccionales logperiódicas [3]. Sirve de guía horizontal a la aeronave, funcionando en la banda VHF. Es decir, proporciona información de tipo azimutal. El transmisor se encuentra en el eje de la pista, en su parte final, en el lado contrario a la dirección de aproximación [5].

Por su parte, se trata de un sistema que se polariza horizontalmente y que puede ser de frecuencia simple o doble [5]:

- Si opera en frecuencia única, se transmite una señal de rumbo. Este caso es usado en pistas de aterrizaje en las que no haya obstáculos reflectantes importantes.
- Si opera en frecuencia doble, se transmiten dos señales: señal de rumbo y señal de autorización. Ambas señales contienen la misma información, pero cada una está destinada a cumplir un propósito.

Por un lado, las señales de rumbo presentan mayor alcance (de hasta 25 NM) e irradian en un margen de hasta 10° de desviación del eje de pista. Por otro lado, las señales de despeje se utilizan para un rango más corto (de hasta 17 NM) pero más amplio, cubriendo ángulos de azimut dentro de los 10° y 35° del eje de pista extendido.

Respecto a la propagación vertical, un ILS LOC debe cubrir la región situada entre 2° y 7° verticalmente para distancias terrestres inferiores a 4,7 NM [5].

El patrón de radiación que produce la señal transmitida por el localizador hasta la aeronave se compone de dos lóbulos en la misma frecuencia, que se llegan a superponer. La diferencia entre los lóbulos se encuentra en la modulación [4]. Según la aproximación del avión:

- Lóbulo correspondiente al lóbulo izquierdo: se encuentra modulado por un tono de 90 Hz.
- Lóbulo correspondiente al lado derecho: se encuentra modulado por un tono de 150 Hz.

La aeronave recibirá una señal en la que tendrá mayor peso un tono u otro dependiendo de hacia dónde se encuentre desplazada respecto al eje de la pista [1].

El parámetro más relevante del localizador, calculado en el receptor, es la Diferencia de Profundidad de Modulación (también conocido como DDM de la señal recibida) que sirve para saber cuál es la corrección concreta y necesaria para que la aeronave se encuentre alineada con la línea central de la pista [4].

Con posterioridad, ha sido introducida una alternativa interesante por Standard Elektrik Lorenz en la que las ondas de la señal no se generan en dos tonos de manera independiente, sino que la generación es combinada en código binario a través de memorias de acceso aleatorio [6].

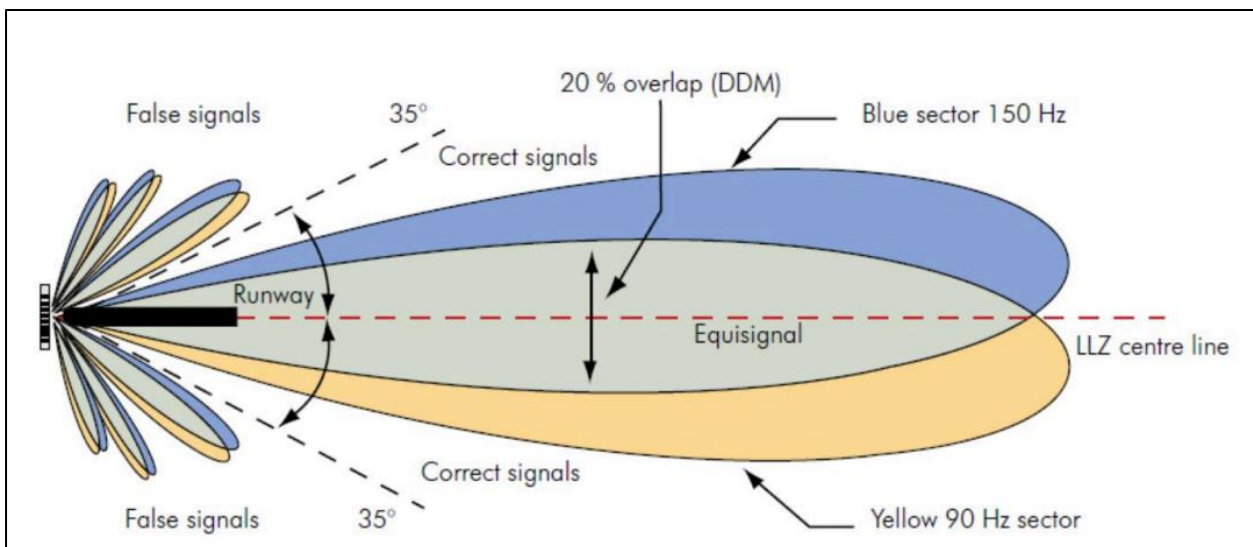


Figura 2-1. Funcionamiento de las modulaciones en el localizador [4].

Otros datos de interés que caben destacar para poder caracterizar mejor los órdenes de magnitud son [5]:

- La potencia máxima de estas señales es de 25 W aproximadamente.
- El nivel mínimo de señal que se debe garantizar para que un punto se encuentre dentro de la cobertura es de -86 dBm en cada punto.

A continuación, para una mayor visualización, se muestra una imagen real de un localizador [37].



Figura 2-2. Imagen real de un localizador [37].

2.1.2 Senda de planeo

Conocido en inglés como *Glide Slope* (GS) o *Glide Path* (GP), es una parte del ILS que comparte similitudes con el LOC. La diferencia en cuanto a utilidad es que en vez de proporcionar orientación horizontal, informa sobre la alineación vertical del plano con respecto a una senda de planeo marcada como óptima o senda de referencia [5].

En cuanto a transmisión de la señal, el patrón también se basa en dos lóbulos modulados con tonos de 90 y 150 Hz respectivamente [1]. En este caso, la DDM ofrece información precisa de si es necesario que la aeronave ascienda o descienda para que se encuentre en la trayectoria de referencia o guía [4].

Por su parte, la localización de la antena transmisora de la senda de planeo es distinta a la del LOC. Se sitúa en torno a 300 metros del borde del umbral de la pista y a 120 metros del eje central [4].

Se muestra ahora, para una mayor visualización, una imagen real de una antena correspondiente a la senda de planeo [38].



Figura 2-3. Imagen real de la antena correspondiente al *Glide Slope* [38].

2.1.3 Radiobalizas

Las radiobalizas o marker beacons son un conjunto de radioayudas que se corresponden con un máximo de tres balizas distribuidas a lo largo de la pista delantera extendida. La especificación ILS exige un mínimo de dos balizas en el camino de aproximación. A estas dos balizas se puede añadir una tercera siempre que, en la opinión de la Autoridad de Control de Tráfico Aéreo, se requiera una baliza adicional debido a los procedimientos operativos en un sitio concreto [6].

Se componen de antenas direccionales que envían señales verticalmente, haciendo la forma de un cono invertido [5]. La utilidad de las radiobalizas es proporcionar al piloto información acerca de su posición con respecto a la senda establecida. Dicha información es dada en forma de señales visuales y sonoras.

- En cuanto a posición, la diferencia entre las tres balizas es la que se expone a continuación. En primer lugar, la radiobaliza exterior (OM, *Outer Marker*) se sitúa a una distancia de entre 4 y 7 millas náuticas del umbral de pista. Por su parte, si se habla de la radiobaliza intermedia (MM, *Middle Marker*), la distancia considerada disminuye al rango de las 0,5 a 0,8 millas náuticas. Por último, la radiobaliza interior (IM, *Inner Marker*) se coloca en la senda final de aproximación en la vertical donde se corten la senda y el plano de Altura de Decisión mínima (DH) para el caso de que se encuentre en categoría II. La distancia al umbral de pista oscila entre los 75 y los 450 metros [4].
- Frecuencia de operación: todas las radiobalizas operan a 75 MHz [1]. Sin embargo, la modulación en frecuencia es distinta para cada una. En cuanto a la radiobaliza interior IM, la modulación en frecuencia es de 3000 Hz y la codificación funciona con 6 puntos por segundo de manera continuada. En el caso de la radiobaliza intermedia MM, la modulación es de 1300 Hz y la señal se codifica con puntos y guiones alternados. Si se concreta en la radiobaliza exterior OM, la codificación se da en forma de dos guiones por segundo continuamente mediante una modulación de frecuencia de 400 Hz [6].

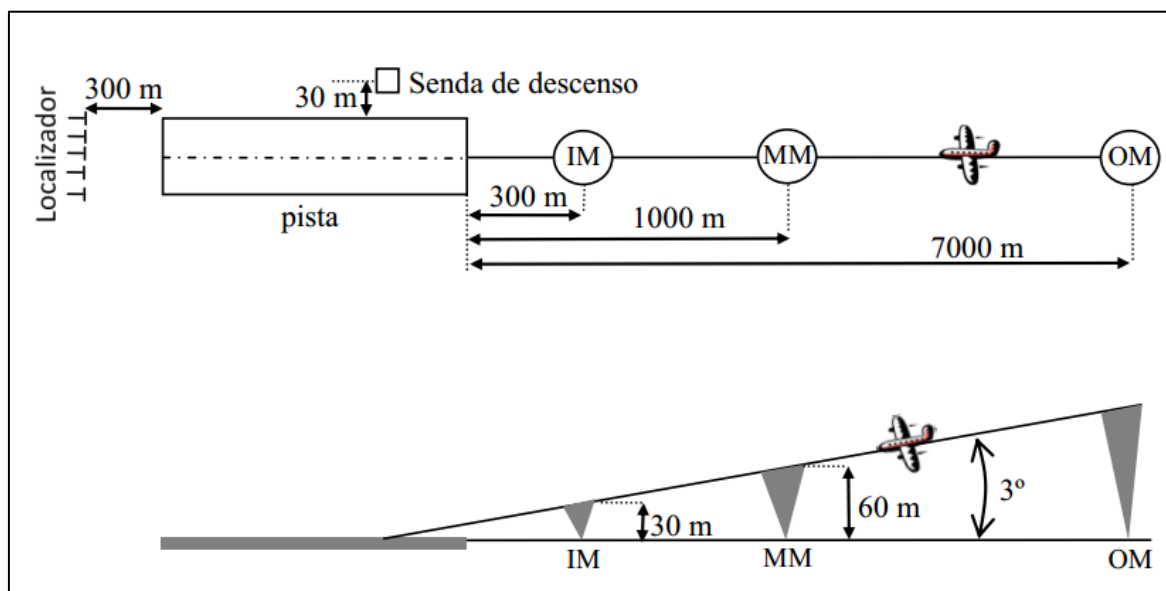


Figura 2-4. Ubicación y distancias entre componentes del ILS [8].

2.1.4 Conceptos de funcionamiento de ILS

En el funcionamiento del ILS hay que destacar fundamentalmente tres señales:

- En primer lugar, el localizador, desde tierra, envía una señal comprendida entre los 108 a 112 MHz. Esta señal se encontrará modulada parcialmente por la resultante de la suma de dos lóbulos de 90 Hz y 150 Hz. [1] Se denomina formalmente señal CSB o Portadora de Bandas Laterales [4].
- En segundo lugar, SBO es una señal de banda lateral que se compone de una señal con bandas laterales y por otro lado de una portadora suprimida que se modula con la resultante de restar los

lóbulos de 90 y 150 Hz [4].

- En último lugar, LSR es una señal de relleno que evita que haya ruidos y que se intercepten falsos nulos [4]. Es decir, no aporta nueva información, sino que ayuda a que el resto de la información se recoja de manera correcta.

Estas tres señales se conjugan en el espacio, una vez que han sido transmitidas por el localizador, y dicha suma espacial forma la denominada DDM (*Difference in Depth of Modulation*) [1]. Según el lado en que se encuentre la aeronave, la DDM tendrá una predominancia de la señal de 90 Hz (lado izquierdo) o de la señal de 150 Hz (lado derecho) [5].

2.1.5 Limitaciones del ILS

La principal limitación de este sistema es la diferencia de efectividad que presenta en entornos con orografía cambiante. Ciertos tipos de orografía causan una degradación de la precisión (curvatura del haz) debido a los reflejos de los edificios, el terreno, las aeronaves en vuelo, las aeronaves en rodaje y los vehículos terrestres [3].

Por ello, en casos oportunos, se puede complementar con otros sistemas que aumenten la redundancia y, por ende, la seguridad.

2.2 Very High Frequency Omnidirectional Range: VOR

La creación de este sistema llega a mediados del siglo XX cuando se pretendían solucionar multitud de problemas derivados de la propagación de las señales a las frecuencias más bajas que se usaban. Por ello se crea el VOR, sistema que opera a frecuencias más altas y mejora considerablemente los problemas de precisión que existían en la determinación de la dirección que se registraba a bordo [8].



Figura 2-5. Imagen de una estación VOR en tierra [39].

Se trata de un sistema de radionavegación que proporciona posicionamiento con respecto a estaciones en tierra. En concreto, los datos de salida son orientaciones azimutales, es decir, en la aeronave se puede observar en el receptor el rumbo relativo al radial de la estación terrestre y si se dirige desde o hacia la estación de tierra de la que se está tratando. Como en cualquier sistema, hay que tomar una referencia, que en este caso se trata del radio 360° (Norte Magnético) [5].

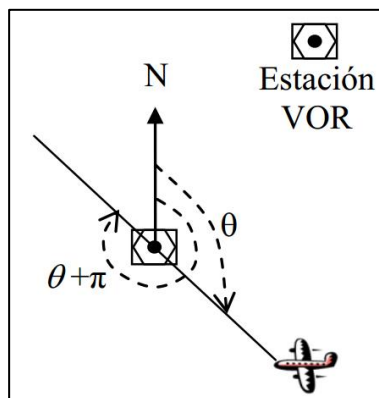


Figura 2-6. Esquema de marcación del VOR [8].

La señal que se transmite desde las estaciones terrestres o, dicho de otro modo, la señal que se recibe en las aeronaves es de tipo AM, modulada con profundidad del 90 % [1], [8]. La profundidad de la modulación hace referencia a cuánto varía la amplitud de la portadora con respecto a la amplitud del mensaje. Es decir, para este caso, si se supone un ejemplo en el que el mensaje no modulado tiene una amplitud de 1 (todos en términos de valores absolutos), la señal modulada variará su amplitud desde 1,9 (máximo en valor absoluto) a 0,1 (mínimo en valor absoluto) [24].

En cuanto a la señal moduladora, se compone de cuatro señales a su vez [8], [1], [5]:

- Dos señales de identificación. Estas señales permiten identificar en la aeronave desde dónde se recibe la señal. En concreto, de qué estación terrestre VOR procede la señal recibida. Esta información viene proporcionada de dos maneras:
 - A. Tres letras en código Morse.
 - B. Canal de voz. El uso de canal de voz es complementario a las letras en código Morse, que son las que fundamentalmente usan los pilotos para identificar con respecto a qué estación de VOR se está recibiendo el rumbo. Sin embargo, y como medio de redundancia, en caso de que la tripulación no conozca la identificación Morse de la estación, existe este canal mediante voz que permite el traspaso de los mensajes concretos pertinentes.
- Dos señales, de referencia y variable, correspondientes a las señales para la navegación, que proporcionan la propia información que se quiere conseguir.
 - A. La señal de referencia es una moduladora en FM, siendo un tono de frecuencia 480 Hz.
 - B. La señal variable se trata de un tono de 30 Hz. El parámetro más relevante en este caso es la fase de la señal, ya que indica el ángulo que forman:
 - El radial que une la aeronave con la estación VOR.
 - El norte magnético.

Con las dos señales de referencia y variable se puede conocer el rumbo, tal y como se ha aclarado anteriormente. La forma concreta es la siguiente: en el receptor del avión se demodula la señal AM en primer lugar. Tras ello, se procede al cálculo del desfase entre las señales nombradas, obteniendo así la fase buscada. Esta fase es la que permite conocer la dirección en la que se encuentra la estación VOR respecto de la posición de la aeronave [8].

Físicamente, en la estación terrestre, la señal de referencia es transmitida por un transmisor no direccional. Este se encuentra acompañado por una serie de antenas que giran a 30 rotaciones por segundo y contienen la información de rumbo [5]. La señal de referencia siempre tiene la misma fase, independientemente de que sea recibida de una u otra parte del arco de 360 grados que rodea la estación en tierra. Por otro lado, la señal de fase variable, transmitida por antenas direccionales, tiene una fase diferente para cada radial en la dirección de la transmisión. La diferencia de fase informará al receptor sobre la radial en la que se encuentra la aeronave con respecto a la estación sintonizada. Como ejemplo es útil aclarar que cuando ambas señales no tengan diferencia de fase, el avión se encontrará sobre la radial de cero grados, al Norte de la estación sintonizada [57].

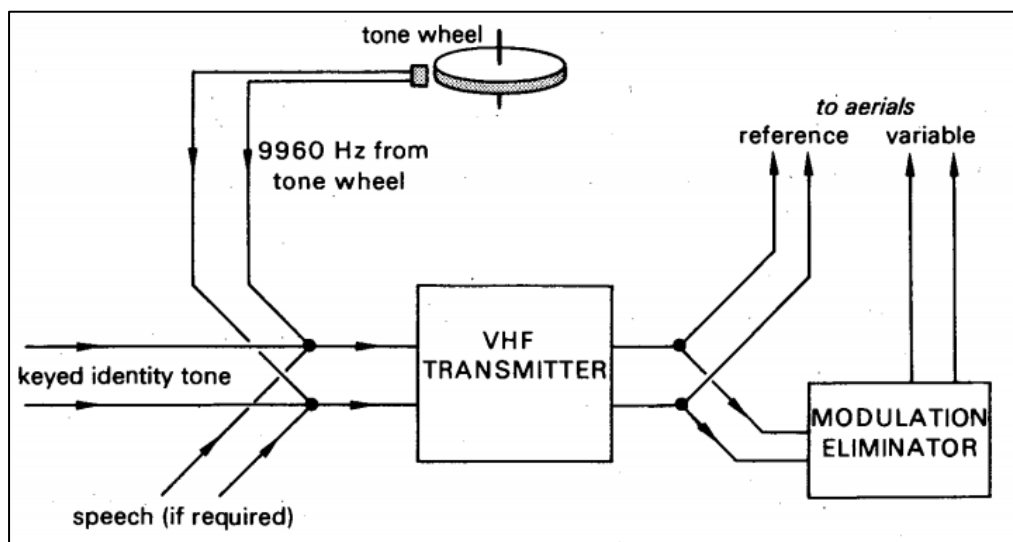


Figura 2-7. Esquemático de un VOR convencional [6].

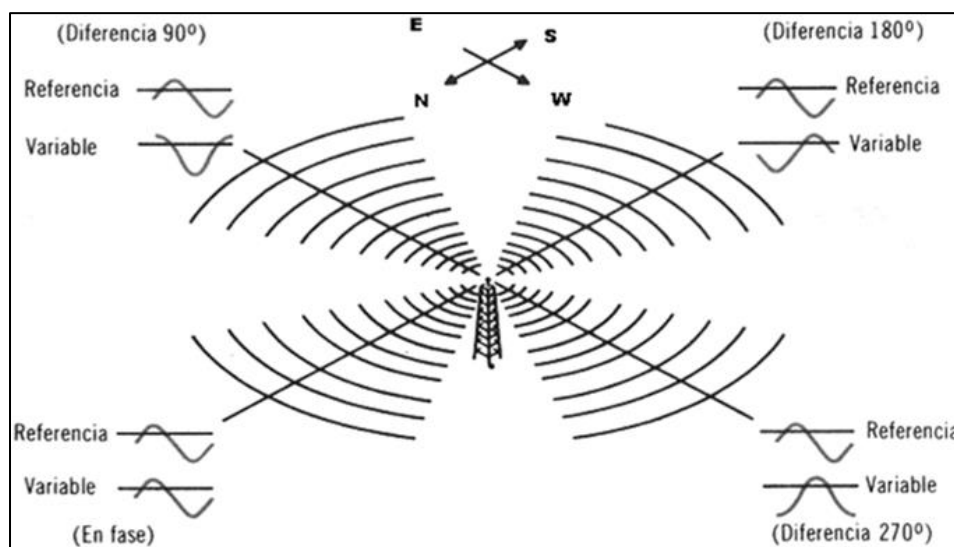


Figura 2-8. Esquema gráfico de la diferencia de fases en el funcionamiento del VOR [57].

Por su parte, existen tres tipos de estaciones VOR, en el lado tierra [5]:

- Terminal (T): desde 1.000 pies sobre el nivel del suelo (AGL) hasta los 12000 AGL pies (inclusive) con un radio de 25 millas náuticas.
- Baja Altitud (L): este tipo de estaciones abarcan desde los 1.000 pies AGL hasta los 18000 (inclusive) con un radio de 40 millas náuticas.
- Alta Altitud (H): el perfil vertical de influencia se divide en tres tramos:

- Radio de 40 millas náuticas desde los 1000 pies AGL hasta los 14500 AGL pies (inclusive).
- Radio de 100 millas náuticas desde los 14500 hasta los 60000 AGL pies (inclusive).
- Radio de 130 millas náuticas desde los 18000 hasta los 45000 AGL pies (inclusive).

Cabe destacar también que en la representación de la posición de la aeronave y la estación VOR, se sitúa la estación en el centro. Alrededor de ella se trazan rectas (denominadas calles o rutas), que partirán desde el centro con cada grado (°) completando así los 360° (0° apuntando al norte magnético).

En cuanto a las indicaciones que se muestran en cabina y que observan los pilotos, es conveniente aclarar las siguientes: [4]

- OBS (*Omni Bearing Selector*). Es un indicador que permite fijar una referencia; en este caso, una ruta o calle a través de la cual se obtendrán las posiciones relativas.
- CDI (*Course Deviation Indicator*). Se trata de una aguja con posición inclinada hacia un lado u otro de la vertical. De esta forma, se puede saber si la aeronave se encuentra desviada a la derecha o a la izquierda respecto de la calle fijada en el OBS.
- Indicador FROM/TO. Se trata de un indicador indispensable para la interpretación del resultado obtenido. Si no existiera este indicador, tendríamos dos posibilidades en cuanto a la posición de la aeronave. Este indicador, por tanto, resuelve la ambigüedad y nos marca cuál de las dos posibilidades que podrían interpretarse a partir del CDI es la correcta. En concreto, nos marca si el ángulo indicado en el CDI con respecto a la calle de referencia marcada en el OBS es un ángulo medido yendo la aeronave hacia el VOR (TO) o yendo desde el VOR (FROM). No es una indicación, sin embargo, de la dirección a la que mira el morro de la aeronave, por lo que hay que prestar atención a la interpretación para que no haya errores.

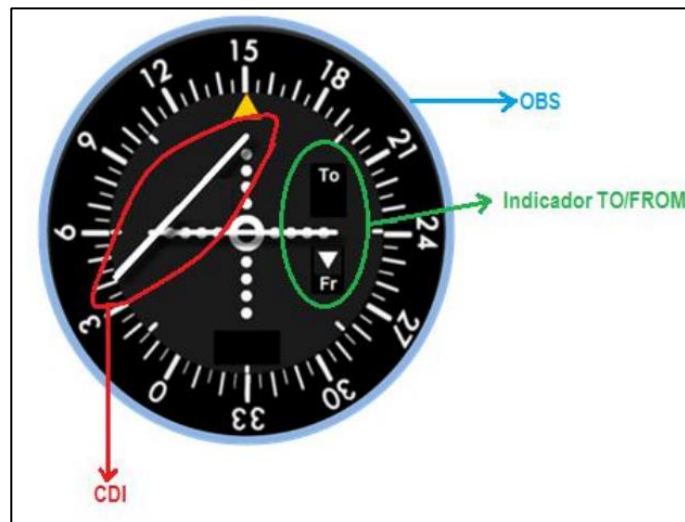


Figura 2-9. Visualización estándar del indicador VOR en una aeronave [4].

Por último, otros datos de interés que se pueden destacar para poder caracterizar mejor los órdenes de magnitud respecto a este sistema son [5]:

- La potencia de estas estaciones se encuentra en torno a los 50 W aproximadamente, para el caso de una estación VOR Doppler (DVOR, más avanzado que el tradicional).
- El nivel mínimo de señal que se debe garantizar para que un punto se encuentre dentro de la cobertura es de -79 dBm en cada punto.

2.3 Difusión en frecuencia modulada, FM

En esta parte del capítulo se van a explicar los conceptos más relevantes de la difusión FM, ya que las interferencias objeto de estudio en este trabajo provendrán de la transmisión de señales FM procedentes de estaciones comerciales. Es decir, es indispensable detallar las bases de esta difusión a fin de dotar al trabajo de unos mimbres que le permitan adquirir un hilo conductor.

La difusión en frecuencia modulada, o difusión FM, se caracteriza por la variación de la frecuencia de la portadora. Esta variación es la que lleva implícita la información que se quiere transmitir, en contraste con la modulación AM, en la que la variación de la amplitud es la que marca la información deseada [9].

A continuación, se exponen los puntos a favor y en contra de este tipo de modulación [5], [9], [10]:

- Inconvenientes:
 - Caracterización matemática compleja, con formulas no cerradas para algunos casos.
 - Mayor complejidad, por tanto, en modulación y en demodulación (mediante cualquier tipo de circuitos electrónicos).
 - Mayor espacio (ancho de banda) en comparación con la necesaria en modulación de amplitud, AM.
- Ventajas:
 - La mayor anchura de canal permite transmitir toda la frecuencia captable por el oído humano.
 - Alta calidad, mayor fiabilidad, alto nivel de insensibilidad a las interferencias.
 - Relación señal ruido muy superior a la obtenida con la modulación en amplitud, AM.
 - La calidad se mantiene con poca degradación en un rango amplio de potencia de señal.

Como los inconvenientes surgían, en gran medida, de las barreras tecnológicas en el pasado, una vez superadas dichas barreras a partir de los años 60, las ventajas eran claramente mayores a las de otras modulaciones y la difusión FM comercial adquirió gran importancia, que hoy mantiene [10].

Además, se introdujo la multiplexión evitando así los problemas de compatibilidad. La señal de las dos vías (izquierda y derecha) de estereofonía se suma y se resta para emitirse junto a la señal de información. Es decir, ya no se envían por separado como tal, ya que a la llegada al receptor un demodulador las separa y reconstruye el sonido original [9].

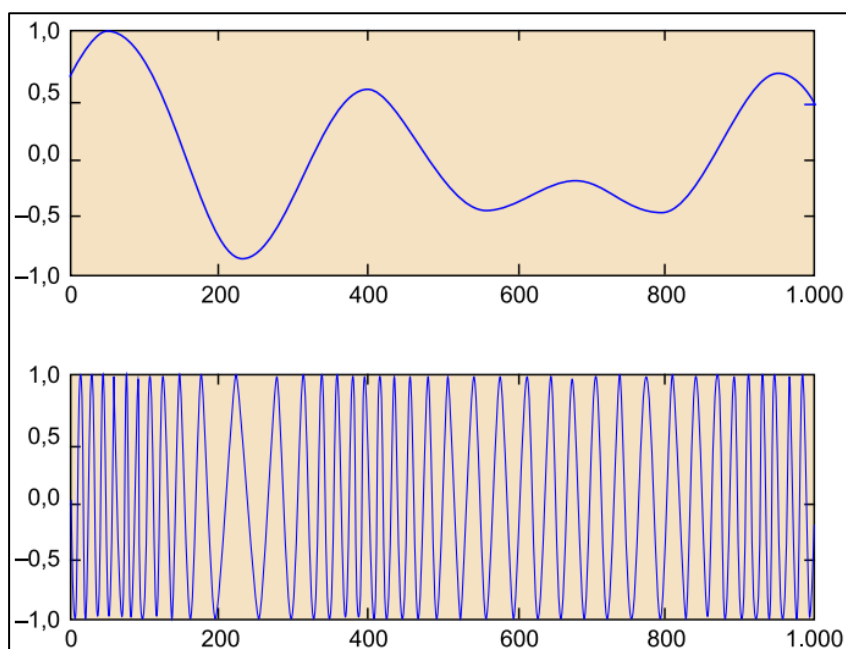


Figura 2-10. Ejemplo de una transmisión y su correspondiente señal modulada en FM [10].

En cuanto a la banda de frecuencias que se usa, hay que remontarse a Estados Unidos y a la saturación de la onda media para explicar por qué se usó otra banda desde el principio. En concreto, la banda que se usó y se sigue utilizando es la banda de VHF, ya que es la que se decidió dejar para emisiones de radio y televisión [9],[10]. A continuación, se exponen datos cuantitativos que sirven para sentar datos claves en esta difusión [5]:

- Respecto a las frecuencias dentro de VHF, el rango es el siguiente: de 87,5 a 108,0 MHz.
- En cuanto al espacio posible entre portadoras puede llegar a alcanzar los 200 kHz.
- La desviación que se puede permitir, acorde a los criterios marcados por el UIT-R es de 75 kHz. Para introducir el concepto de desviación es necesario exponer la expresión de la señal modulada [55]:

$$v_p(t) = V_p \text{sen}[2\pi (f_p + \Delta f \text{sen}(2\pi f_m t)) t] \quad (2-1)$$

Donde V_p es el valor pico de la señal portadora, f_p es la frecuencia de la señal portadora y f_m la frecuencia de la señal moduladora (la que contiene la información).

Con todo ello, se puede definir la desviación de frecuencia Δf como el máximo cambio de frecuencia que puede experimentar la frecuencia de la señal portadora.

- Es posible reproducir una señal estéreo utilizando solo 53 kHz de espectro.
- Actualmente se puede transmitir información adicional además del estéreo, los denominados RDS (*Radio Data System*) o comunicaciones subsidiarias de autoridad (SCA), siendo comunicaciones especiales al no poder recibirse en receptores FM estándar.

Por último, es conveniente dar unos órdenes de magnitud de este tipo de comunicaciones, en base a [5]:

- En función de la potencia de transmisión y de la ubicación de la antena, una estación de transmisión puede cubrir decenas de kilómetros.
- La potencia radiada efectiva (PIRE, *Effective Isotropic Radiated Power*) de una estación de radiodifusión de FM comercial puede superar los 100 kW, valores que dependen fundamentalmente del escenario y el rango de cobertura deseable.

2.4 Interferencias asociadas

En esta parte del capítulo se van a tratar de explicar las interferencias que pueden aparecer en los sistemas de interés, así como el contexto donde se requiere prestar atención ya que será importante cuando se inicie el análisis de las interferencias mediante HTZ Communications.

En primer lugar, cabe destacar que la ICAO divide las interferencias en dos grandes tipos con dos subtipos. En total, se trata de cuatro categorías para poder nombrar su procedencia con exactitud. Se detallan a continuación [4], [5], [6], [11]:

- Tipo de interferencias A: el origen de las interferencias recae en señales de transmisión emitidas dentro de la banda aeronáutica. Es decir, si la transmisión se emite con una frecuencia coincidente con el rango de frecuencias de uso de algún sistema aeronáutico y genera una interferencia en dicho receptor aeronáutico, la interferencia se catalogará en esta división.
 - Subtipo A1 de interferencias: en este subgrupo se pueden dar varias casuísticas.
 - Emisiones de un único transmisor que envía señales no esenciales en dicha banda e interfieren con los sistemas de navegación.
 - Emisiones de varios transmisores que se modulan entre sí. Esta modulación entre ambos transmisores puede crear componentes que presenten una frecuencia dentro del rango aeronáutico, causando interferencias.
 - Subtipo A2 de interferencias: son interferencias que no proceden de transmisiones íntegras en

sí, sino de ciertas componentes de la transmisión que entran en el rango aeronáutico y no son despreciables frente al resto de componentes, pudiendo así causar interferencias catalogadas en este subtipo.

- Tipo de interferencias B: el origen de las interferencias recae en señales de transmisión emitidas fuera de la banda aeronáutica. Es decir, si la transmisión se emite con una frecuencia que no coincide con el rango de frecuencias de uso de algún sistema aeronáutico y genera una interferencia en dicho receptor aeronáutico, la interferencia se catalogará en esta división.
 - Subtipo B1 de interferencias. En este subtipo se recogen todas las interferencias generadas bajo los condicionantes que se detallan a continuación [12], [13], [4]:
 1. Transmisión de alta potencia por parte de un transmisor, que lleva a la parte de recepción a la zona de no linealidad.
 2. Otra u otras transmisiones (no siendo necesario que sean de alta potencia).
 3. La combinación de estas transmisiones (al menos dos), unida a la aparición de no linealidad debido a la transmisión número 1, puede crear interferencias fruto de la intermodulación. Es necesario aclarar cuál es el significado de intermodulación. Se refiere, en este caso, a la formación de una serie de componentes de señales que no corresponden con armónicos, sino que se trata de productos de potencias más altas de lo razonable en frecuencias concretas (es decir, son componentes no deseadas y no esperadas). A través del desarrollo matemático oportuno, se podría demostrar que estas componentes aparecen en frecuencias que suelen ser sumas y restas de las frecuencias iniciales de las transmisiones [14].

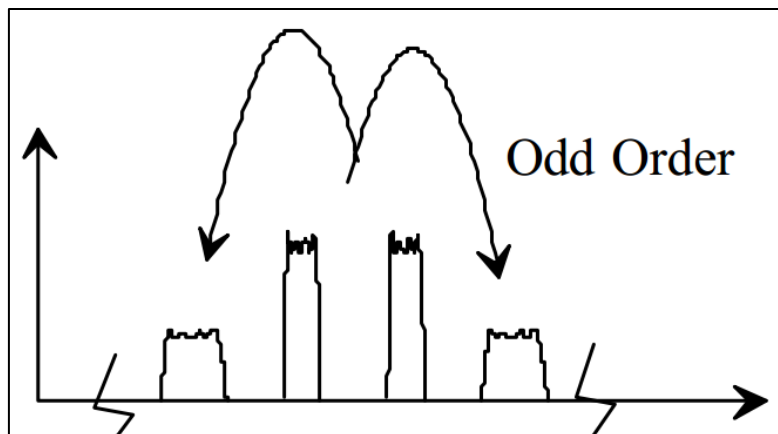


Figura 2-11. Representación frecuencial de la intermodulación [13].

- Subtipo B2 de interferencias. En este subtipo, con emisiones también fuera de la banda aeronáutica, podemos encuadrar todas las interferencias surgidas en el propio receptor debido a una causa clara: la sobrecarga del aparato. Esta sobrecarga puede proceder de uno, dos o más transmisiones, pero el nexo común está en el exceso de carga que sufre el receptor y que produce una serie de componentes consideradas interferencias. En el lenguaje técnico, se habla de desensibilización cuando se concreta esta casuística [4].

Una vez detallados los procesos físicos que llevan a la formación de interferencias, es conveniente aclarar ciertos detalles. En este estudio existen tres aspectos que hay que tener especialmente en cuenta [10], [5]:

1. Las emisiones FM comerciales aumentaron mucho su número y actualmente se mantienen como un medio muy saturado a nivel comercial.
2. Existen frecuencias de canales aeronáuticos próximas y/o coincidentes con ciertas emisiones FM comerciales.
3. El mundo de la aeronáutica se caracteriza por la alta especificidad de frecuencias para poder

proporcionar datos muy críticos a la aeronave. En concreto, hablamos de datos de guiado crítico relativos a sistemas como el localizador del ILS o el VOR. Esta característica hace que ciertas frecuencias sean más propensas a poder sufrir interferencias.

2.5 Frecuencias de los canales aeronáuticos

Una vez conocidos los posibles tipos de interferencias y el contexto en el que se enmarca el estudio que se va a hacer, es conveniente cuantificar el rango de frecuencias que será objeto de interés en el trabajo.

En primer lugar, la coordinación y registro de asignaciones deben ser conformes con los procedimientos establecidos en el Reglamento de Radiocomunicaciones. Son prerrogativa de la UIT, que es el órgano internacional competente en telecomunicaciones [18].

El acuerdo a nivel internacional a través de la OACI asigna al ámbito aeronáutico las siguientes bandas de frecuencias, las cuales aparecen ordenadas de menor a mayor frecuencia para una visualización más clara [11], [15], [16], [17], [18], [19],[50], [51], [52], [53], [54].

- Baliza no direccional (NDB, *Non-Directional Beacon*): 190 - 1750 KHz.
- Radiobalizas ILS: 74,8 - 75,2 MHz.
- Localizador ILS, VOR, Sistema de Aumentación Basado en Tierra (GBAS, *Ground Based Augmentation System*), Enlace de datos VHF (VDL modo 4, *VHF Data link mode 4*): 108 - 117,975 MHz.
- Comunicaciones aeroterrestres orales (DSB/AM), VDL Modos 2 y 4: 117,975 - 137 MHz.
- Senda de planeo del ILS: 328,6 - 335,4 MHz. Cabe reseñar que el uso de esta frecuencia está únicamente habilitado en la aeronáutica para sistemas de aterrizaje instrumental.
- Equipo medidor de distancia (DME (SSR), *Distance Measuring Equipment*): 960 - 1215 MHz.
- Sistema de aterrizaje por microondas (MLS, *Microwave Landing System*): 5030 - 5091 MHz.

A dicha lista, hay que añadir una serie de frecuencias que tienen un uso esencial, como se comentó anteriormente, y que sirven de guiado crítico a la aeronave, con lo que se exponen a las interferencias de manera relevante con respecto al resto de frecuencias de la banda. Se trata de [4], [5], [15], [18]:

- Localizador ILS (ILS LOC): frecuencias críticas de 90 y 150 Hz.
- VOR: frecuencias críticas de 9960 Hz y 30 Hz.

Por tanto, en el estudio que se realizará en los posteriores capítulos, el análisis adquirirá mayor profundidad en las frecuencias anteriores atendiendo a un criterio de mayor probabilidad de interferencias con consecuencias para la interpretación de datos y, en definitiva, la navegación aérea.

Se recuerda, para mayor facilidad del lector, que las frecuencias de FM comerciales abarcan desde 87,5 MHz hasta los 108 MHz, pudiendo observar cuantitativamente, llegados a este punto, la proximidad entre las frecuencias aeronáuticas y las frecuencias comerciales objeto del estudio.

Se muestra, a continuación, un resumen de las frecuencias usadas en la banda aeronáutica donde se concreta la ubicación frecuencial de cada uno de los sistemas [11].

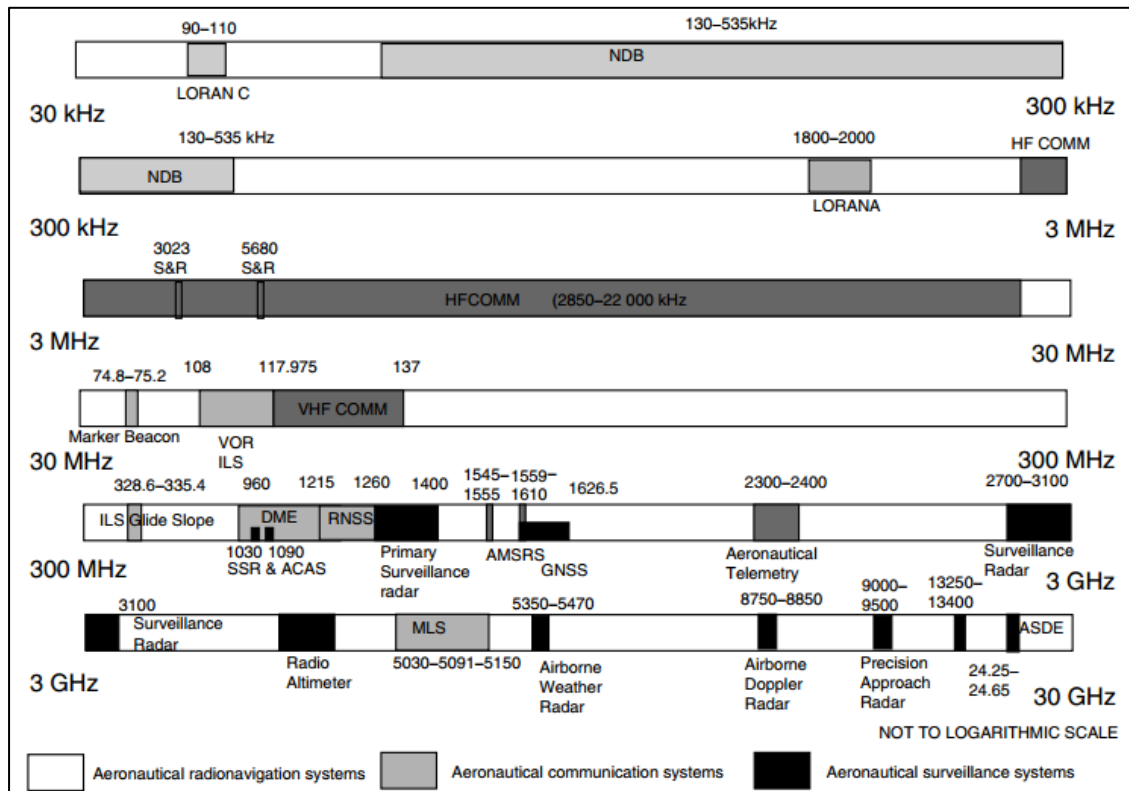


Figura 2-12. Espectro de frecuencias de la banda aeronáutica [11].

Una vez analizados todos los datos anteriores, se puede realizar un esquema general y completo de las frecuencias asociadas a los equipos aeronáuticos. Sin embargo, teniendo en cuenta que los sistemas que se van a tratar de aquí en adelante son las radioayudas ILS y VOR, es conveniente profundizar en las frecuencias concretas de trabajo, en cuántos canales se pueden encontrar y en la separación entre estos.

Por un lado, respecto al ILS, la profundización se centra en el localizador del ILS, por su cercanía respecto a los equipos aeronáuticos en términos de frecuencias. Los datos se exponen a continuación [5]:

- La frecuencia mínima de emisión es de 108,10 MHz y la máxima de de 111,95 MHz.
- El mínimo espacio entre los posibles canales en el citado rango de frecuencias es de 50 kHz.
- La paridad marca la ubicación de los canales: sólo puede haberlos en aquellas frecuencias con el primer decimal impar.

Con todos estos requisitos, aparecen un total de 40 canales, expresados en MHz: 108.10, 108.15, 108.30, 108.35, 108.50, 108.55, 108.70, 108.75, 108.90, 108.95, 109.10, 109.15, 109.30, 109.35, 109.50, 109.55, 109.70, 109.75, 109.90, 109.95, 110.10, 110.15, 110.30, 110.35, 110.50, 110.55, 110.70, 110.75, 110.90, 110.95, 111.10, 111.15, 111.30, 111.35, 111.50, 111.55, 111.70, 111.75, 111.90 y 111.95.

Por otro lado, respecto al VOR, los datos más concretos son los siguientes [5]:

- La frecuencia mínima de emisión es de 108,00 MHz y la máxima de de 117,95 MHz. Por lo que la banda de frecuencias es más amplia que la del ILS LOC.
- El mínimo espacio entre los posibles canales en el citado rango de frecuencias es de 50 kHz, al igual que en el ILS LOC.
- Se pueden distinguir dos zonas en la distribución de las frecuencias:

- 1ª zona: abarca desde los 108,00 hasta los 111,95 MHz. Es decir, se trata del rango de frecuencias en la que hay emisiones tanto de VOR como de ILS. En esta zona el VOR emite en las frecuencias con primer decimal par, para no solaparse con las emisiones de ILS LOC.
- 2ª zona: abarca desde los 112,00 MHz hasta los 117,95 MHz. Es decir, es un rango de frecuencias en la que sólo emite el VOR y no el ILS, por lo que se puede aprovechar el espacio mejor y colocar un canal cada 50 kHz, cumpliendo con el requisito de mínimo espaciado.

Con todos estos requisitos, aparecen un total de 160 canales, expresados en MHz: 108.00, 108.05, 108.20, 108.25, 108.40, 108.45, 108.60, 108.65, 108.80, 108.85, 109.00, 109.05, 109.20, 109.25, 109.40, 109.45, 109.60, 109.65, 109.80, 109.85, 110.00, 110.05, 110.20, 110.25, 110.40, 110.45, 110.60, 110.65, 110.80, 110.85, 111.00, 111.05, 111.20, 111.25, 111.40, 111.45, 111.60, 111.65, 111.80, 111.85, 112.00, 112.05, 112.10, 112.15, 112.20, 112.25, 112.30, 112.35, 112.40, 112.45, 112.50, 112.55, 112.60, 112.65, 112.70, 112.75, 112.80, 112.85, 112.90, 112.95, 113.00, 113.05, 113.10, 113.15, 113.20, 113.25, 113.30, 113.35, 113.40, 113.45, 113.50, 113.55, 113.60, 113.65, 113.70, 113.75, 113.80, 113.85, 113.90, 113.95, 114.00, 114.05, 114.10, 114.15, 114.20, 114.25, 114.30, 114.35, 114.40, 114.45, 114.50, 114.55, 114.60, 114.65, 114.70, 114.75, 114.80, 114.85, 114.90, 114.95, 115.00, 115.05, 115.10, 115.15, 115.20, 115.25, 115.30, 115.35, 115.40, 115.45, 115.50, 115.55, 115.60, 115.65, 115.70, 115.75, 115.80, 115.85, 115.90, 115.95, 116.00, 116.05, 116.10, 116.15, 116.20, 116.25, 116.30, 116.35, 116.40, 116.45, 116.50, 116.55, 116.60, 116.65, 116.70, 116.75, 116.80, 116.85, 116.90, 116.95, 117.00, 117.05, 117.10, 117.15, 117.20, 117.25, 117.30, 117.35, 117.40, 117.45, 117.50, 117.55, 117.60, 117.65, 117.70, 117.75, 117.80, 117.85, 117.90 y 117.95.

3 HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

Las herramientas que se usarán en el estudio serán el objeto principal de este capítulo. El análisis de interferencias se realizará de forma práctica, por lo que requiere el empleo de un software con uso ampliamente conocido, cuyas bases se explicarán brevemente.

Además, se explicarán las hipótesis que conforman los modelos de propagación usados por el programa, así como los patrones de radiación escogidos para los sistemas de radionavegación en estudio.

Por último, se exponen los métodos recomendados para evaluación de interferencias, a tenor de lo establecido por el Sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones.

3.1 HTZ Communications

HTZ Communications (cuyo antiguo nombre era ICS Telecom) es una herramienta de planificación de radio perteneciente a la empresa ATDI, que sirve para diseñar, optimizar y desarrollar redes de enlaces de radio o microondas de diversa consideración [20]. Bajo las funcionalidades de este software se modelarán los sistemas de radionavegación (ILS y VOR en este caso) del aeropuerto de Sevilla y se realizará el análisis de las posibles interferencias de las emisoras FM comerciales en los sistemas de radionavegación en el aeropuerto de Sevilla. En concreto, las tecnologías que se pueden modelar a través de dicha herramienta son [4]:

- Comunicaciones aeronáuticas.
- Comunicaciones marítimas.
- Radio móvil terrestre.
- Acceso inalámbrico fijo, pudiéndose desarrollar tanto comunicaciones de tipo punto a punto como de tipo punto a multipunto.
- Comunicaciones por móvil (GSM, GPRS, CDMA / EVDO / EDGE, HSDPA / HSUPA, 802.16e WiMAX, LTE).
- Comunicaciones en interiores como WiFi.
- Transmisiones. En este caso se pueden modelar transmisiones de televisión y radio.
- Sistemas de telemetría.
- Sistemas radar.
- Estaciones terrenas de satélite.

En cuanto a frecuencias, el programa admite desde los 10 kHz hasta los 450 GHz. Por ello, las bandas de frecuencias a las que el programa da soporte para el modelado son las siguientes: MF, HF, VHF, UHF, SHF y EHF [4].

Como dato relevante del funcionamiento del programa, ICS Telecom es una aplicación que opera en capas, las cuales tienen un contenido y extensión diferente [21]. Las capas no funcionan de manera independiente, sino que su combinación es la base de un proyecto. La combinación de las capas, junto a una serie de elementos de red, características técnicas del área que se analiza y los parámetros de simulación escogidos, conforman un proyecto en HTZ [20].

En definitiva, si pretendemos analizar o modelar cierta comunicación, es fundamental tener en cuenta la estructura descrita para poder crear un proyecto y tras ello, trabajar en él.

Para mayor visualización, se muestra en la siguiente figura un esquema de la organización que posee el programa en capas para cada uno de los proyectos que se creen, donde se aprecian las extensiones asociadas a cada capa.

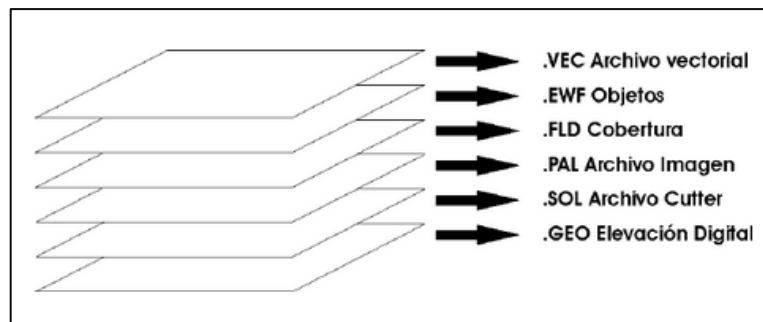


Figura 3-1. Organización en capas de cada proyecto en HTZ Communications [21].

Una vez realizado el proceso de creación de un proyecto (para una descripción detallada se puede consultar [20] y la web de ATDI), aparecerá reflejado con un símbolo en el mapa general de inicio del programa. De esta manera, tal y como se muestra en la siguiente imagen, cuando se abre el programa, se puede acceder a cualquiera de los proyectos creados anteriormente, pudiéndolos identificar rápidamente ya que el símbolo asociado se encuentra en el área de estudio del mismo [20], [21].



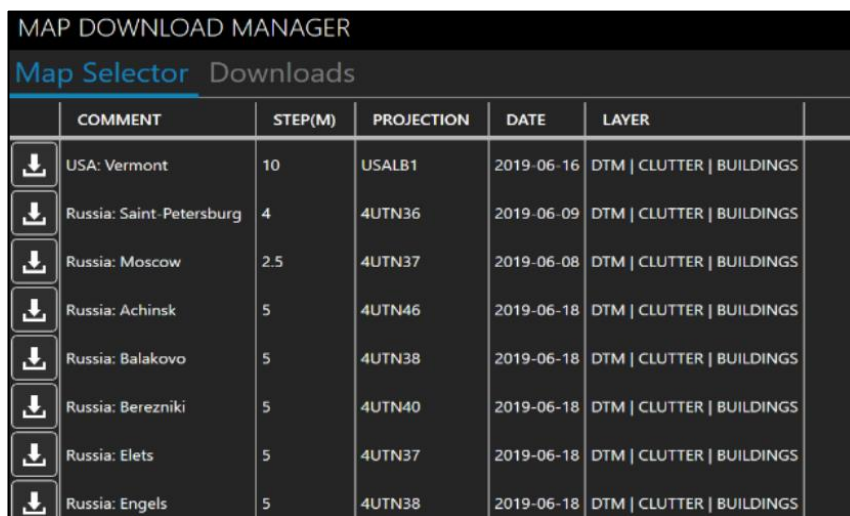
Figura 3-2. Visualización típica con los distintos proyectos disponibles [20].

3.1.1 Método de trabajo en HTZ Communications

El objetivo último de cualquier proyecto en esta herramienta es observar y extraer conclusiones a raíz de una serie de simulaciones y resultados generados por el programa, ya que esto permitirá tomar decisiones. Se parte de distintos condicionantes fijados por el usuario de la herramienta y el programa realiza los cálculos oportunos usando los modelos de propagación que tiene integrados [4], [20].

De forma concreta, los pasos que hay que seguir para obtener gráficas y simulaciones concretas que son de interés para el proyecto son:

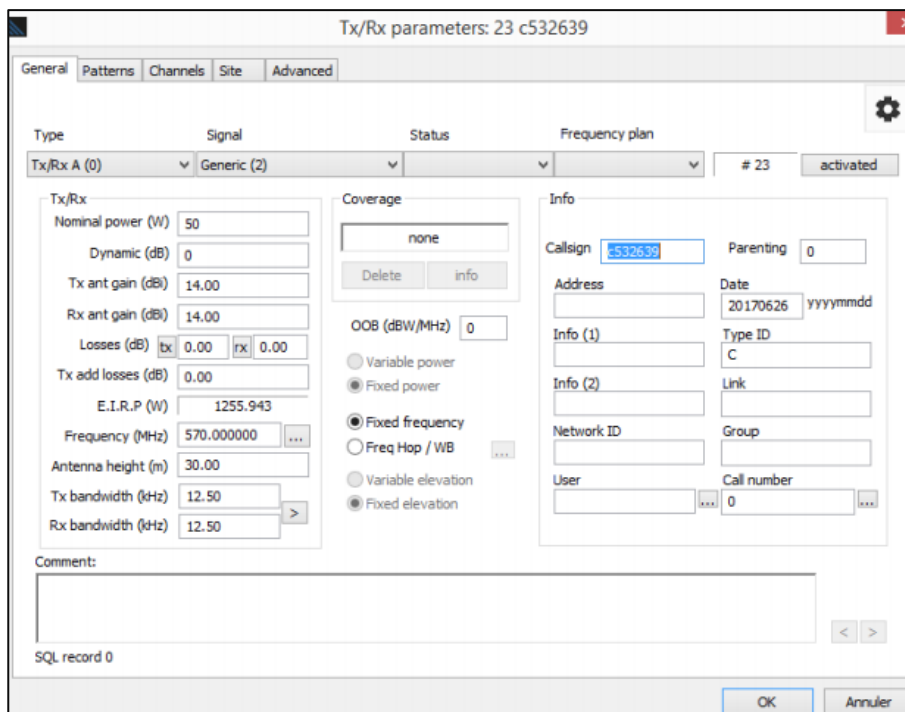
1. Carga inicial de los mapas relativos al área de estudio [20], [21].



	COMMENT	STEP(M)	PROJECTION	DATE	LAYER
↓	USA: Vermont	10	USALB1	2019-06-16	DTM CLUTTER BUILDINGS
↓	Russia: Saint-Petersburg	4	4UTN36	2019-06-09	DTM CLUTTER BUILDINGS
↓	Russia: Moscow	2.5	4UTN37	2019-06-08	DTM CLUTTER BUILDINGS
↓	Russia: Achinsk	5	4UTN46	2019-06-18	DTM CLUTTER BUILDINGS
↓	Russia: Balakovo	5	4UTN38	2019-06-18	DTM CLUTTER BUILDINGS
↓	Russia: Berezniki	5	4UTN40	2019-06-18	DTM CLUTTER BUILDINGS
↓	Russia: Elets	5	4UTN37	2019-06-18	DTM CLUTTER BUILDINGS
↓	Russia: Engels	5	4UTN38	2019-06-18	DTM CLUTTER BUILDINGS

Figura 3-3. Panel típico de descarga de mapas en HTZ Communications [20].

2. Diseño de la red o enlace. Se trata de ubicar sobre el mapa las antenas o equipos oportunos que conforman la comunicación que se pretende modelar. Para ubicarlos, es necesario definir, además de la propia localización, una serie de parámetros de simulación que contribuyen a que el modelado sea lo más realista posible [21].



Tx/Rx parameters: 23 c532639

General | Patterns | Channels | Site | Advanced

Type: Tx/Rx A (0) | Signal: Generic (2) | Status: # 23 | Frequency plan: activated

Tx/Rx

Nominal power (W): 50

Dynamic (dB): 0

Tx ant gain (dBi): 14.00

Rx ant gain (dBi): 14.00

Losses (dB): tx 0.00 | rx 0.00

Tx add losses (dB): 0.00

E.I.R.P (W): 1255.943

Frequency (MHz): 570.000000

Antenna height (m): 30.00

Tx bandwidth (kHz): 12.50

Rx bandwidth (kHz): 12.50

Coverage

none

Delete | info

OOB (dBW/MHz): 0

Variable power

Fixed power

Fixed frequency

Freq Hop / WB

Variable elevation

Fixed elevation

Info

Call sign: c532639 | Parenting: 0

Address: | Date: 20170626 | yyyymmdd

Info (1): | Type ID: C

Info (2): | Link: |

Network ID: | Group: |

User: | Call number: 0

Comment:

SQL record 0

OK | Annuler

Figura 3-4. Configuración de parámetros en caso de una comunicación Tx/Rx [20].

3. Selección de la simulación deseada, es decir, se trata de escoger qué es lo que se pretende observar con este proyecto. En este caso, además de plantear el modelado, se pretende realizar análisis de interferencias, pero también es interesante y posible con esta herramienta obtener áreas de coberturas, líneas de vista o grados de servicios, entre otros parámetros [4], [21].
4. Ejecución de la simulación. Se trata de un proceso exclusivo, en el que la herramienta pone en marcha

sus modelos de propagación [20], [21].

5. Obtención de resultados. Atendiendo al paso 3, los resultados pueden ser de distinta índole. Sin embargo, con carácter general se pueden ordenar en tres tipos [4], [20], [21]:
 - a. Variante gráfica, donde se puede establecer un análisis más general y cualitativo.
 - b. Variante numérica, en la que se extraen tablas y datos cuantitativos, que permiten concretar valores de variables en distintos puntos del mapa.
 - c. Variante estimativa, con diagramas y otros parámetros estadísticos relativos al comportamiento de la comunicación modelada.

3.2 Modelo de propagación

Otra de las herramientas con las que va a contar el análisis es el uso de un modelo de propagación. Estos modelos permiten tener en cuenta, dependiendo del contexto de la comunicación, los factores más relevantes en la propagación de ondas entre el transmisor y el receptor, ignorando aquellos factores cuyo efecto es despreciable.

3.2.1 Propagación en espacio libre

La propagación en espacio libre es una referencia fundamental en ingeniería radioeléctrica. Es decir, constituye la base para construir un modelo de propagación, ya que parte de las hipótesis más esenciales [41].

El espacio libre no es más que una atmósfera con propiedades homogéneas y isotrópicas; es decir, sin tener en cuenta las numerosas influencias que habría que tener en cuenta en la atmósfera terrestre [40].

Sin embargo, la propagación en espacio libre tiene en cuenta la propia pérdida inherente a este espacio [41]. Definido según [40], la pérdida de energía entre dos antenas isotrópicas al atravesar una atmósfera homogénea se llama pérdida de espacio libre. Esta pérdida de energía no tiene en cuenta obstáculos ni difracciones, es decir, que parte de la base de que existe una línea de vista sin obstrucciones entre transmisión y recepción [40], [41].

En cuanto a las hipótesis, se asume que las ondas electromagnéticas se propagan en línea recta entre el transmisor y el receptor y se les designa como ondas directas. Aparece en sistemas en los que el transmisor y el receptor están suficientemente alejados de la superficie terrestre y las antenas son suficientemente direccionales como para que la energía radiada fuera de la trayectoria directa no sea significativa [43], por lo que en el caso de estudio habrá que tener en cuenta más variables ya que no se dan estas condiciones.

Básicamente, la pérdida de espacio libre responde a los efectos de propagación de la onda electromagnética, siendo válida para receptores situados en campo lejano respecto de la antena transmisora [40].

En el caso de este trabajo, los enlaces que se tratan son punto a punto, es decir, desde la antena del VOR o el ILS hasta cualquier punto del aeropuerto o inmediaciones de este. Si se observa de forma conjunta, también se puede hablar teóricamente de un enlace punto a multipunto ya que la señal se emite desde un punto, pero la recepción resulta ser cualquiera de los hipotéticos píxeles del programa donde podría encontrar el avión y, por ende, el receptor ILS o VOR correspondiente.

Para concretar cómo se modela la pérdida en espacio libre, se habla de un enlace punto (antena de ILS o VOR) a punto (cualquier posición exacta del receptor ILS o VOR en el avión), y la ecuación que lo rige es [40], [41]:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \cdot \log f + 20 \cdot \log d, \quad (3.2-1)$$

siendo L_{bf} la pérdida básica de transmisión en el espacio libre (dB), d la distancia (km) y f la frecuencia (MHz).

3.2.2 Propagación sobre Tierra plana y otras simplificaciones

Si la distancia entre transmisor y receptor es inferior a 10 km, como en este caso, es correcto suponer la Tierra como plana [43]. A distancias mayores es necesario considerar la curvatura de la Tierra para que el resultado sea veraz. Ambos modelos tienen en cuenta la recepción de señal por rayo directo, así como la señal después de reflejarse sobre la superficie terrestre. En el receptor hay que sumar ambas señales, lo que implica tener en cuenta el desfase con el que se reciben. El resultado de la suma puede conllevar que la recepción implique más potencia que en espacio libre o menos, habiendo para ello un término de corrección L_{ex} . La forma de calcular este término depende de si se considera modelo de Tierra plana o curva, de ahí la importancia de esta consideración.

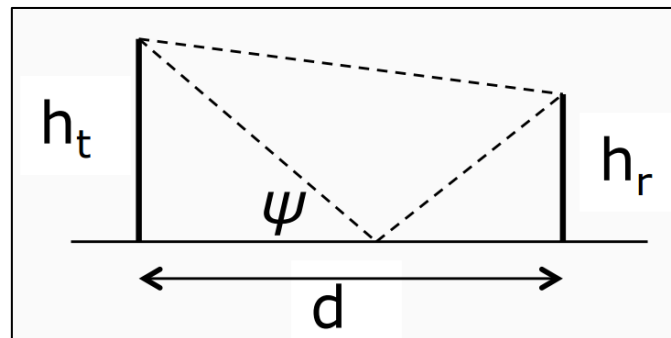


Figura 3-5. Representación de la simplificación de propagación en Tierra plana [42].

Las señales, en su viaje hasta el receptor, son susceptibles de verse sometidas a un proceso de atenuación debido a variados factores. A continuación, en base a [42] y analizando el caso que compete, se realiza un resumen de las principales simplificaciones teóricas relativas al trabajo:

- Atenuación por vegetación: la zona donde se sitúa el aeropuerto de Sevilla no se encuentra inmersa en bosques. Hay árboles en las inmediaciones, pero al tratarse de un análisis en un entorno cercano a la pista de aterrizaje, las atenuaciones debido a este factor son despreciables.
- Atenuación por gases y vapores atmosféricos: presenta importancia para frecuencias por encima de los 10 GHz, por lo que en este caso también es despreciable este fenómeno al analizar frecuencias aeronáuticas más bajas como son las del VOR e ILS.

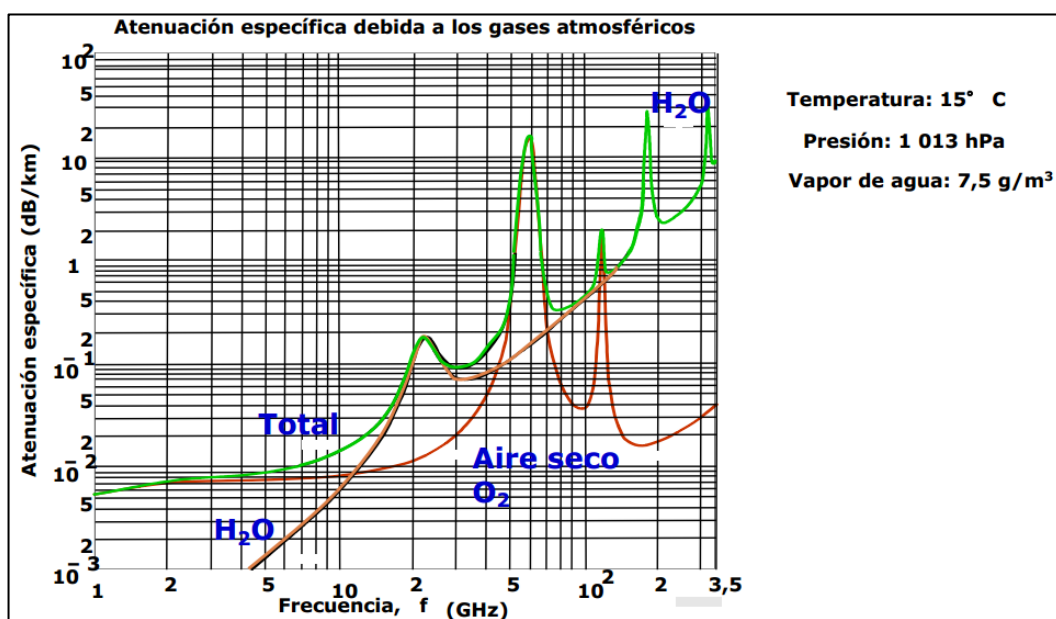


Figura 3-6. Atenuación específica debida a los gases atmosféricos [42].

- Atenuación por lluvia: solo toma valores no despreciables para $f > 6$ GHz, por lo que no es importante en este contexto.

3.2.3 Propagación por difracción

En este caso, atendiendo al lugar de estudio, se puede considerar que hay algún obstáculo, como podría ser la terminal aeroportuaria o las propias elevaciones del terreno [44]. Por eso, tener en consideración la difracción causada es fundamental para una correcta caracterización del problema.

En cuanto al concepto físico de difracción, la explicación es la siguiente, en base a [45]: al interponer en el camino de una onda plana una barrera con una abertura u obstáculo, las vibraciones procedentes de los puntos que están a ambos lados de la abertura no pueden avanzar y tras la barrera sólo se observa la envolvente de las ondas que proceden de los focos secundarios que caben por la abertura. En consecuencia, los frentes de onda dejan de ser planos y adquieren una forma curvada o semicircular. Hay que destacar que la dimensión del obstáculo debe ser del mismo orden y parecido a la longitud de onda de la señal para que sea relevante este fenómeno. Dicho de otro modo, es necesario que la rendija sea del mismo tamaño o menor que la longitud de onda [45], tal y como se aprecia en el siguiente ejemplo.

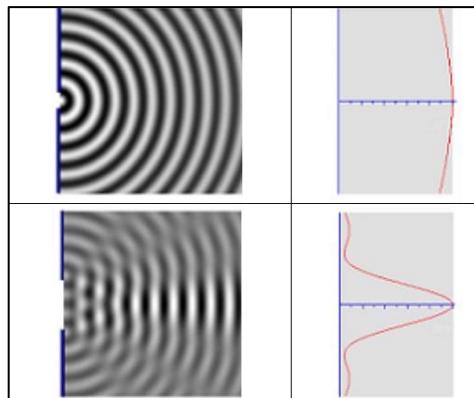


Figura 3-7. Ejemplos del fenómeno de difracción según el tamaño de la rendija [45].

A priori, el primer paso para saber si la zona puede estar afectada por difracción, debido a los obstáculos como la terminal o las elevaciones del terreno, es calcular el radio de la primera zona de Fresnel, un concepto matemático basado en elipsoides. Si no existe ningún obstáculo dentro del primer elipsoide de Fresnel, se considera que la propagación se da con visibilidad directa, pudiendo despreciar así los fenómenos de difracción [42], [44].

En [42] [44], se concreta el cálculo de la primera zona de Fresnel:

$$R_1(m) = 548 \cdot \sqrt{\frac{d_1(km) \cdot d_2(km)}{f(MHz) \cdot (d_1(km) + d_2(km))}} \quad (3.2-2)$$

siendo d_1 la distancia desde Tx hasta el obstáculo en cuestión y d_2 la distancia desde Rx hasta el obstáculo referido. Por su parte, se define h como la distancia entre la superficie del obstáculo y la línea de unión Tx/Rx.

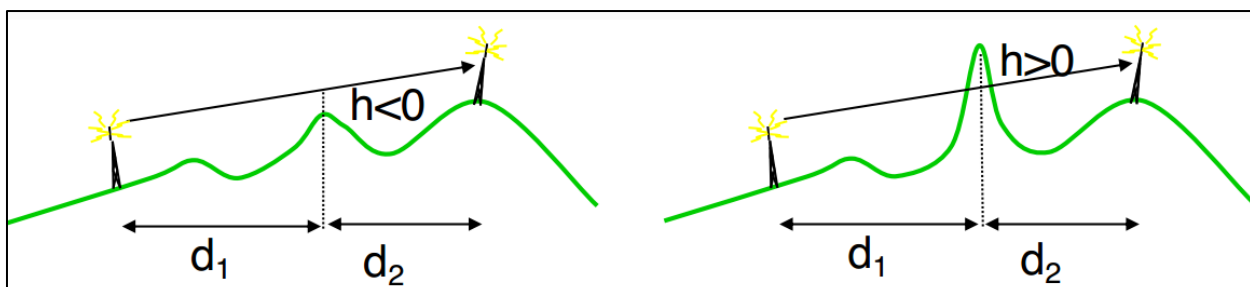


Figura 3-8. Representación gráfica de las variables implicadas en el cálculo de la primera zona de Fresnel [42].

Una vez calculado este parámetro, hay que fijarse en el cociente h/R_1 . Si este cociente presenta valores mayores a -0.7 (es decir, comprendidos entre -0.6 y ∞), la zona se encuentra afectada, en términos de difracción, por el obstáculo referido. De lo contrario, este fenómeno no es necesario tenerlo en cuenta [42].

En este trabajo, se pueden distinguir dos matices:

- Por un lado, si una aeronave se encuentra aterrizando, haciendo uso del receptor ILS, no habrá problema con la difracción en tanto que el aeropuerto de Sevilla no presenta variaciones importantes en orografía y, además, como en cualquier aeropuerto, se aterriza conforme a los procedimientos establecidos y sin obstáculos en la línea que una la aeronave y los transmisores ILS.
- Por otro lado, si la aeronave se encuentra en vuelo, hay que tener en cuenta si puede haber algún efecto de difracción por la mayor distancia con el transmisor VOR. En cualquier caso, la mayor altitud a la que se encuentra permite que h sea más negativo, disminuyendo así el hipotético efecto de difracción.

3.2.4 Modelo de propagación aeronáutico

El programa HTZ Communications tiene a disposición de sus usuarios distintos modelos de propagación adaptados al contexto o sector para el que se realiza el proyecto. En este caso, es relevante el modelo de propagación aeronáutico que integra en sus opciones de modelado.

El modelo se basa en una transmisión central con algoritmos de difracción de obstáculos opcionales. En primera instancia, el modelo reproduce el conjunto publicado de curvas de referencia en la recomendación UIT-R titulada Curvas de propagación UIT-R P.528-3 para servicios móviles aeronáuticos y de radionavegación que utilizan las bandas de ondas métricas, decimétricas y centimétricas [46], [47].

Esta Recomendación contiene un método para predecir las pérdidas de transmisión básicas en la gama de frecuencias 125-15 500 MHz para los servicios aeronáutico y por satélite. El método utiliza una interpolación en los datos de pérdidas de transmisión básicas extraídos de un conjunto de curvas [48].

El método parte de una serie de parámetros introducidos por el usuario, y a través de unas curvas y fórmulas prefijadas, se obtienen resultados muy fiables y ajustados al ámbito aeronáutico [48], [49]. Consiste en 11 etapas, descritas en [49], de las que se presenta una breve descripción a continuación:

- Etapa 1: calcular los parámetros geométricos asociados a cada terminal.
- Etapa 2: determinar la distancia máxima de visibilidad directa, d_{ML} .
- Etapa 3: calcular la pérdida por difracción para la distancia d_{ML} y la distancia d_d , para la que la línea de difracción permite predecir una pérdida de 0 dB.
- Etapas 4, 5 y 6: determinar si el trayecto de propagación se encuentra en la zona de visibilidad directa o más allá del horizonte para la distancia deseada d . En caso de visibilidad directa, se continúan los cálculos en la etapa 5. En caso contrario, se salta a la etapa 6 que asegura coherencia y continuidad a nivel físico ya que hay una transición a dispersión troposférica.
- Etapa 7: calcular pérdidas no tenidas en cuenta en el espacio libre y a través de absorción atmosférica.
- Etapa 8: calcular las pérdidas en el espacio libre, en dB, para cierto trayecto.
- Etapa 9: calcular las pérdidas por absorción atmosférica para un trayecto más allá del horizonte.
- Etapa 10: calcular las pérdidas debidas a la variabilidad a largo plazo para un cierto cuantil de tiempo.
- Etapa 11: calcular la pérdida de transmisión básica en dB.

Además, como se ha comentado, el programa permite seleccionar un modelo complementario asociado a las irregularidades del terreno y basado en las Recomendaciones de la UIT-R P.526-10. Este modo se puede utilizar para mejorar la precisión cuando la ruta entre Tx y Rx se encuentra obstruida [46].

Por último, en el programa hay que tener en cuenta la referencia que se toma respecto de la altura de la antena del receptor, es decir, se puede marcar la opción de nivel del mar o del nivel del terreno, acorde al dato introducido por el usuario, asegurando así la coherencia de los datos.

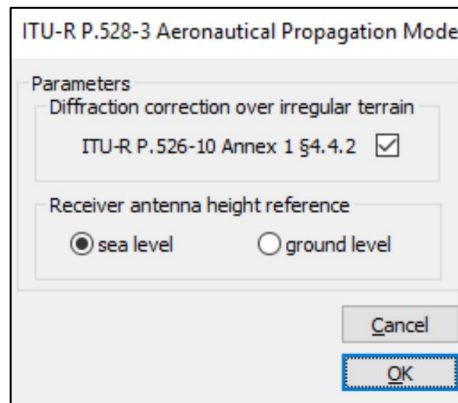


Figura 3-9. Panel de opciones en el modelo aeronáutico de HTZ Communications [47].

3.3 Patrones de radiación

Una vez conocido el modelo de propagación que se usará en las simulaciones, se va a explicar cuáles son las formas de radiar de las antenas implicadas en este trabajo. En concreto, este dato es proporcionado por los diagramas de radiación de las antenas, que reflejan los patrones de radiación de las mismas.

Un diagrama de radiación es la representación gráfica de las características de radiación de una antena frente a una variable independiente, la dirección [25], [27]. La utilidad de estos diagramas radica en que a partir de ellos se pueden clasificar las antenas y definir ciertos parámetros de manera conjunta como puede ser la directividad. Los parámetros más importantes del diagrama de radiación son [25]:

- **Lóbulo Principal:** es el margen angular en torno a la dirección de máxima radiación.
- **Lóbulo secundario:** son el resto de máximos relativos, de valor inferior al principal.
- **Dirección de apuntamiento:** se refiere a aquella dirección en la que la radiación alcanza el máximo de todo el diagrama. A partir de este parámetro se definen otros dos de relevancia:
 - **Directividad:** se define como la relación entre la intensidad de radiación de una antena en la dirección del máximo y la intensidad de radiación de una antena isotrópica que radia con la misma potencia total.
 - **Ganancia:** se refiere a la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección a una cierta distancia y la densidad de potencia que radiaría a la misma distancia una antena isotrópica con la misma potencia entregada.

Además, a partir de los últimos dos conceptos explicados, surge la **eficiencia**, que resulta del cociente entre ganancia y directividad. Es decir, relaciona la potencia que se radia con la potencia que finalmente se entrega a la antena.

- **Relación de lóbulo principal a secundario (SLL):** es el cociente en dB entre el valor máximo del lóbulo principal y el valor máximo del lóbulo secundario.

3.3.1 Patrón de radiación de ILS

Para estudiar los patrones de radiación del ILS, hay que tener en cuenta que LOC y GS usan técnicas de antenas similares, por lo que de aquí en adelante se hablará únicamente de diagramas del localizador. [34]

En cuanto a las radiobalizas, no es relevante el estudio de sus patrones de radiación teniendo en cuenta que se

descartan interferencias en este sentido. Se parte de la base de que la diferencia de frecuencias entre las radiobalizas y las emisoras FM comerciales es suficientemente grande para no ser objeto de interés en el trabajo [1], [3], [4].

En la actualidad, se ha generalizado el uso de antenas log-periódicas para la construcción de localizadores debido a la combinación de rendimiento y direccionalidad apropiados [34]. Una antena logarítmica periódica se caracteriza por poseer una impedancia que depende periódicamente del logaritmo de la frecuencia de trabajo [35]. Este tipo de antenas se puede construir de varias formas, habiendo antenas planas, trapezoidales o en V, entre otras. Sin embargo, la más utilizada es la tabla de dipolos log-periódica, abreviada LPDA, que es la conformación que se suele usar en los aeropuertos para el localizador ILS y que se muestra en la siguiente figura [35], [36].



Figura 3-10. Antena log-periódicas de tipo LPDA [36].

Se trata de una antena cuyo objetivo no es radiar en todas las direcciones de igual forma, sino que destaca por su alta directividad [35].

Por ello, para las simulaciones de los equipos del ILS en HTZ Communications se escogerán patrones de radiación correspondientes a antenas LPDA. Un ejemplo de patrón de radiación de estas antenas se muestra a continuación, modeladas en [5]:

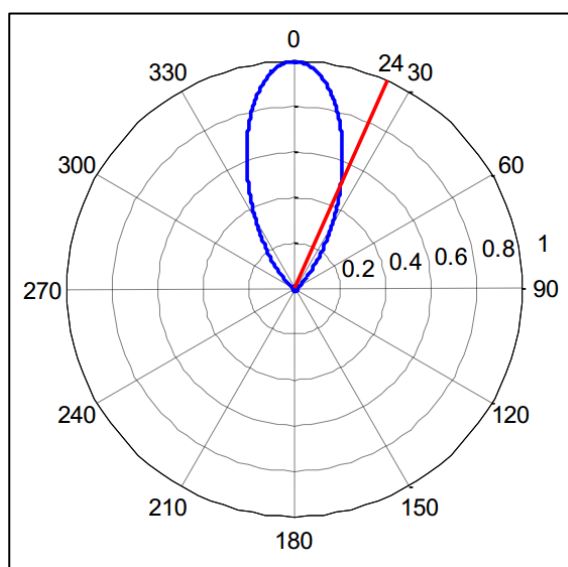


Figura 3-11. Diagrama horizontal de radiación de una antena LPDA [5].

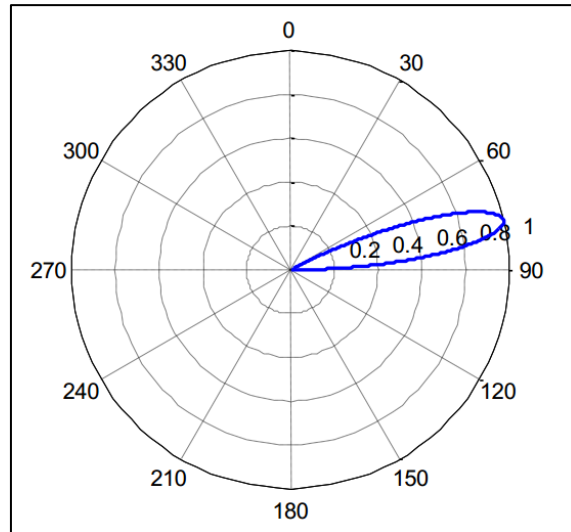


Figura 3-12. Diagrama vertical de radiación de una antena LPDA [5].

3.3.2 Patrón de radiación de VOR

En el caso de una antena de transmisión VOR convencional, el diagrama de radiación es compuesto, y se compone de [26]:

- Componente omni-direccional (no direccional).
- Componente direccional (bidireccional), con forma de ocho.

La suma de estas componentes resulta en un diagrama con forma de cardiode, tal y como se aprecia en la figura. Por esta razón, en las simulaciones con el programa HTZ Communications, se escogerá este diagrama de entre los existentes para reflejar fielmente las características de los equipos instalados.

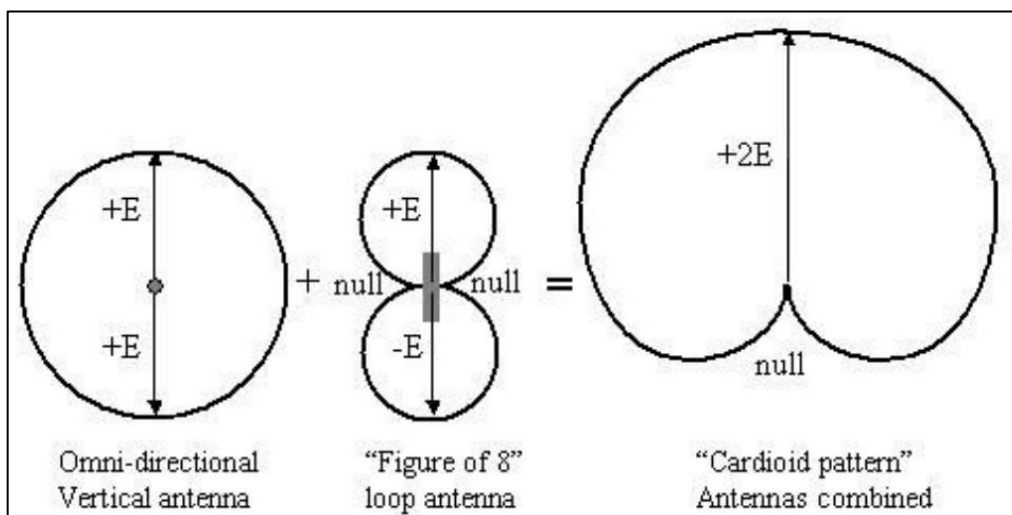


Figura 3-13. Diagrama estándar de radiación de un VOR [26].

3.3.3 Patrón de radiación de antenas FM comerciales

En el caso de las antenas FM comerciales, es lógico que no todas las antenas FM comerciales que se van a considerar en el estudio muestren un patrón de radiación idéntico, pero los diagramas serán parecidos entre sí y la forma general será la misma, debido entre otras razones, a que las utilidades que poseen son parecidas entre unas y otras.

Cabe destacar que algunos aspectos generales de las antenas FM comerciales son los siguientes [28]:

- La zona de cobertura que se abarca es grande, lo que implica el uso de transmisores de alta potencia y el sistema radiante oportuno.
- Se tiende a usar como elementos de radiación distintas antenas agrupadas en *array*.
- La configuración que se pretende conseguir conlleva un diagrama de radiación determinado, generalmente de tipo omnidireccional, ya que en estas comunicaciones no suele haber una dirección preferente.
- En cuanto a infraestructura, suelen dar soporte torres elevadas, propocionando así mejor visibilidad y alcance.

Tras constatar el patrón común omnidireccional de las antenas de FM comerciales, se mostrarán algunos ejemplos de antenas típicas empleadas en radio FM y digital con el objetivo de observar las mínimas diferencias en cuanto a la forma de radiar se refiere. Para ello, se extrae información de las fichas técnicas pertenecientes a la empresa OMB Broadcast [29].

De los cuatro ejemplos que se muestran, tres de ellos presentan diagramas de radiación con mínimas diferencias. En el último ejemplo, sí hay algunas variaciones y en efecto, se observa que el patrón horizontal no es omnidireccional. Sin embargo, la forma del diagrama sigue siendo circular y por tanto, a grandes rasgos, se puede decir que la manera de radiar es similar.

- Antena de polarización circular GP [30]: está diseñada para mantener una potencia continua de 1.5 kW por elemento.



Figura 3-14. Imagen de una antena GP [30].

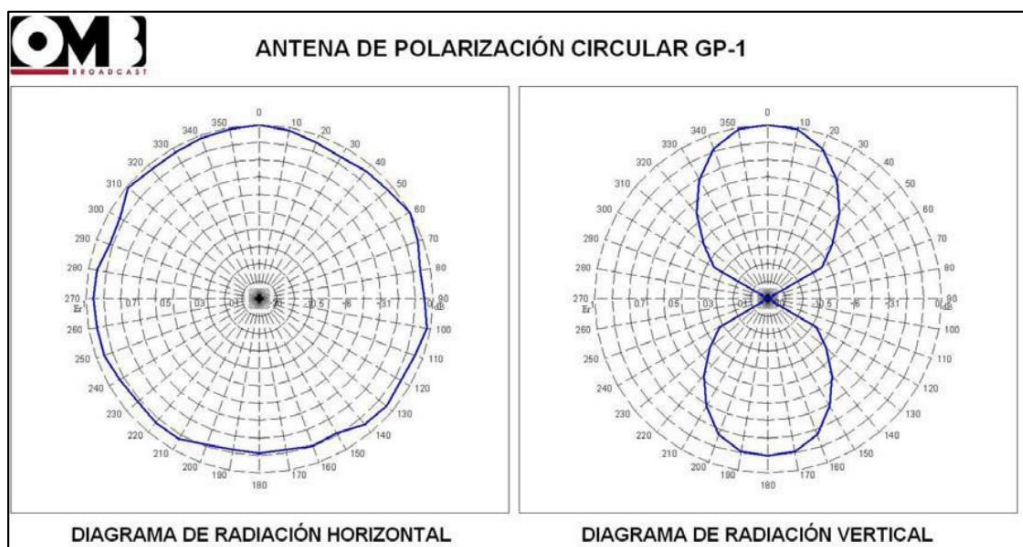


Figura 3-15. Diagramas de radiación de una antena GP [30].

- Antena de polarización circular MP [31]: está diseñada para mantener una potencia continua de 600 W por elemento.



Figura 3-16. Imagen de una antena MP [31].

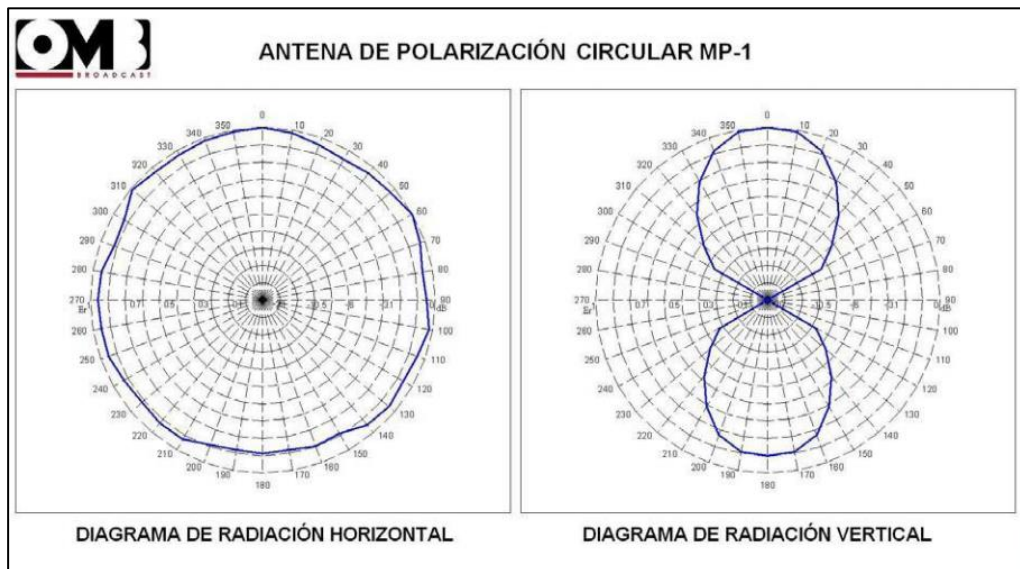


Figura 3-17. Diagramas de radiación de una antena MP [31].

- Antena de polarización circular SGP [32]: está diseñada para mantener una potencia continua de 4 kW por elemento y destaca por su alta eficacia, durabilidad y calidad.



Figura 3-18. Imagen de una antena SGP [32].

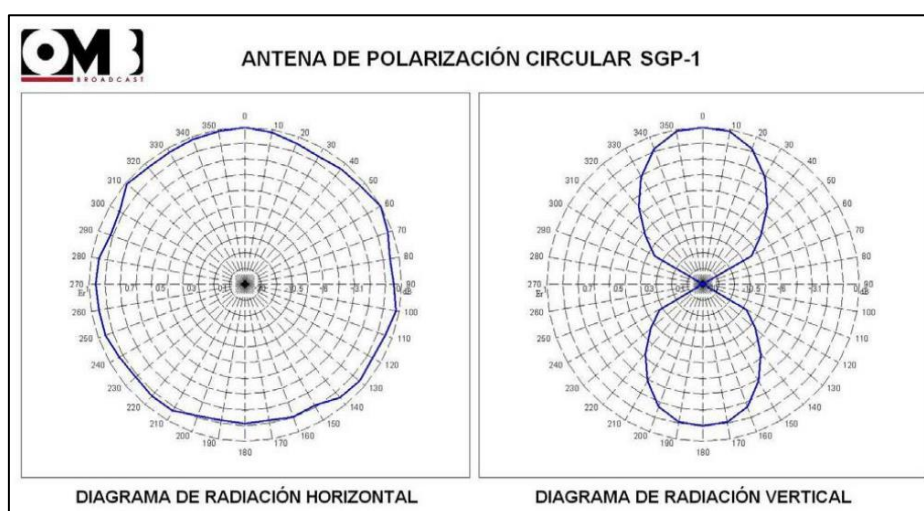


Figura 3-19. Diagramas de radiación de una antena SGP [32].

- Antena de polarización vertical VER LB [33]: es una antena de banda ancha que mantiene una potencia de forma continua de entre 2.5 y 5 kW por cada elemento, destacando por una alta eficacia.



Figura 3-20. Imagen de una antena VER LB [33].

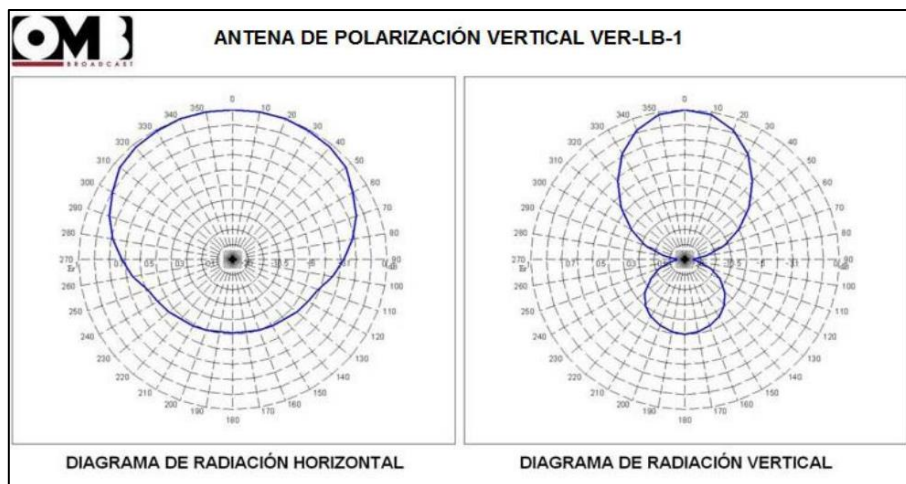


Figura 3-21. Diagramas de radiación de una antena VER LB [33].

3.4 Evaluación de interferencias según Recomendaciones ITU-R

En este apartado se pretende fijar de manera cuantitativa cuáles son los límites para considerar que una señal no deseada degrada en un modo inaceptable la comunicación que se desea recibir. Particularizando la explicación a este caso, consiste en fijar un límite para poder diferenciar entre aquellas señales FM comerciales que degradan de manera inaceptable las comunicaciones a través de ILS y VOR y aquellas que no lo hacen.

Estos límites se dan en forma de umbrales de interferencia máxima. Dichos umbrales pueden ser para corrientes, tensiones u otras variables de los instrumentos receptores. En concreto, la detección de interferencias se lleva a cabo a través de las siguientes variables [4], [5], [23]:

1. Aparición de señales visuales en los receptores de los instrumentos ILS y VOR, que indican falta de operatividad y/o degradación importante en la recepción de la señal deseada. El dispositivo que proporciona este tipo de avisos se denomina bandera.
2. Variaciones importantes en la intensidad de guía del rumbo.
3. Cambios destacables en marcaciones.
4. Variaciones notables en niveles de tensión.

3.4.1 Requisitos de inmunidad a la interferencia de los sistemas receptores

De manera previa a concretar los umbrales específicos de interferencia que están establecidos en el campo de la radionavegación aeronáutica, es conveniente tener en cuenta que los receptores ya en fase de diseño tienen en cuenta las interferencias a través de multitud de requisitos que permiten cumplir la normativa aeronáutica [23]. Atendiendo a la literatura, es conveniente reseñar en mayor medida dos aspectos en cuanto al diseño de los receptores ILS y VOR [22]:

- Por un lado, los sistemas receptores VOR e ILS son construidos de tal forma que mantendrán su sensibilidad (no verán degradaciones importantes de la señal deseada) ante señales VHF (no deseadas) con los siguientes parámetros:
 - Señales no deseadas de entre 88 y 102 MHz: el nivel máximo a la entrada del receptor para que no haya desensibilización del mismo será de +15 dBm.
 - Señales no deseadas de 104 MHz: el nivel máximo a la entrada del receptor para que no haya desensibilización del receptor será de +10 dBm.
 - Señales no deseadas de 106 MHz: el nivel máximo a la entrada del receptor para que no haya desensibilización del receptor será de +5 dBm.
 - Señales no deseadas de 107,9 MHz: el nivel máximo a la entrada del receptor para que no haya desensibilización del receptor será de -10 dBm.
- Por otro lado, la intermodulación se posiciona como fenómeno problemático que hay que tener en cuenta, de manera que se fija un requisito. El criterio de diseño determina que el receptor debe proporcionar inmunidad frente a la intermodulación de tercer orden causada por dos señales FM en VHF cuando los niveles de las señales cumplan lo siguiente:

- A. Si las señales no deseadas FM se encuentran entre los 107,7 y los 108,0 MHz, se debe cumplir que

$$2 \cdot N_1 + N_2 + 72 \leq 0, \quad (3.4-1)$$

siendo N_1 y N_2 los niveles (dBm) de las dos señales de radiodifusión sonora FM en VHF a la entrada del receptor.

- B. Si las señales no deseadas FM se encuentran por debajo de los 107,7 MHz, se debe cumplir que

$$2N_1 + N_2 + 3 \cdot (24 - 20 \cdot \log_{0.4} \frac{\Delta f}{0.4}) \leq 0, \quad (3.4-2)$$

siendo N_1 y N_2 los niveles (dBm) de las dos señales de radiodifusión sonora FM en VHF a la entrada del receptor. Por su parte, N_1 es el nivel de la señal más cercana a los 108,1 MHz, y $\Delta f = 108,1 - f_1$.

3.4.2 Umbrales específicos de interferencia en radionavegación aeronáutica

Los umbrales que determinan el límite para considerar preocupante las señales no deseadas se fijan y revisan bajo unos estrictos ensayos en vuelo, así como experimentaciones con mediciones en los laboratorios. Toda esta información se analiza para fijar un contexto que permita pasar del ámbito cualitativo (“señal que degrada demasiado”, “señal preocupante”) al ámbito de lo cuantitativo (valores concretos de corrientes, tensiones, marcaciones) [4], [22], [23].

En el caso del localizador ILS (valores normalizados descritos para una señal deseada con diferencia de índices de modulación de 0,093 [24]), el límite puede ser una de las dos opciones siguientes, la que aparezca primero [4], [5]:

- Aparición de bandera.
- Variación de intensidad de $7,5 \mu\text{A}$ en guía del rumbo.

En el caso del VOR, la detección se puede detectar mediante variaciones en tres variables en vez de dos. La que se dé primero es la que marcará el punto en el que la degradación es insostenible [4], [5]:

- Aparición durante al menos 1 segundo de bandera, es decir, no es suficiente con una aparición momentánea como sí se concreta para el receptor del ILS LOC.
- Variación de intensidad de $7,5 \mu\text{A}$ en guía del rumbo, que se verá reflejada en el receptor VOR con una marcación que cambia de repente $0,5^\circ$.
- Subida en la tensión de audio de al menos 2 dB. Es decir, un cambio en dicha tensión desde 1 a 3 dB ya es suficiente como criterio de umbral de interferencia.

4 RESULTADOS

En este capítulo, el objetivo es realizar simulaciones, a través de HTZ Communications, de los sistemas de radionavegación ILS y VOR del aeropuerto de San Pablo, en Sevilla. En concreto, la pretensión es analizar si las emisiones FM comerciales pueden causar interferencias en los sistemas de radionavegación y realizar simulaciones valorando distintas casuísticas para así poder obtener conclusiones.

En principio, se van a detallar datos, fundamentalmente técnicos, sobre el aeropuerto de interés del trabajo, situado en Sevilla. Tras ello, se mostrarán los resultados de simulaciones de los sistemas ILS y VOR, donde se podrán observar distintos parámetros. A partir de ahí, se concretan las estaciones FM que entrarán en el estudio de interferencias y finalmente, se mostrará el análisis de interferencias.

4.1 Aeropuerto de San Pablo, Sevilla: SVQ

El Aeropuerto de Sevilla-San Pablo o Aeropuerto de Sevilla (IATA: **SVQ**, ICAO: **LEZL**) opera en la región de Andalucía Occidental, siendo el sexto aeropuerto más concurrido de España, ubicado al sur del país. En concreto, se ubica a 10 kilómetros (6 millas) al este del centro de la ciudad de Sevilla, y a 110 kilómetros (68 millas) al noreste de la Costa de la Luz [58].

Las coordenadas del aeropuerto son: 37° 25' 05"N, 5° 53' 56"O [59].



Figura 4-1. Fotografía de una de las entradas a la terminal del aeropuerto de Sevilla [64].

4.1.1 Tráfico del aeropuerto de San Pablo, Sevilla

El tráfico del aeropuerto es principalmente de índole nacional, alcanzando el 71% de su tráfico. Mayoritariamente, el perfil de pasajero que viaja a Sevilla lo hace por vacaciones, alcanzando el 52% del total, seguido por el pasajero de negocios con un 23%; el tráfico restante se reparte entre visitantes: familiares, amigos y varios indeterminados [59].

En 2019, el aeropuerto movió 7.544.357 pasajeros, realizando 64.112 operaciones y transportando 9.891 toneladas de carga; lo que le sitúa el 4º por volumen de carga de España y el 10º por volumen de pasajeros [59].

Si se hace referencia a la predominancia de los viajes por lugares se pueden citar los siguientes [63]:

- Los principales destinos nacionales son Barcelona – el Prat, seguido de Palma de Mallorca y Madrid-Barajas.
- En cuanto a tráfico internacional, el crecimiento en los últimos años había sido notable, debido a las conexiones con Francia, Italia y Reino Unido, fundamentalmente.

Con el tráfico en línea ascendente, el aumento de aeronaves circulando en el aeropuerto va incrementándose y, por tanto, el número de señales entre emisores y receptores funcionando a la vez es cada vez mayor. Por ello, es necesario tener bajo control la posibilidad de interferencias en cualquier momento para evitar que las comunicaciones presenten fallos inesperados.

4.1.2 Terminales en el aeropuerto de San Pablo, Sevilla

El aeropuerto de Sevilla dispone de las siguientes terminales [63], [59]:

- Una única terminal de pasajeros, integrada por dos plantas, que engloba los vuelos nacionales, los vuelos internacionales, y los servicios necesarios y complementarios para los usuarios.
- Una terminal de carga.
- Adicionalmente, dentro del recinto del aeropuerto, se hallan las instalaciones de la factoría *EADS-CASA* y *Airbus Military*.

4.1.3 Pistas en el aeropuerto de San Pablo, Sevilla

El aeropuerto de Sevilla dispone actualmente de una sola pista con [59]:

- Orientación (a ambos lados de la pista) 09/27.
- 3362 x 45 metros de longitud (11023x148 pies).
- Elevación de 34 metros sobre el nivel del mar.
- Dotación de instrumental de precisión ILS/DME CAT I para aproximaciones con mala visibilidad y de un sistema PAPI 3º para aproximaciones visuales.



Figura 4-2. Fotografía de satélite del aeropuerto de Sevilla [61].

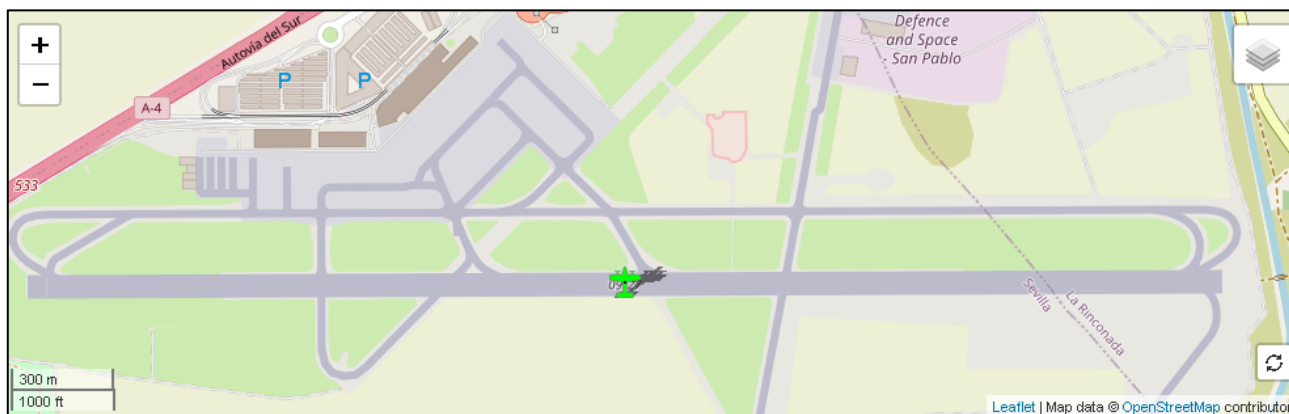


Figura 4-3. Fotografía del mapa del aeropuerto de Sevilla [61].

Por un lado, se muestran fotografías de satélites correspondientes a la pista con orientación 9 del aeropuerto, primero de manera más general y después más ampliada.



Figura 4-4. Fotografía de la pista con orientación 9 [61].



Figura 4-5. Fotografía más ampliada de la pista con orientación 9 [61].

Por otro lado, también se extraen de [61] imágenes de satélite correspondiente a la parte de la pista con orientación 27.



Figura 4-6. Fotografía de la pista con orientación 27 [61].



Figura 4-7. Fotografía más ampliada de la pista con orientación 27 [61].

Por último, se muestran las cartas aeronáuticas correspondientes a las inmediaciones del aeropuerto, tanto para vuelo visual como para vuelo instrumental, extraídas de las cartas ofrecidas por Skyvector a partir de [65].

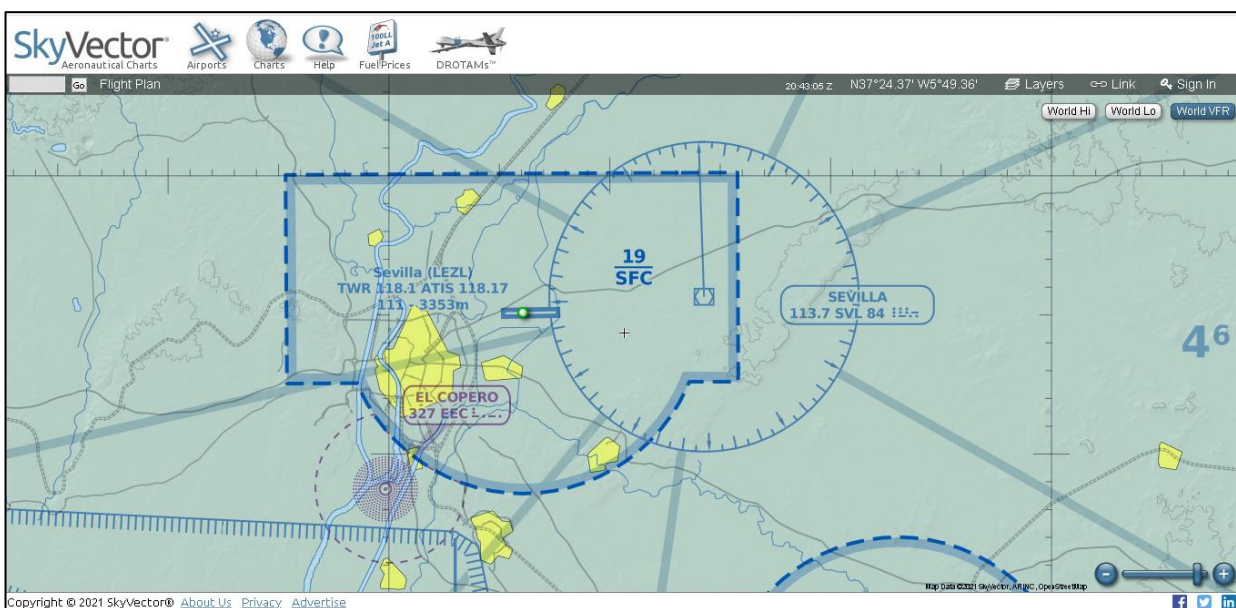


Figura 4-8. Carta aeronáutica en las inmediaciones de SVQ para vuelo visual [65].

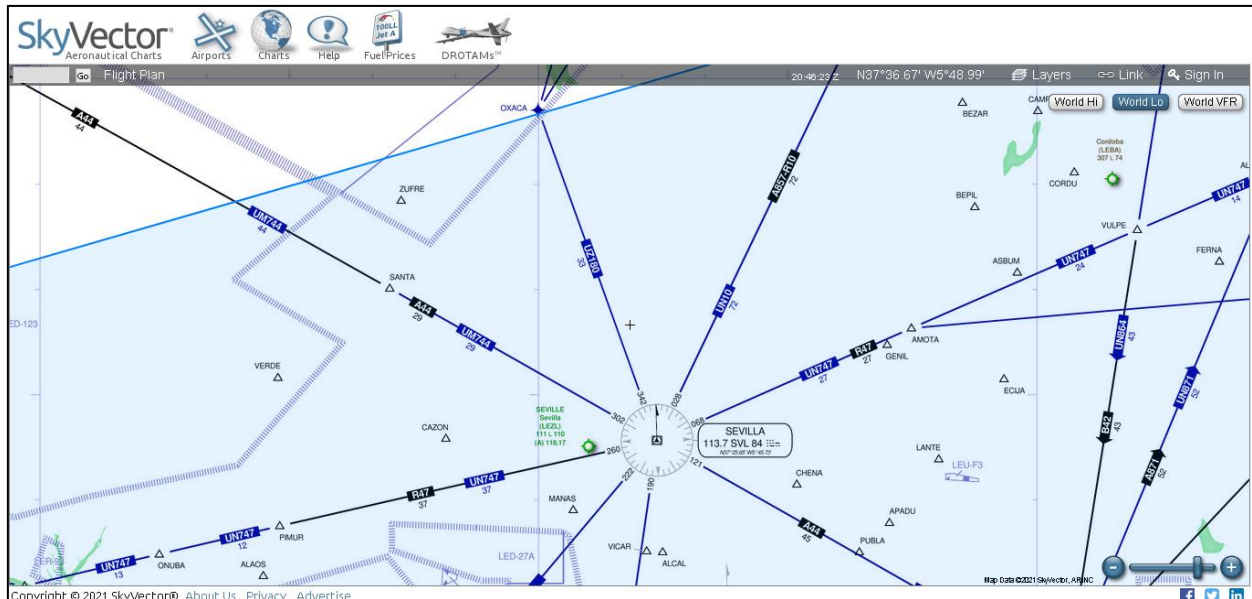


Figura 4-9. Carta aeronáutica en las inmediaciones de SVQ para vuelo instrumental [65].

Antes de comenzar con las simulaciones, se cargan los mapas correspondientes a la ciudad de Sevilla, proporcionados por el programa cuya licencia pertenece a la Universidad de Sevilla. El aspecto que muestra la pantalla principal del programa tras la creación del proyecto es el siguiente.

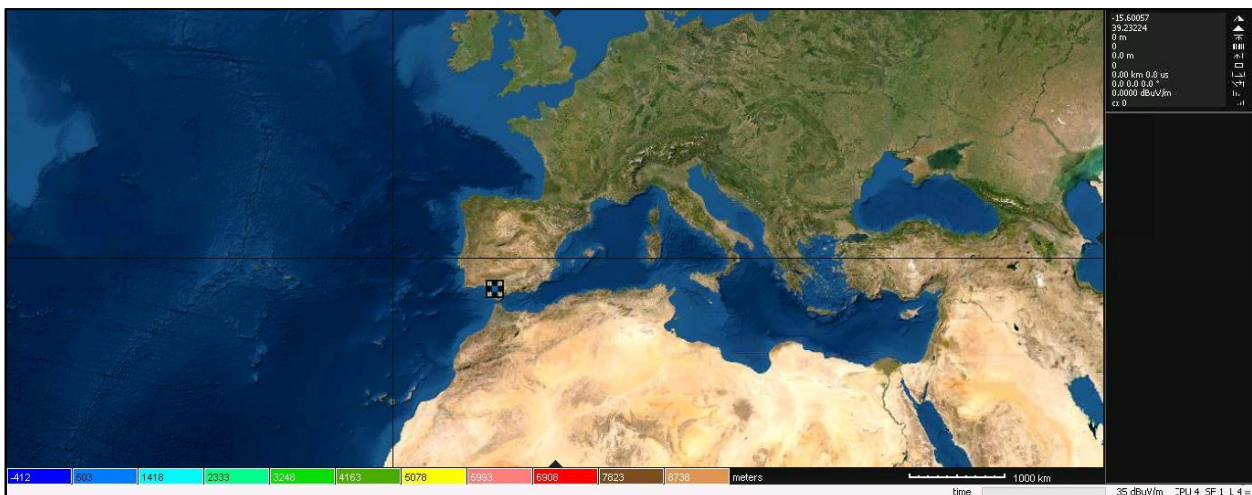


Figura 4-10. Creación del proyecto en HTZ Communications.

4.2 Simulación del sistema ILS en SVQ

Las primeras simulaciones con el programa se van a realizar tras colocar, en las correspondientes capas del proyecto creado, los sistemas de radionavegación en su emplazamiento real. En este primer caso, se colocan los localizadores del ILS acorde a las correspondientes coordenadas de los sistemas. Se colocan en el centro del *array* de antenas.

En cuanto a localizadores, hay dos transmisores [67] puesto que la pista se encuentra habilitada para que sea posible el aterrizaje con orientación 90° y con orientación 270° respecto al Norte Geográfico.

4.2.1 Simulación de localizadores ILS en SVQ

- Respecto a la pista con orientación 09, el ILS LOC se añade al programa y se muestra con una marcación de forma cuadrada y verde. En las opciones, se ajustan los valores de potencias, ganancias, alturas, frecuencias y resto de parámetros oportunos para que las características se ajusten a lo explicado en el análisis teórico. También se añaden los parámetros de radiación, buscando de entre las opciones posibles en el programa la que más se ajuste a lo comentado: en este caso, se ha buscado una directividad destacada y se ha ajustado en la dirección de la pista.

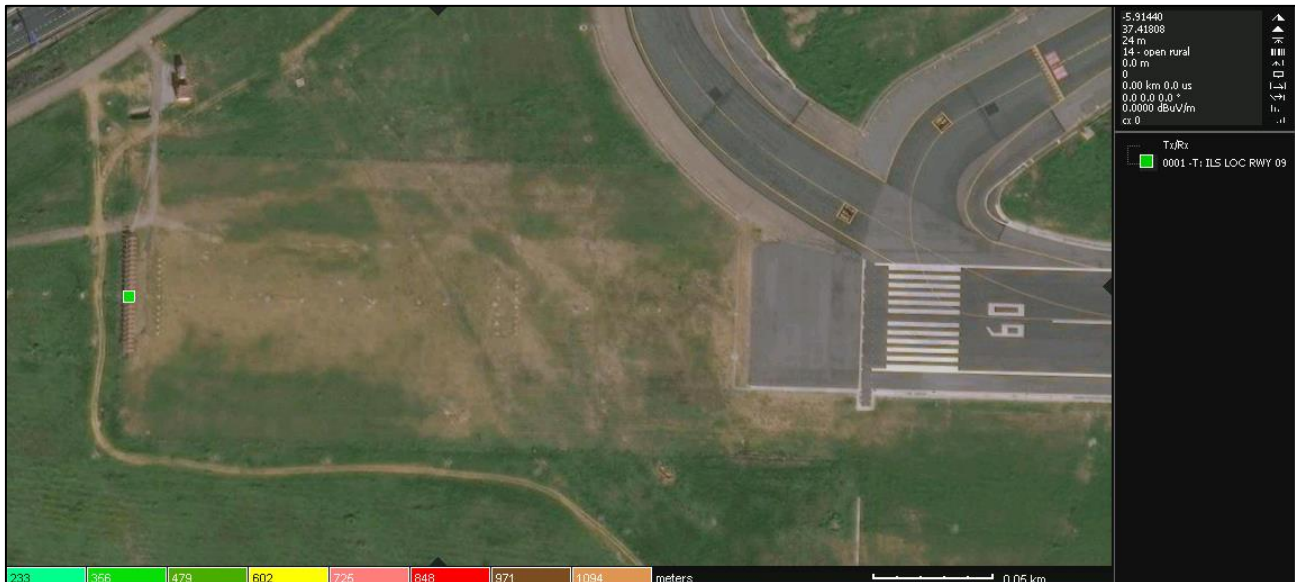


Figura 4-11. Localizador de ILS de la pista 09 marcado en HTZ Communications.

Tx/Rx parameters: 1 RWY 09 LOC

General Patterns Channels Site Advanced

Type	Signal	Status	Frequency plan
Tx/Rx A (0)	ILS (17)	Unknown (0)	# 1

activated

Tx/Rx

Nominal power (W)

Dynamic (dB)

Tx ant gain (dBi)

Rx ant gain (dBi)

Losses (dB) tx rx

Tx add losses (dB)

E.I.R.P (W)

Frequency (MHz)

Antenna height (m)

Tx bandwidth (kHz)

Rx bandwidth (kHz)

Coverage

Delete info

OOB or Spurious (dBW/MHz)

Variable power
 Fixed power
 Fixed frequency
 Freq Hop / WB

Variable elevation
 Fixed elevation

Info

Callsign Parenting

Address Date (yyyymmdd)

Info (1) Type ID

Info (2) Link

Network ID Group

User Call number

Date: start / end /

Figura 4-12. Parámetros generales del localizador de ILS de la pista 09 en HTZ Communications.

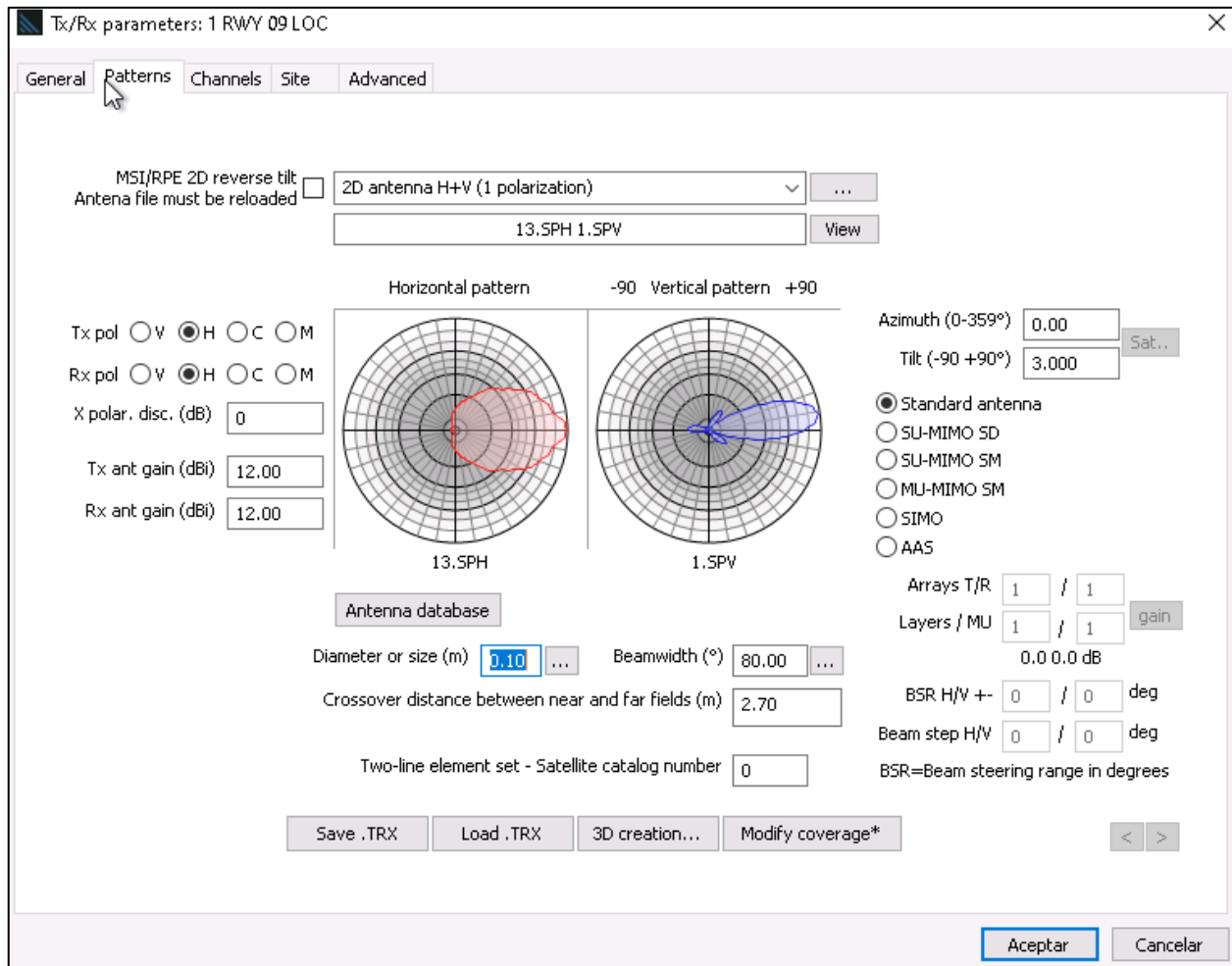


Figura 4-13. Parámetros de radiación del localizador de ILS de la pista 09 en HTZ Communications.

Se procede a la configuración de la simulación, escogiendo como umbral mínimo para la recepción oportuna de la señal -86 dBm [5] y un radio de simulación de 8 km, que supone un valor suficiente para analizar el área de interés. El modelo de propagación que se elige es el modelo aeronáutico P.528-3, explicado teóricamente.

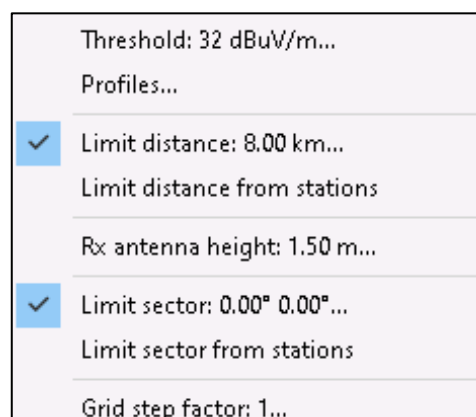


Figura 4-14. Parámetros para el cálculo de cobertura del ILS LOC.

Los resultados de cobertura del localizador del ILS de la pista con orientación 09 se muestran a continuación, reflejando una cobertura mayor en la zona de la pista. En todo el aeropuerto, marcado en color, se supera el umbral mínimo establecido. El resto de colores se corresponden con un determinado nivel de señal que se

recibe en cada uno de los píxeles de la capa. Para una mayor aclaración, cabe recordar que colores azules muestran recepciones débiles de señal, verdes intermedias, y colores marrones y amarillos reflejan niveles de señal potentes en la recepción.

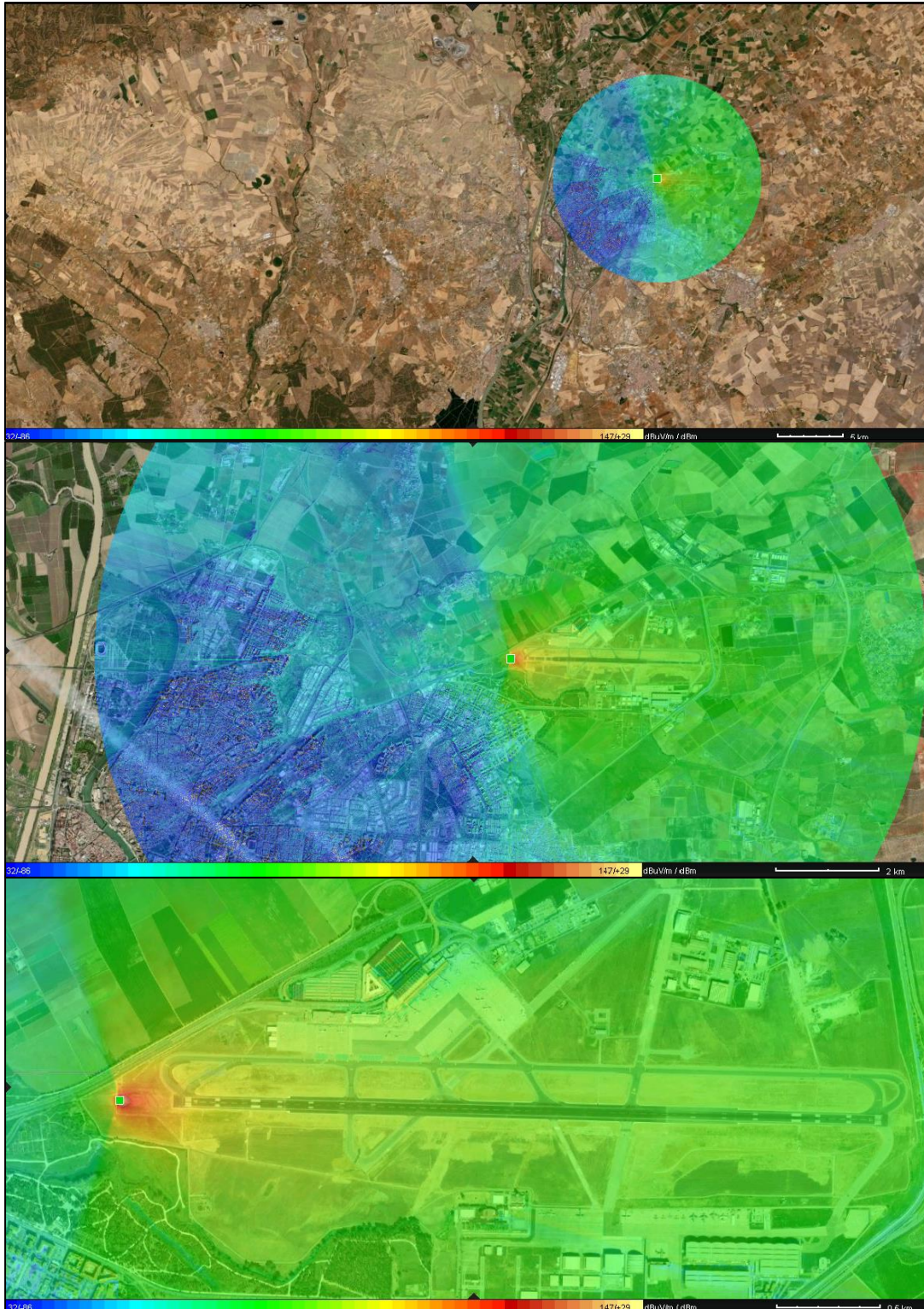


Figura 4-15. Representaciones generales, en HTZ Communications, de la cobertura del localizador del ILS de la pista 09.

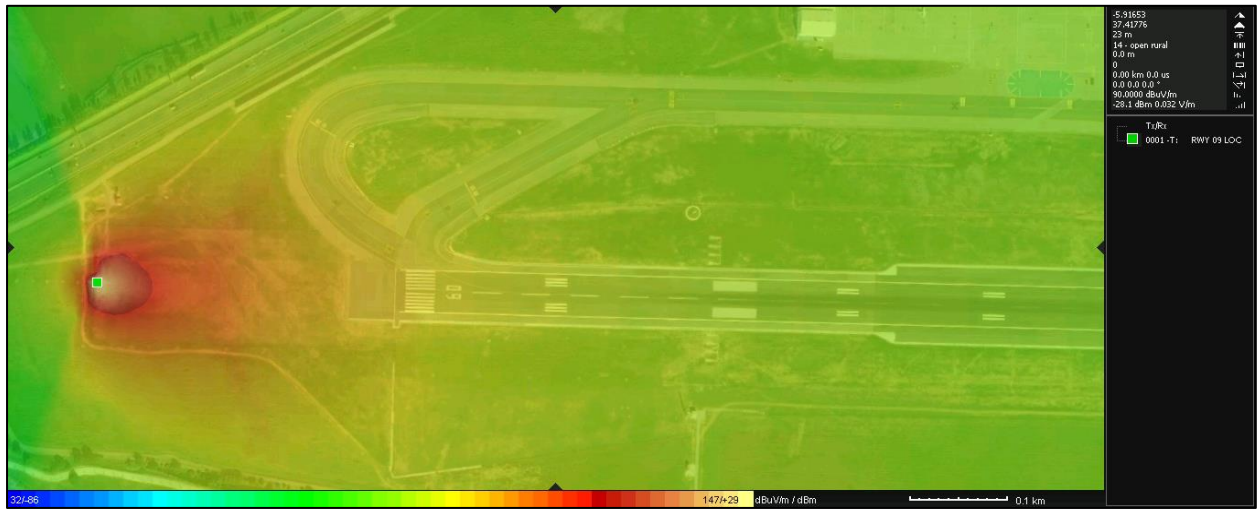


Figura 4-16. Representación más ampliada, en HTZ Communications, de la cobertura del localizador de la pista 09.

- Respecto a la pista con orientación 27, la configuración es similar con la diferencia de que la frecuencia de emisión no es la misma y tampoco lo es el diagrama de radiación, que varía en el ángulo del lóbulo en el patrón horizontal.

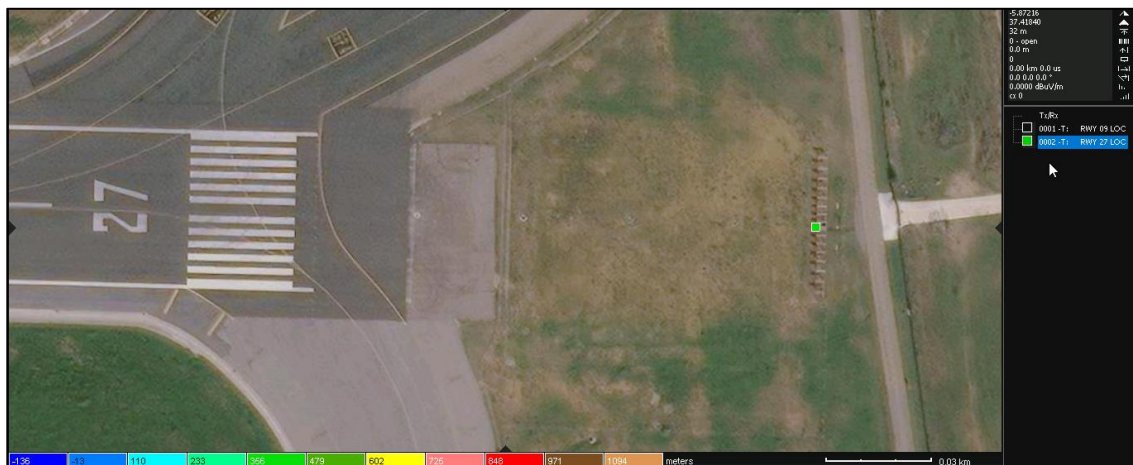


Figura 4-17. Localizador de ILS de la pista 27 marcado en HTZ Communications.

La configuración de la simulación y el modelo de propagación para el cálculo de cobertura son idénticos a los anteriores puesto que se pretende analizar también un localizador. Se observa, en los resultados de la simulación, un patrón similar y simétrico respecto de la anterior simulación. Los mayores niveles de señal se producen en la dirección de la pista, mientras que en dirección contraria la recepción decae abruptamente, acorde a lo establecido en los parámetros de radiación.

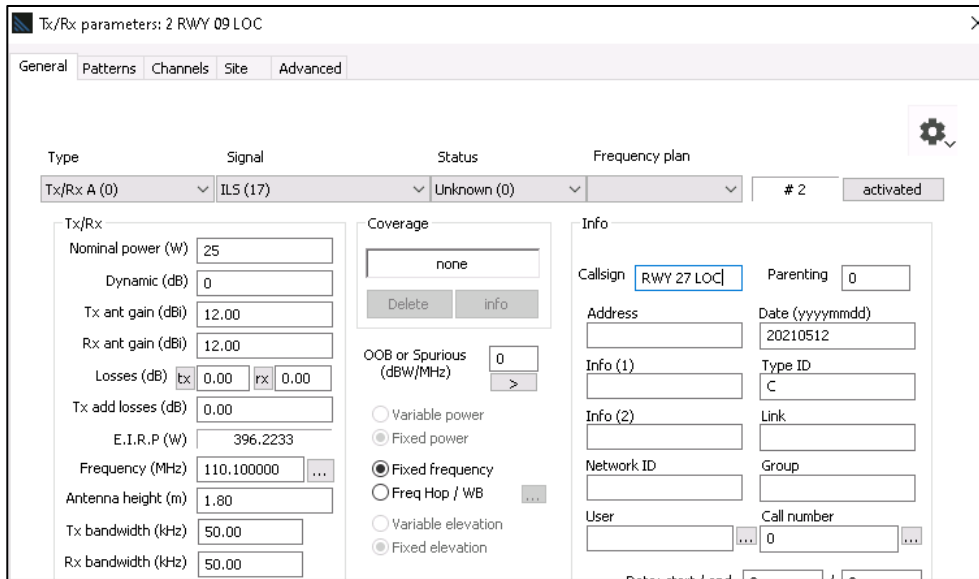


Figura 4-18. Parámetros generales del localizador de ILS de la pista 27 en HTZ Communications.

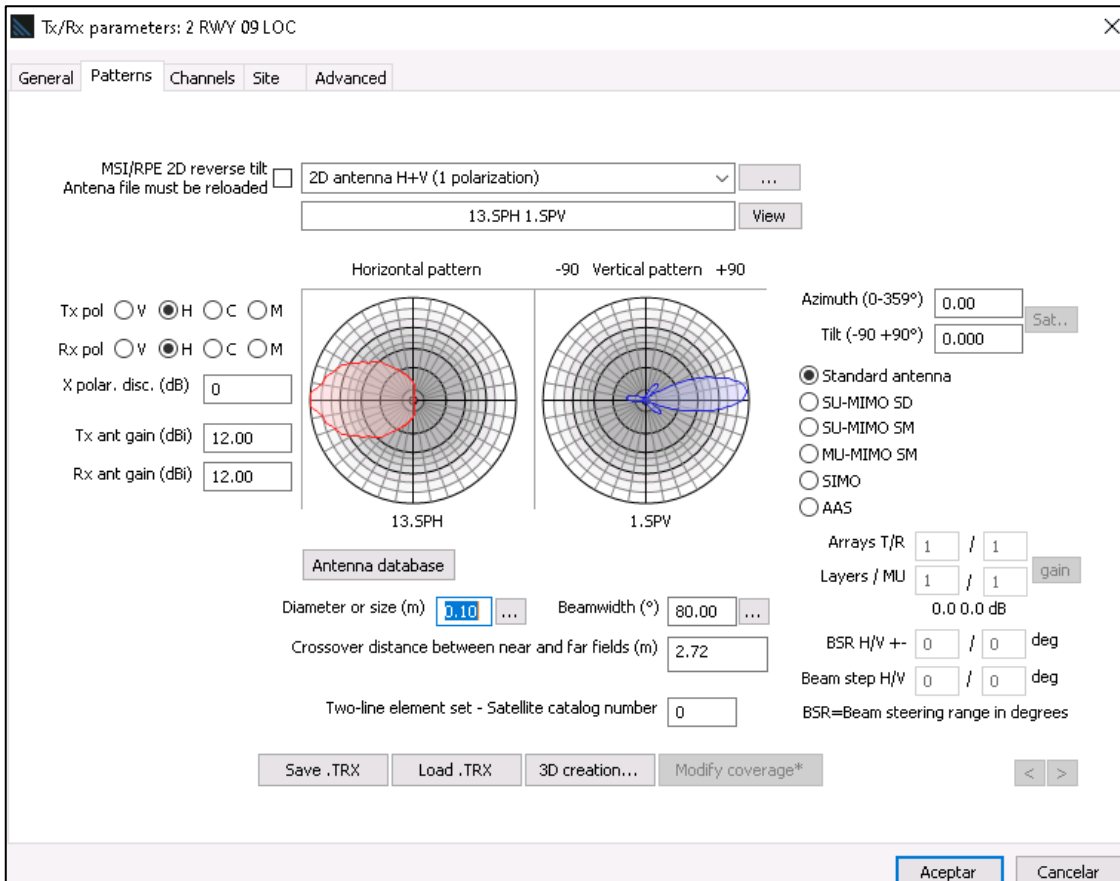


Figura 4-19. Parámetros de radiación del localizador de ILS de la pista 09 en HTZ Communications.



Figura 4-20. Representación general, en HTZ Communications, de la cobertura del localizador del ILS de la pista 27.

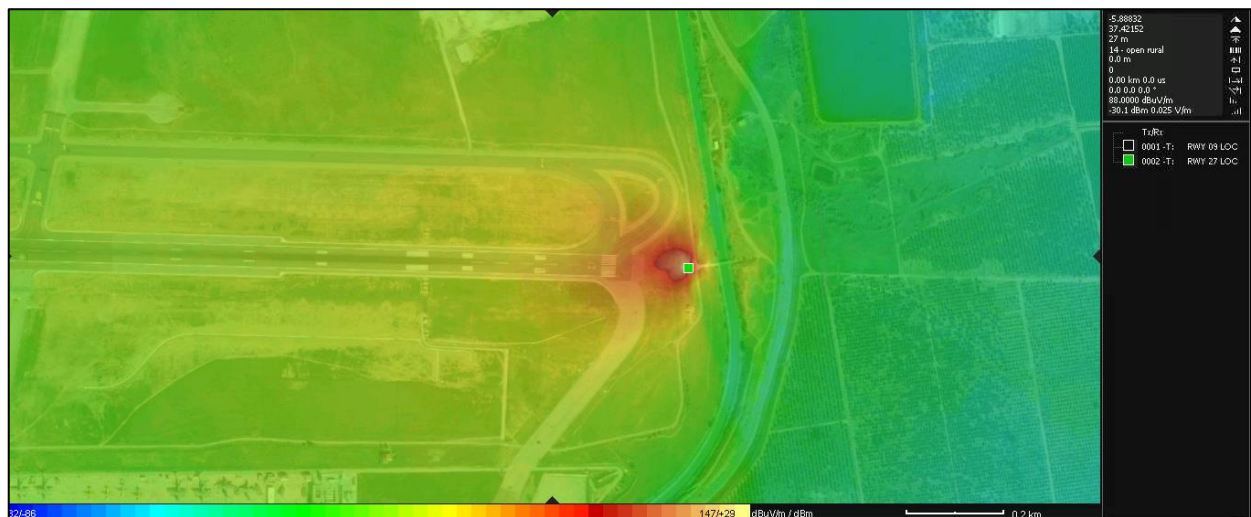


Figura 4-21. Representación más ampliada, en HTZ Communications, de la cobertura del localizador de la pista 27.

4.2.2 Simulación de *Glide Paths* en SVQ

Respecto a las sendas de planeo del aeropuerto de Sevilla, se pueden observar dos, correspondientes a las dos posibles orientaciones (09 y 27) de la pista existente.

Hay que destacar, por un lado, que las frecuencias de estos sistemas van emparejadas con sus respectivos ILS, acorde al Anexo 10 [68], [69], [67]. De esta manera, el GP de la pista 09 emite en 331,7 MHz (asociado a los 111,10 MHz del localizador del ILS 09) y el GP de la pista 27 emite en 334,4 MHz (asociado a los 110,10 MHz del localizador del ILS 27).

Otros datos que cabe destacar son las alturas de las antenas, que en este caso, atendiendo al análisis teórico ya realizado, se fijan en 6 metros como aproximación realista.

Además, es importante tener en cuenta que el funcionamiento de estos transmisores es similar al de los localizadores del ILS, con la diferencia de que plano horizontal y vertical intercambian sus funcionamientos, lo que afecta al diagrama de radiación. En cualquier caso, para los patrones se han ajustado los lóbulos ya escogidos para los localizadores, variando, fundamentalmente, ángulos de directividad máxima.



Figura 4-22. Senda de planeo de ILS de la pista 09 marcada en HTZ Communications.

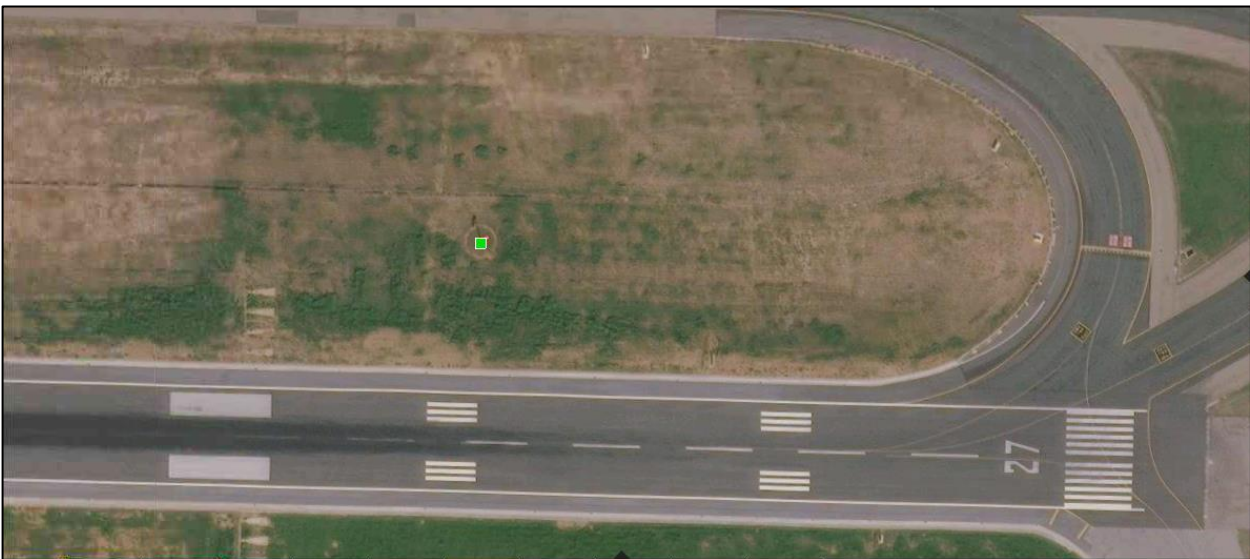


Figura 4-23. Senda de planeo de ILS de la pista 27 marcada en HTZ Communications.

Se muestra, a continuación, captura de la configuración de uno de los dos GP para recordar los parámetros clave en este sistema. Tras ello, se colocan representaciones de los parámetros de radiación, tanto para el caso del plano horizontal como del vertical, y para ambos *Glide Paths*, tanto el de la pista con orientación 09 como el de la pista 27.

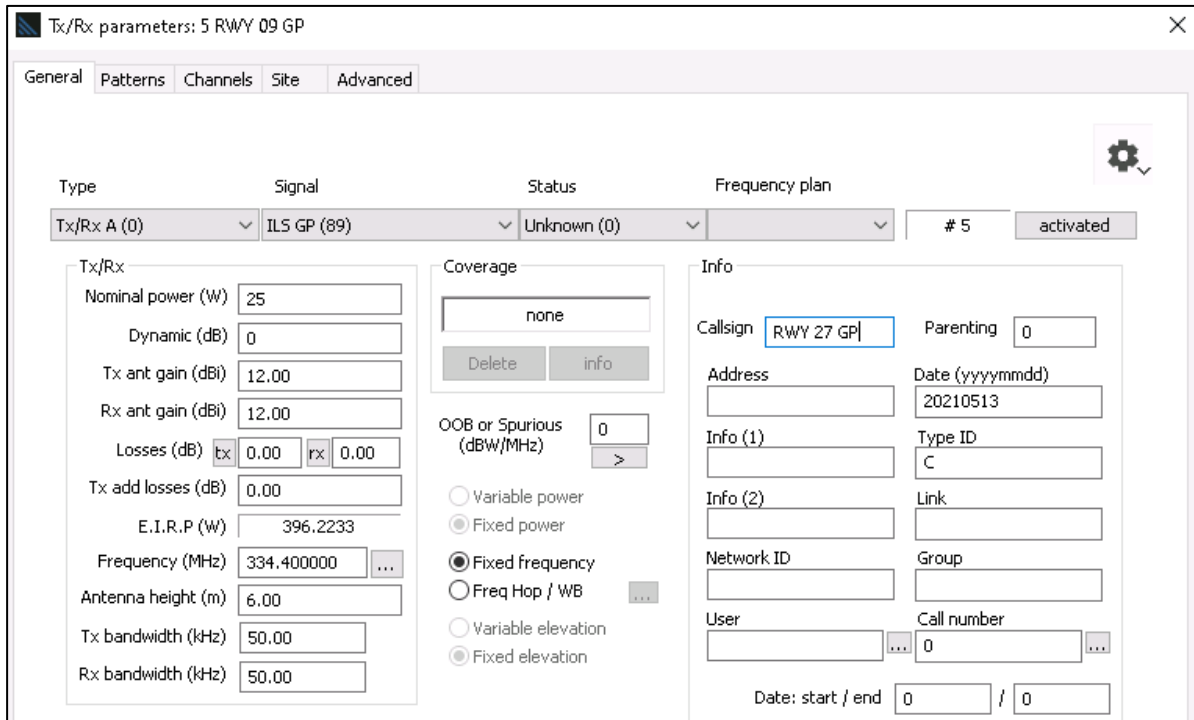


Figura 4-24. Parámetros generales del GP de ILS de la pista 09 en HTZ Communications.

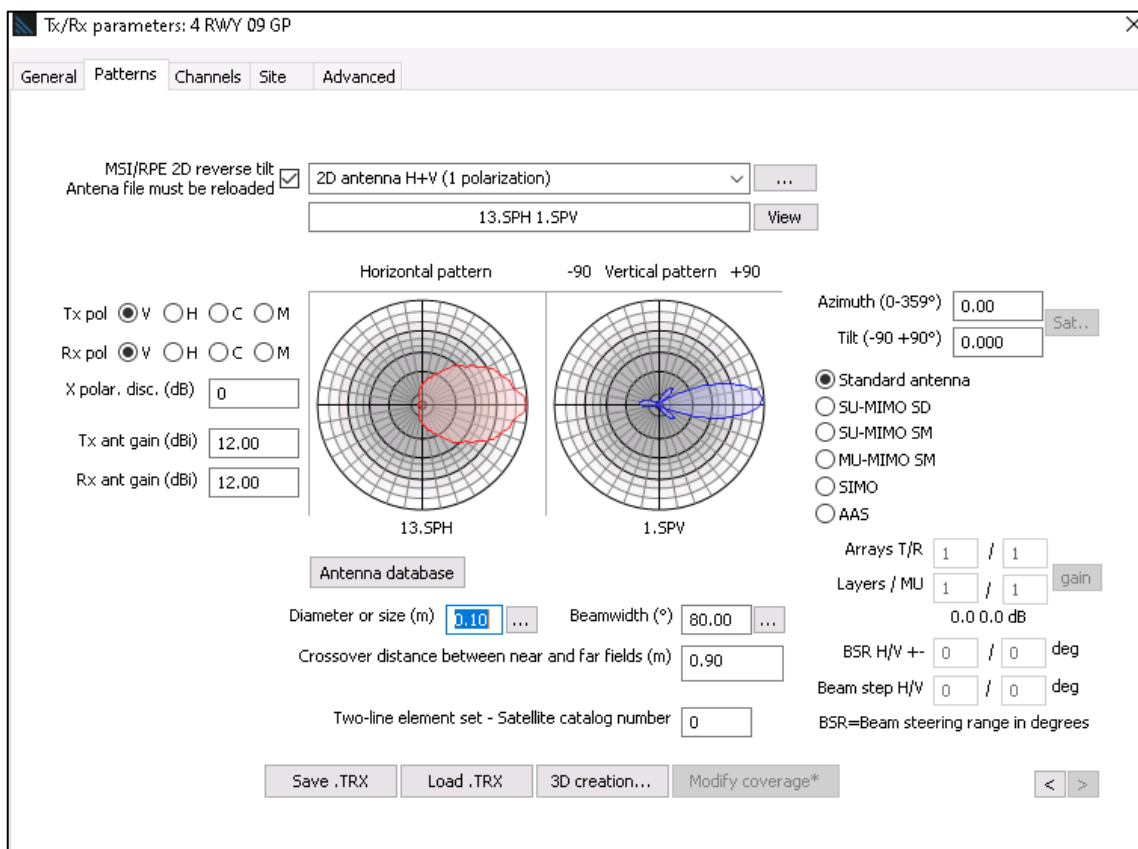


Figura 4-25. Parámetros de radiación del GP de ILS de la pista 09 en HTZ Communications.

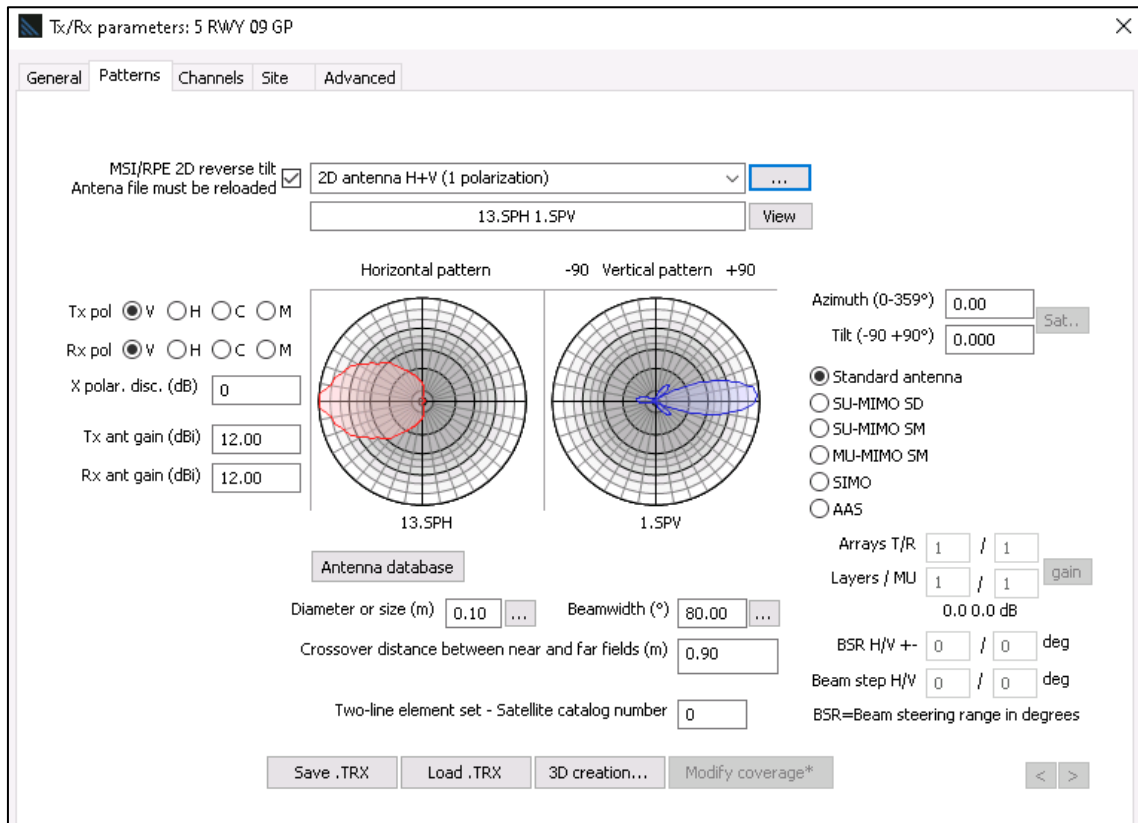


Figura 4-26. Parámetros de radiación del GP de ILS de la pista 27 en HTZ Communications.

Finalmente, se presentan los resultados de simulaciones de cobertura. En primer lugar, se realiza simulación del GP de la pista 09 para un radio de 8 km y para una altura de antena receptor de 1,5 metros, es decir, como si se tratara de un avión con su receptor ILS que se encuentra en tierra, habiendo ya aterrizado. Se simula este caso ya que se trata del caso más desfavorable, al influir de manera más notable la presencia de obstáculos como la terminal aeroportuaria y el suelo, además de las irregularidades que pueda tener el terreno.

En cualquier caso, tras esta simulación, se realiza una simulación para el caso en el que el receptor se encuentre a 150 ft, observándose coberturas mayores, tal y como cabe esperar.

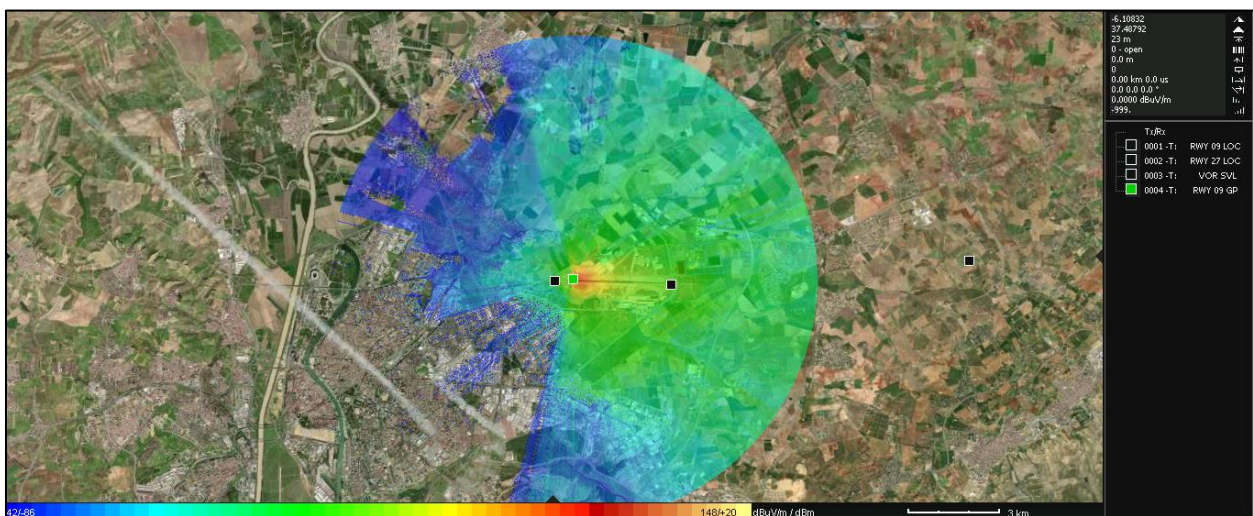


Figura 4-27. Representación general, en HTZ Communications, de la cobertura del GP del ILS de la pista 09. Antenas receptoras a 1,5 metros de altura.

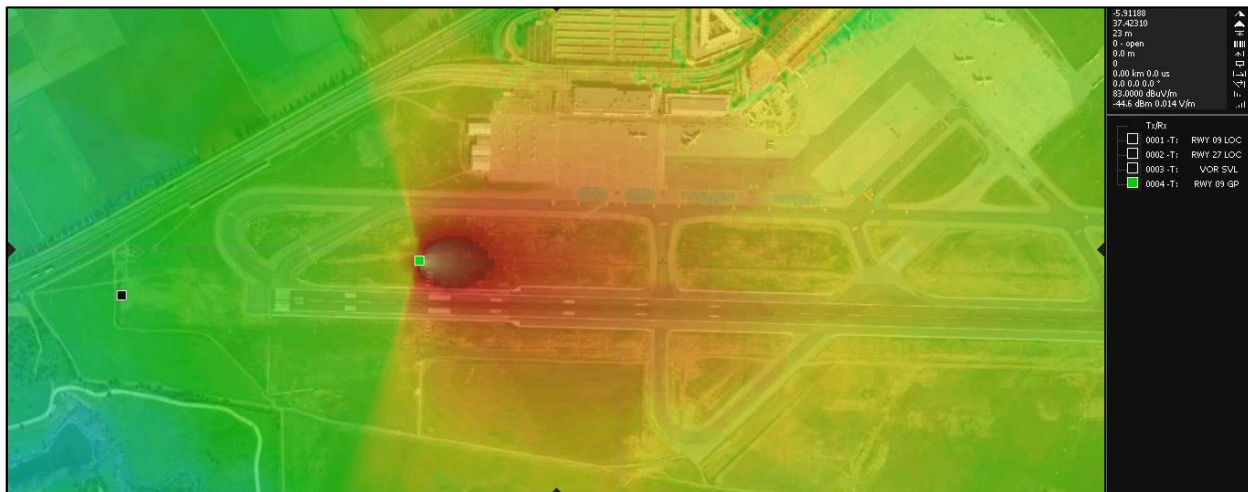


Figura 4-28. Representación ampliada, en HTZ Communications, de la cobertura del GP del ILS de la pista 09. Antenas receptoras a 1,5 metros de altura.

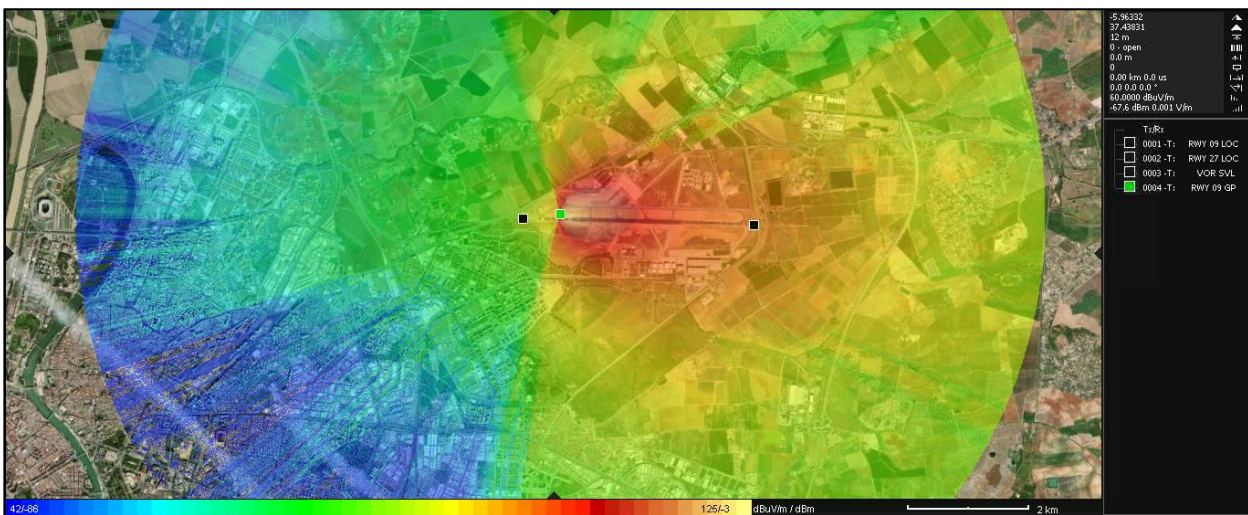


Figura 4-29. Representación general, en HTZ Communications, de la cobertura del GP del ILS de la pista 09. Antenas receptoras a 150 ft.

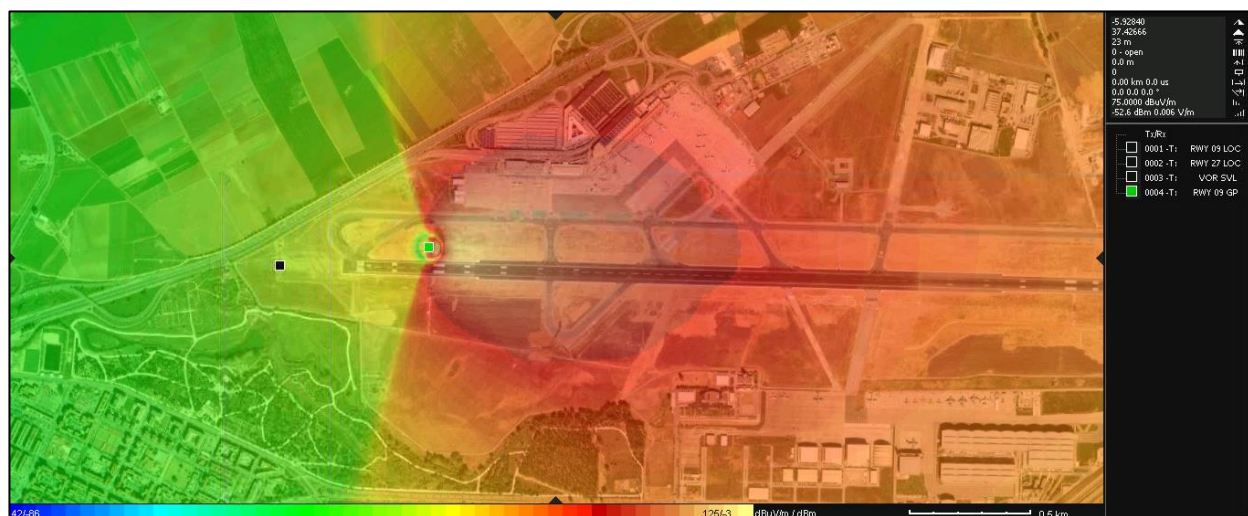


Figura 4-30. Representación ampliada, en HTZ Communications, de la cobertura del GP del ILS de la pista 09. Antenas receptoras a 150 ft.

Por último, se simula la cobertura del GP de la pista 27, en este caso con altura de recepción de 1,5 metros.

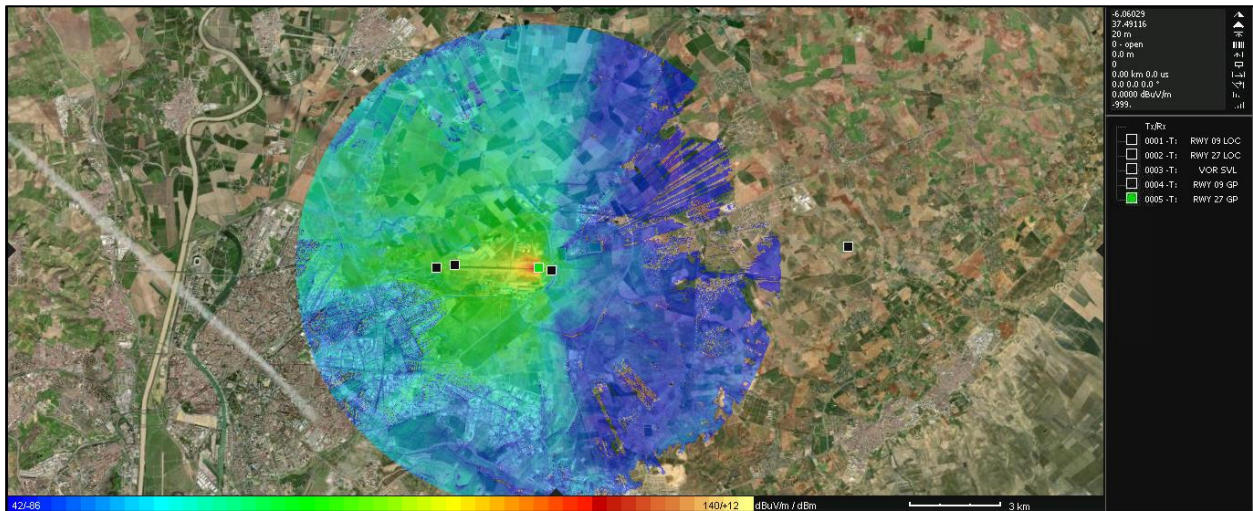


Figura 4-31. Representación general, en HTZ Communications, de la cobertura del GP del ILS de la pista 27. Antenas receptoras a 1,5 metros de altura.

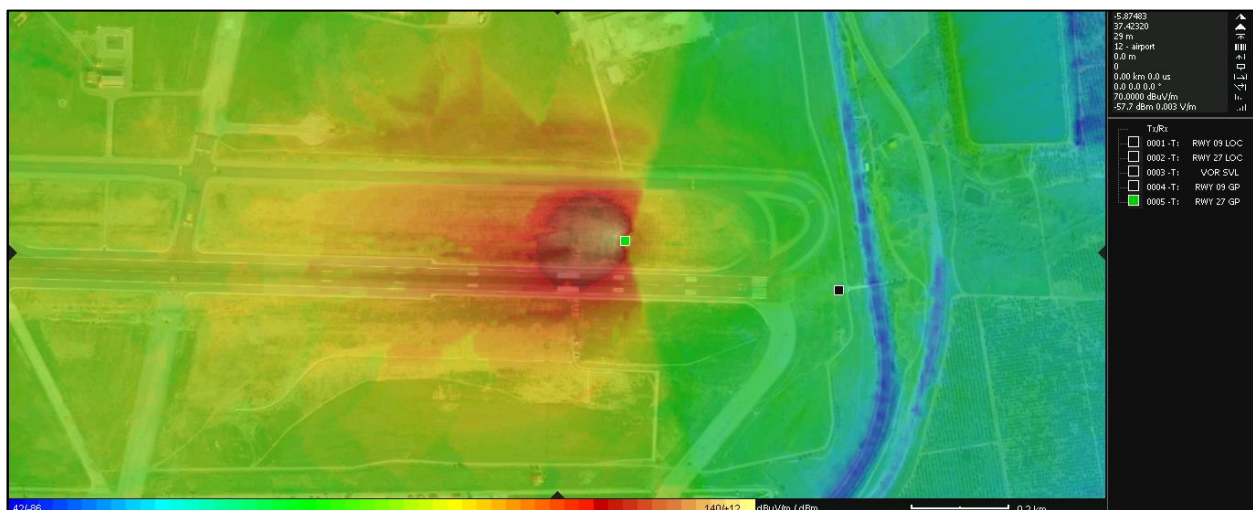


Figura 4-32. Representación ampliada, en HTZ Communications, de la cobertura del GP del ILS de la pista 27. Antenas receptoras a 1,5 metros de altura.

4.3 Simulación del sistema VOR en SVQ

El VOR objeto de análisis no se encuentra exactamente en el aeropuerto de Sevilla, sino que se encuentra a unos kilómetros del aeropuerto.

Las coordenadas de este son las siguientes [61]: latitud de 37, 427898° y longitud de -5, 762210°.

A continuación, se muestran tres imágenes del sistema VOR SVL, instalado junto a un DME. En las imágenes aparece el sistema de transmisión desde diferentes distancias: en primer lugar, se aprecia la distancia que existe entre VOR y aeropuerto; en segunda instancia, se puede observar una imagen general del sistema; y finalmente, una imagen más ampliada en la que se aprecian las antenas.



Figura 4-33. Fotografía en la que se aprecia la distancia entre el aeropuerto SVQ (azul) y la correspondiente estación VOR-DME (etiquetada) [61].



Figura 4-34. Fotografía de satélite de la zona donde está situado el VOR correspondiente a SVQ. [61].



Figura 4-35. Fotografía en la que se aprecia de manera ampliada la situación del VOR de SVQ [66].

Tras especificar el emplazamiento, se procede a su implementación en el programa, de tal forma que una vez situado aparece tal y como consta en las figuras anteriores, pero ya en las propias capas del programa. La configuración del transmisor responde a las siguientes características mostradas en las siguientes figuras.

Respecto a la configuración de los patrones de radiación, se realiza una revisión del análisis teórico del capítulo 3, conjugado con las referencias bibliográficas [1], [3], [4] y [5]. De esta forma, se escoge un patrón omnidireccional en el caso horizontal (existe como tal de entre las opciones en HTZ Communications) y se ajusta y reforma un patrón de los existentes para el plano vertical. En este último caso, se ha ido modificando cada punto del diagrama manualmente para que la forma sea la de un cardioide, tal y como se explicó.

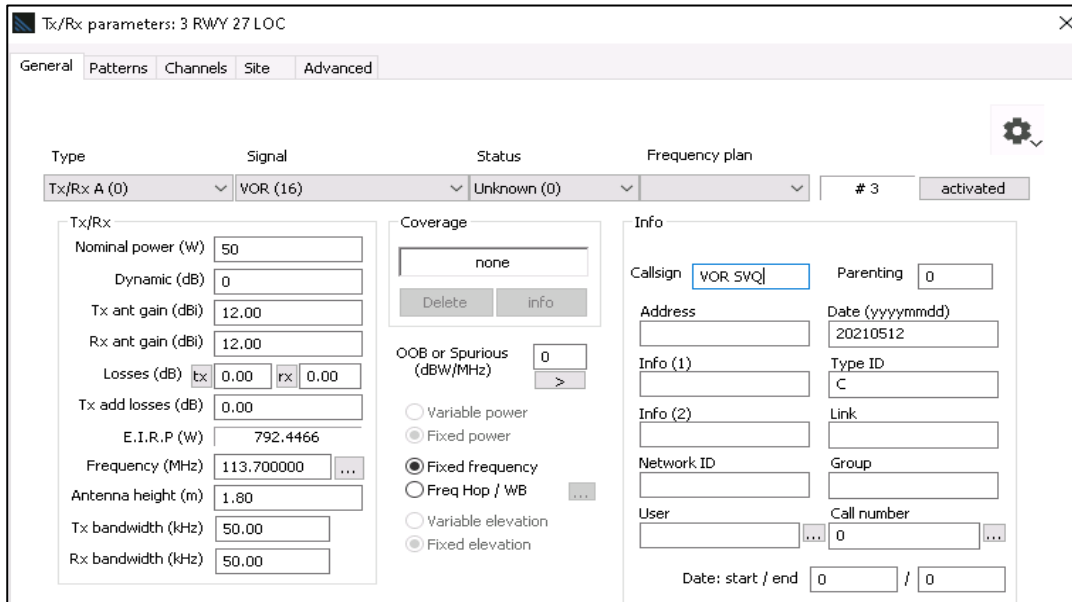


Figura 4-36. Parámetros generales del VOR de Sevilla en HTZ Communications.

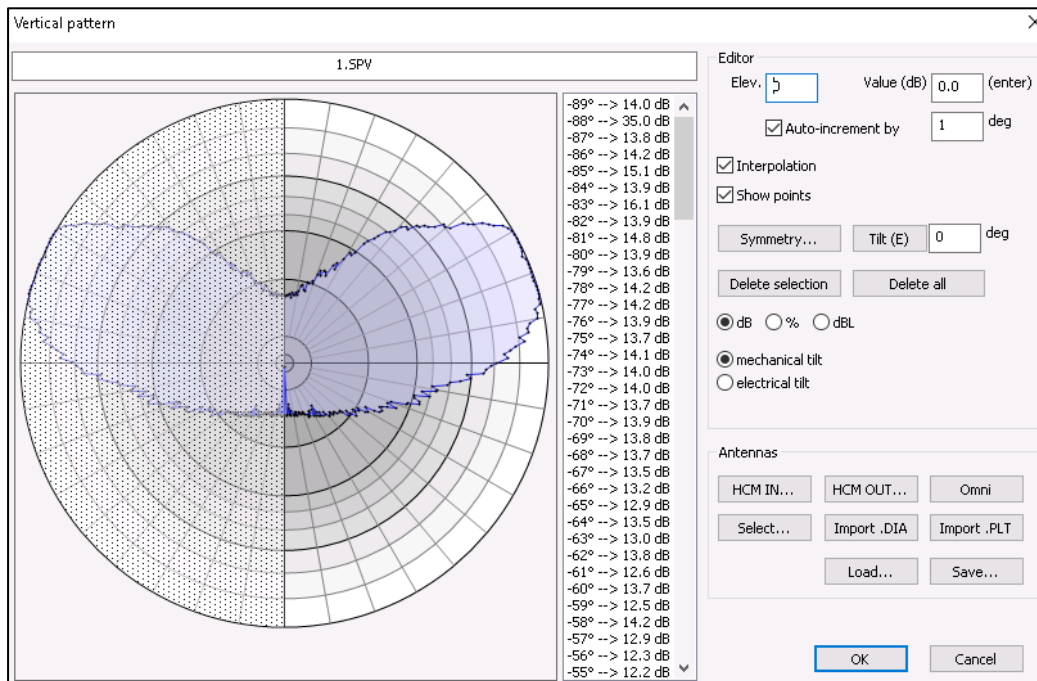


Figura 4-37. Diagrama de radiación vertical del VOR de Sevilla en HTZ Communications.

De igual forma que en el caso del ILS, se muestra a continuación el análisis de cobertura de dicha estación VOR. En dicha simulación, se ha especificado un radio de cálculo de 20 km, mayor que para el caso del ILS ya que la distancia entre las inmediaciones de la pista y el sistema transmisor es también considerable, por lo que el propio contexto de la comunicación marca el alcance de la simulación. Por su parte, el umbral mínimo de radiación se establece en -79 dBm, acorde con [5].

Cabe destacar que en la primera de las representaciones de cobertura, la visión es muy general, y se aprecian con símbolos cuadrados negros la localización de los ILS (desactivados) y con cuadrado verde la del VOR (activo en el momento de la simulación).

	Threshold: 39 dBuV/m...
	Profiles...
<input checked="" type="checkbox"/>	Limit distance: 20.00 km...
	Limit distance from stations
	Rx antenna height: 1.50 m...
<input checked="" type="checkbox"/>	Limit sector: 0.00° 0.00°...
	Limit sector from stations
	Grid step factor: 1...

Figura 4-38. Parámetros para el cálculo de cobertura del VOR.

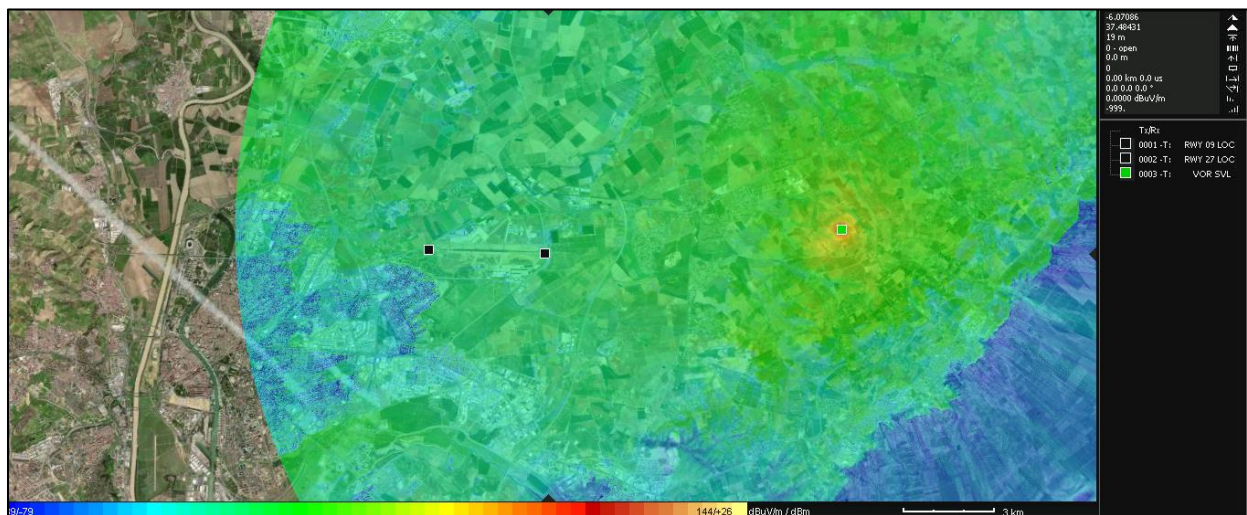


Figura 4-39. Representación general, en HTZ Communications, de la cobertura del VOR de SVL.



Figura 4-40. Segunda representación, en HTZ Communications, de la cobertura del VOR de SVL.

Se puede apreciar, ya con este nivel de zoom, que el nivel de señal recibida sobre el aeropuerto y la terminal es suficiente, siendo mayor en las inmediaciones del transmisor VOR.

Además, se puede realizar una comparación entre los niveles de señal recibida por parte de los sistemas ILS y los niveles recibidos del VOR. Se observan unos niveles de recepción sensiblemente mayores en el caso del ILS respecto de los obtenidos para el caso del VOR. En cualquier caso, no se trata de diferencias de gran importancia, pero sí reseñables.



Figura 4-41. Representación más ampliada, en HTZ Communications, de la cobertura del VOR de SVL.

4.4 Cuantificación de las señales recibidas ILS y VOR

Finalmente, se muestran los valores de señal que se reciben en las zonas de interés en el aeropuerto. Es decir, se trata de cuantificar de manera concreta si los niveles de señal recibida de ILS y VOR superan el umbral mínimo fijado de manera teórica y también en la configuración de programa. El caso de análisis es aquel en el que se fijan las antenas receptoras a 1,5 metros sobre el suelo.

- ILS LOC de la pista con orientación 09: los valores de la señal recibida oscilan, a lo largo de todos los puntos de la pista, entre -38.1 dBm y -12.1 dBm, superando ampliamente los -86 dBm establecidos de manera estándar como umbral mínimo para una recepción aceptable del LOC.
- ILS LOC de la pista con orientación 27: los valores de la señal recibida oscilan, a lo largo de todos los puntos de la pista, entre -37.1 dBm y -2.1 dBm, superando ampliamente los -86 dBm establecidos de manera estándar como umbral mínimo para una recepción aceptable del LOC.
- ILS GP de la pista con orientación 09: los valores de la señal recibida oscilan, a lo largo de los puntos de la pista, entre -45.6 dBm (lado contrario al aterrizaje no usado) y -5.6 dBm, superando ampliamente los -86 dBm establecidos de manera estándar como umbral mínimo para una recepción aceptable del GP.
- ILS GP de la pista con orientación 27: los valores de la señal recibida oscilan, a lo largo de los puntos de la pista, entre -43.7 dBm y -4.7 dBm, superando ampliamente los -86 dBm establecidos de manera estándar como umbral mínimo para una recepción aceptable del GP.
- VOR SVL: los valores de la señal recibida se encuentran oscilando, a lo largo de todos los puntos de la pista, entre -49.3 dBm (lado oeste) y -47.3 dBm (lado este), superando ampliamente los -79 dBm establecidos de manera estándar como umbral mínimo para una recepción aceptable del LOC.

Se observan dos grandes diferencias respecto a la recepción de las señales:

- Por un lado, la variabilidad de la recepción de los sistemas ILS es alta, mientras que para la recepción de la señal VOR la diferencia de dBm entre extremos de la pista es insignificante. En cualquier caso, no es preocupante, sino normal. El sistema ILS es un sistema usado para una escala menor, con un objetivo más directivo: captar la aeronave en la maniobra de aterrizaje y guiar su recorrido, por lo que las zonas de la correspondiente pista por las que no va a aterrizar el avión presentan menor importancia. En cualquier caso, la señal es más que suficiente para cualquier punto escogido.
- Por otro lado, los niveles de señal recibidos por ILS son, y con especial diferencia en los puntos más favorables, mayores a los recibidos del VOR, obteniendo un resultado lógico en consonancia con el contexto de que la precisión requerida para la maniobra para el aterrizaje debe ser muy alta.

4.5 Concreción de las estaciones FM evaluadas

Para el análisis de las posibles interferencias causadas por las estaciones FM comerciales en los sistemas de radionavegación como el ILS y el VOR, es importante seleccionar una muestra representativa y oportuna de estaciones FM. Para la elección, se han tenido en cuenta varios factores:

- Cercanía de las estaciones FM respecto del VOR e ILS del aeropuerto de Sevilla. Es decir, se han seleccionado estaciones que se encuentren en un radio amplio, pero relativamente cercano.
- Número de estaciones asignadas: se pretende escoger un número de estaciones suficiente para que el análisis sea realista (si se tienen en cuenta del orden de 5 estaciones pueden quedar fuera muchas estaciones que, aunque no estén tan cerca, puedan emitir con una potencia más alta). Sin embargo, si se aumenta el número en exceso el análisis pasa a no ser práctico: el trabajo resulta demasiado engorroso con excesivos datos que a priori no van a aportar información novedosa.
- Coherencia de los datos: es necesario que una muestra disponga de una representación de los distintos tipos de estaciones (estaciones con distintos órdenes de magnitud en potencia y en ganancia). De hecho, aunque el número de estaciones sea oportuno, para obtener conclusiones más completas es necesario incluir en el estudio estaciones con datos variopintos.
- Disponibilidad de información: otro requisito para escoger las estaciones FM es disponer de datos ordenados, en lista, que sean de fuentes oficiales.

En relación con estos factores, se han seleccionado la siguiente muestra de estaciones FM comerciales:

- Tipo de estaciones: todas aquellas listadas como estaciones FM de gestión indirecta por personas físicas o jurídicas, ya que son las que aparecen detalladas en [56].
- Ubicación de las estaciones: todas las estaciones de la citada lista anterior que posean como zona de servicio localidades de la provincia de Sevilla.
- Número de estaciones: 30.

Es oportuno realizar una aclaración sobre las unidades de longitud y latitud que aparecen en la lista siguiente:

Si la longitud que aparece es 005W4245, el dato se refiere a $-5, 4245^\circ$.

Los datos que aparecen en la Tabla 4-1 se extraen de [56], con excepción de las potencias y las ganancias.

Los datos de potencias y ganancias se calculan realizando suposiciones coherentes en base a la literatura, a partir del dato inicial de [56] donde aparece la potencia radiada aparente máxima (p.r.a).

Se sabe que $p.r.a [dBm] = potencia [dBm] + ganancia [dBd]$.

Sabiendo esta relación, se puede destinar un porcentaje de esta p.r.a. (que es el dato que se muestra de las estaciones) a la potencia y otro porcentaje de la ganancia. De esta manera, se destinan porcentajes de tal forma que los valores de potencias y ganancias sean de un orden de magnitud adecuado, y se cumpla con la p.r.a. que se proporciona como dato.

Además, es necesario tener en cuenta el correcto dimensionamiento de las fórmulas ($0 dBd = 2,15 dBi$) para que haya coherencia y que finalmente la muestra sea lo más fiel a la realidad, entendiendo correctamente las suposiciones realizadas en base a los datos proporcionados.

Finalmente, se muestra la tabla donde aparecen todos los datos numéricos que será necesario introducir en las simulaciones del programa HTZ Communications [56]. La lista se encuentra ordenada alfabéticamente en base al nombre de la localidad para la que presta servicio cada estación FM.

Tabla 4-1. Datos de las estaciones FM escogidas [56].

Número de estación asignado	Localidad	Frecuencia (MHz)	Longitud	Latitud	Cota (m)	Altura efectiva máxima de la antena (m)	Potencia (W)	Ganancia (dBi)
1	ALANIS	98.000	005W4245	38N0252	706	261.0	4512,000	22,596
2	ALCALA GUADAIRA	106.500	005W4900	37N2100	100	75.0	11109,000	24,704
3	ALMADEN PLATA	90.900	006W0500	37N5200	570	37.0	4512,000	22,596
4	ARAHAL	99.000	005W3050	37N1435	100	60.0	3902,000	22,257
5	CARMONA	89.200	005W3757	37N2832	261	199.0	7970,000	23,927
6	CONSTANTINA	105.700	005W3700	37N5200	521	70.0	7970,000	23,927
7	DOS HERMANAS	96.500	005W5531	37N1942	70	109.0	11109,000	24,704
8	ECIJA	95.400	005W0248	37N3250	167	42.0	11109,000	24,704
9	ECIJA	100.100	005W0300	37N3300	150	75.0	11109,000	24,704
10	ECIJA	106.500	005W0300	37N3300	150	37.0	11109,000	24,704
11	ESTEPA	98.300	004W5158	37N1630	843	569.0	2875,000	21,543
12	LEBRIJA	102.900	006W0500	36N5500	63	75.0	11109,000	24,704
13	LORA RIO	101.000	005W3250	37N4030	100	119.0	7079,000	23,650
14	MORON	96.100	005W2629	37N0721	293	191.0	11109,000	24,704
15	MORON	100.000	005W2629	37N0721	218	190.0	11109,000	24,704
16	OSUNA	97.700	005W0537	37N1004	578	299.0	4512,000	22,596
17	PILAS	105.500	006W1945	37N1930	100	119.0	4512,000	22,596
18	SANLUCAR MAYOR	98.400	006W1100	37N2300	150	100.0	4512,000	22,596
19	SAUCEJO	92.500	004W5800	37N0600	480	150.0	2487,000	21,204
20	SEVILLA	94.800	006W0345	37N2344	104	187.0	77864,000	29,257
21	SEVILLA	95.900	006W0351	37N2358	140	178.0	77864,000	29,257
22	SEVILLA	97.100	006W0405	37N2400	108	152.0	77864,000	29,257
23	SEVILLA	99.600	006W0335	37N2329	102	100.0	7079,000	23,650
24	SEVILLA	100.300	006W0311	37N2439	100	150.0	77864,000	29,257
25	SEVILLA	101.500	006W0345	37N2344	104	187.0	63177,000	28,768
26	SEVILLA	102.500	006W0345	37N2344	104	189.0	77864,000	29,257
27	SEVILLA	103.200	006W0346	37N2407	107	97.0	61752,000	28,715
28	SEVILLA	106.900	006W0334	37N2420	106	157.0	49621,000	28,204
29	UTRERA	93.000	005W4438	37N1122	75	57.0	11109,000	24,704
30	UTRERA	98.100	005W4500	37N1100	75	75.0	11109,000	24,704

A la hora de simular las estaciones FM escogidas en el programa, surge la limitación dada por los límites geográficos del mapa del que se ha podido disponer, de tal forma que se han descartado las estaciones cuya longitud y/o latitud no corresponden con ninguna de las que integra el mapa. En concreto, las limitaciones han surgido por el límite de $-5, 76^\circ$ de longitud y $37, 42^\circ$ de latitud que presenta el mapa. Las estaciones restantes son 12 y, para una mayor aclaración, se marcan en la tabla con sombreado azul.

A continuación, se muestra una captura del programa donde aparecen ya todos los equipos que se van a simular situados en sus respectivas ubicaciones. Aparecen enmarcados en rectángulos negros los equipos correspondientes a las señales deseadas, es decir VOR y ILS, de tal forma que el resto representan las ubicaciones de las emisoras FM.

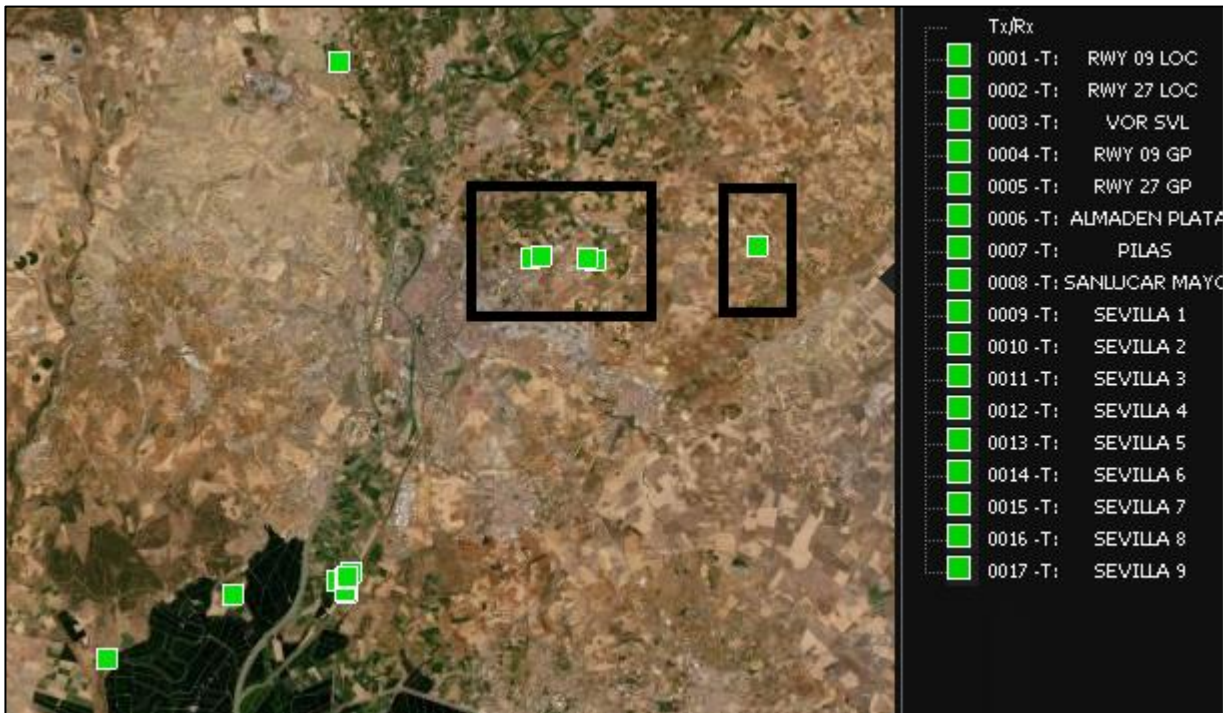


Figura 4-42. Visualización de todos los transmisores simulados en el proyecto.

Las estaciones FM se han modelado y configurado acorde a los fundamentos teóricos y diagramas de radiación expuestos en el capítulo anterior. Se muestra, a modo de ejemplo, la configuración para el caso de la estación cuya antena transmisora se encuentra en el término de Almadén de la Plata (Sevilla).

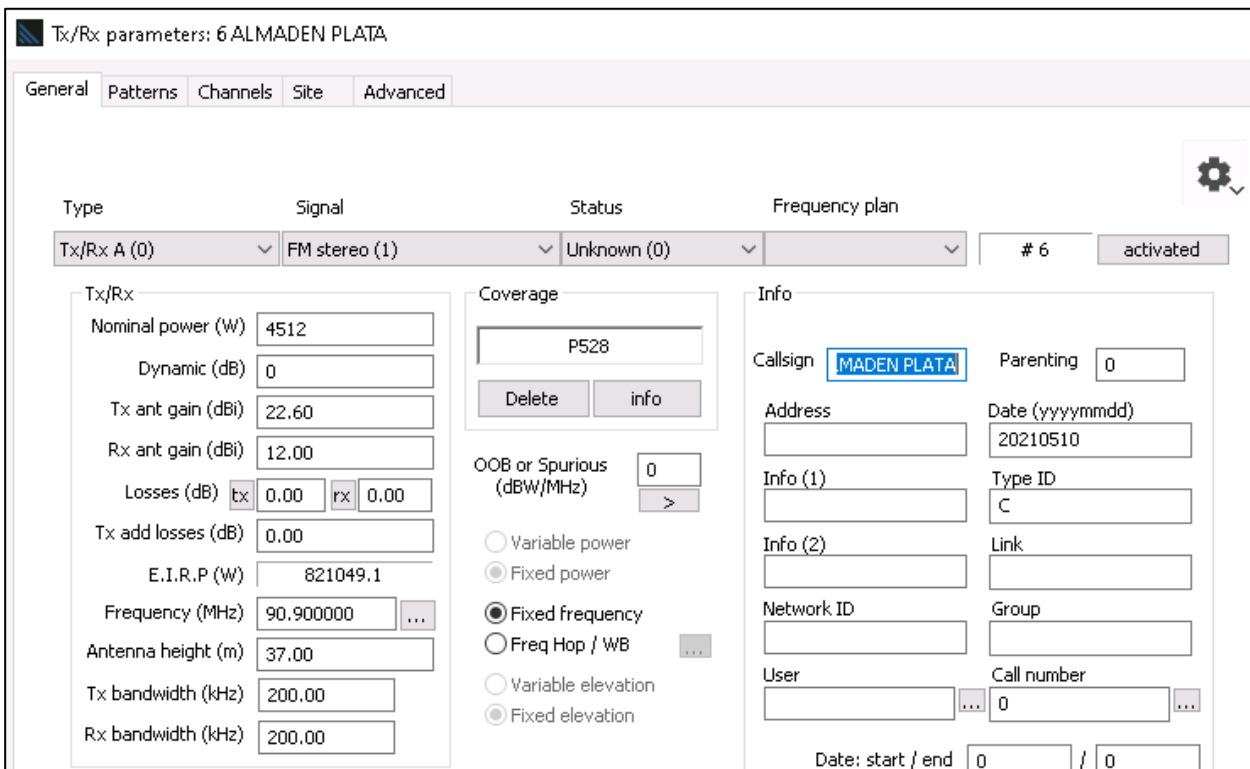


Figura 4-43. Configuración de parámetros para la estación FM de Almadén de la Plata.

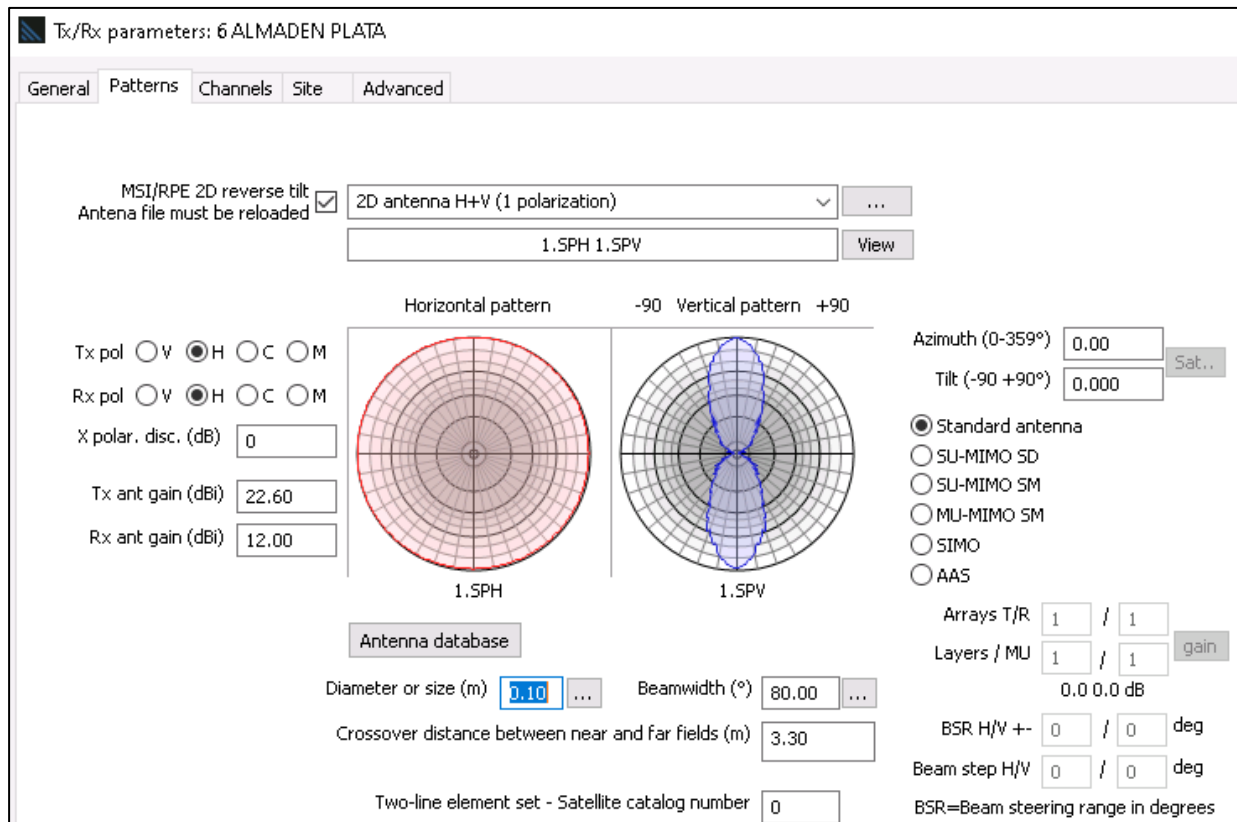


Figura 4-44. Configuración del diagrama de radiación del Tx de la estación FM de Almadén de la Plata.

Se analiza, primeramente, la cobertura de cada una de las estaciones FM para comprobar que se obtiene un resultado coherente con lo esperado y estudiado teóricamente. Se muestra, a modo de ejemplo, el mapa de cobertura correspondiente a Pilas (Sevilla), limitado a un área de 8 km en esta simulación. Se aprecia una radiación omnidireccional, como suele ser en las estaciones FM comerciales. En cuanto a valores, los más altos se concentran en un círculo alrededor del punto de emisión, del orden de +20 dBm. A un radio de 8 km, hay niveles de señal de entre -40 dBm y -60 dBm (caso más desfavorable debido a la presencia de montañas).

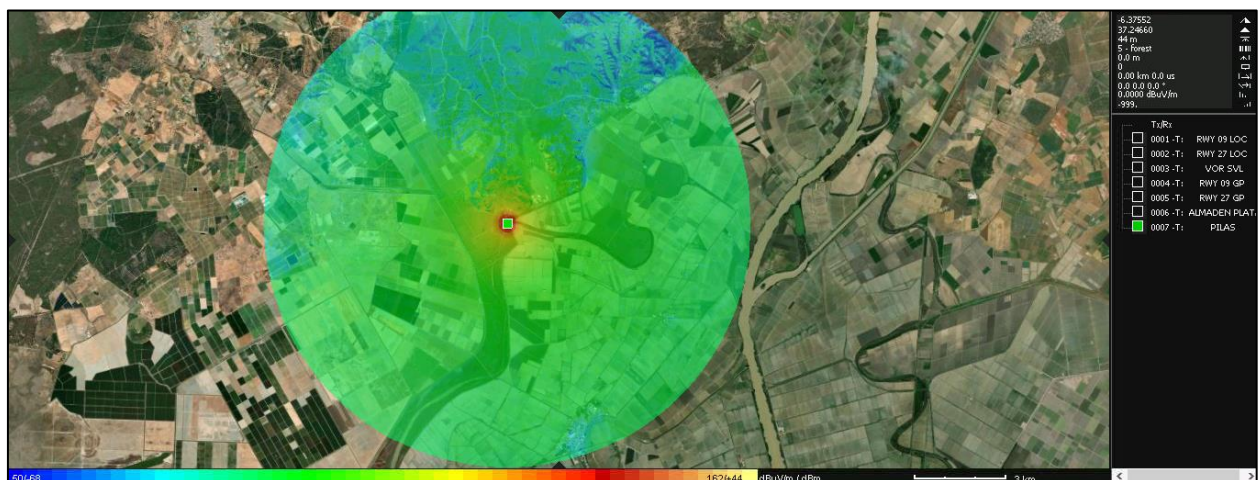


Figura 4-45. Cobertura en un radio de 8 km correspondiente a la emisión de la estación FM de Pilas.

4.6 Análisis de interferencias

En primer lugar, y antes de analizar interferencias, se va a realizar un primer comentario acorde a la inmunidad de los equipos ILS y VOR, en consonancia con lo explicado en el capítulo anterior.

Para ello, se activan todas las transmisiones FM y se desactivan los sistemas ILS y VOR. De esta manera, se puede comprobar cuánto nivel de señal correspondiente al conjunto de las FM llega hasta la terminal. Si el nivel de señal de las FM en la pista del aeropuerto es mayor a los valores de inmunidad descritos y estandarizados, no tendría sentido seguir con el análisis puesto que la inmunidad forma parte de las características de diseño de los equipos y si de entrada se superaran ya estos valores, los equipos ILS y VOR no podrían operar.

Respecto a la ejecución del proceso descrito, no es necesario abarcar en exceso el radio de cobertura que se simula, ya que el ordenador no permite simular un radio excesivamente grande por cuestiones de espacio. Se puede deducir el orden de magnitud del nivel de señal FM en el entorno del aeropuerto, teniendo en cuenta un aspecto claro como es que el nivel de señal va disminuyendo según nos alejamos de las estaciones FM y nos acercamos al aeropuerto. Lo que sucede es que directamente, en la simulación, a cierta distancia del aeropuerto, ya se aprecian valores lo suficiente bajos de señales FM para no causar problemas de inmunidad. Por ende, si nos alejamos aún más de las estaciones, tampoco va a haber problema. En concreto, tal y como se aprecia en las siguientes figuras, los valores de señal FM a ciertas distancias del aeropuerto (hasta donde llegan simuladas sendas áreas de cobertura), rondan los -32.8 dBm y los -42.8 dBm, muy por debajo de los niveles límites de inmunidad vistos, de entre -10 y $+15$ dBm.

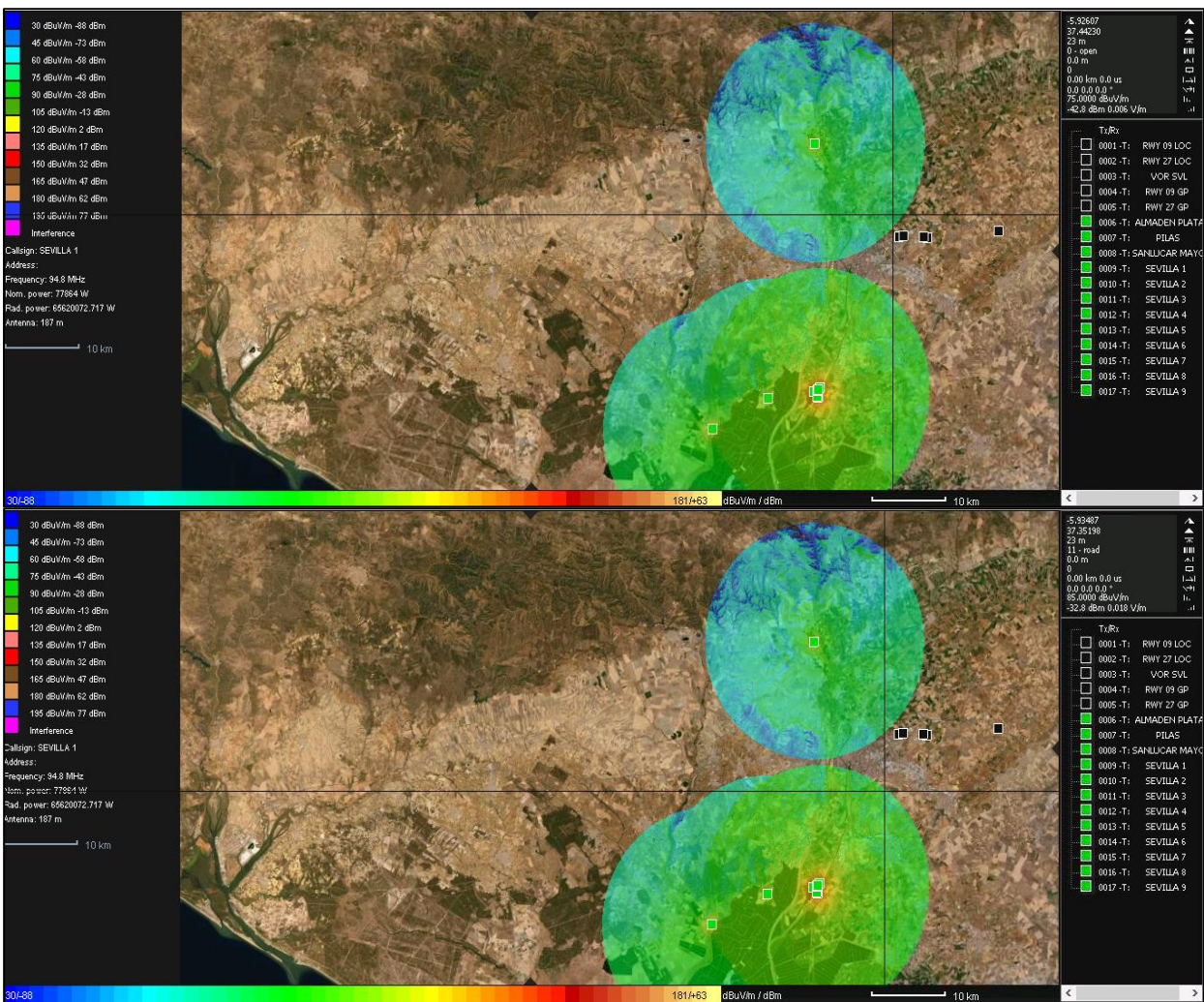


Figura 4-46. Mapa de coberturas de las estaciones FM consideradas en el estudio.

4.6.1 Análisis de interferencias en el escenario inicial

Para realizar el análisis de interferencias, el programa dispone de distintas opciones, que se diferencian entre sí en dos aspectos: la forma de configurar la simulación (distintos parámetros y modelos) y la forma de presentar los resultados (mapas o reportes de distinta índole).

En este caso, comparando las distintas opciones en base a la información técnica del programa [20], se decide usar “*Interference (C/I)*”, método que sirve cuando las señales deseadas y no deseadas comparten un espacio de ancho de banda similar o no muy lejano. Se muestran a continuación la ventana correspondiente a este método, donde se selecciona “*Global interference*” para obtener un resultado de manera general, y la propia configuración de “*Global Interference Analysis*”.

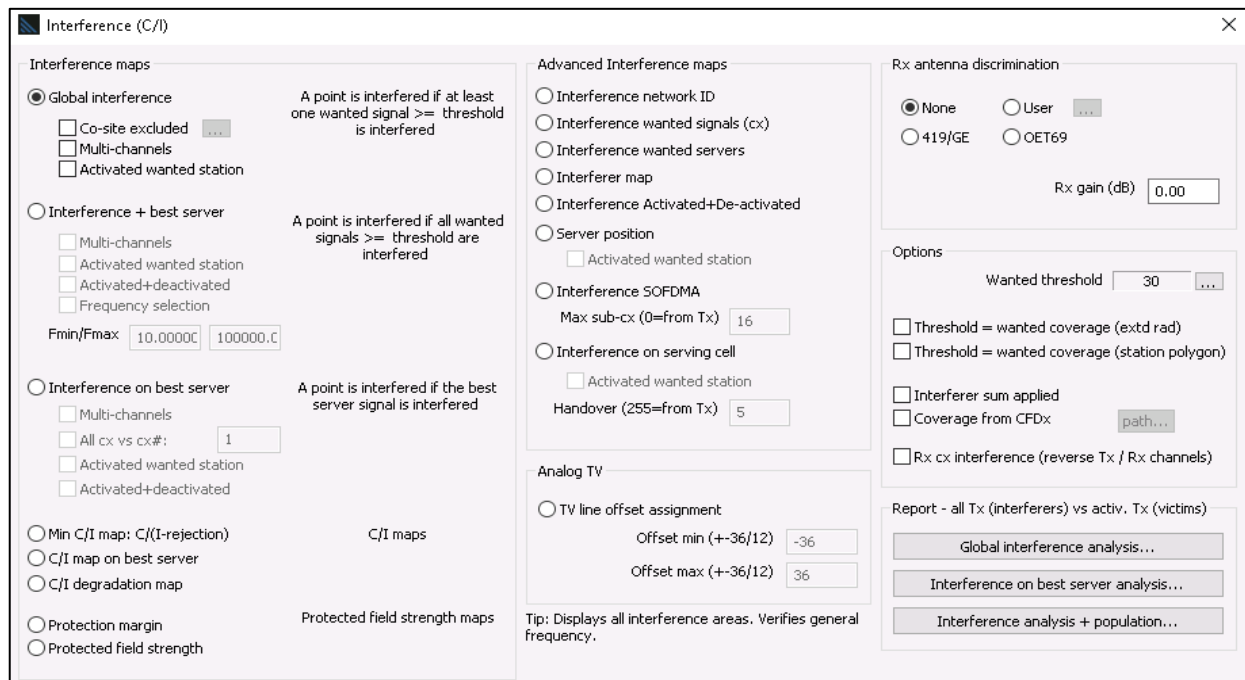


Figura 4-47. Ventana de configuración en “*Interference C/I*”.

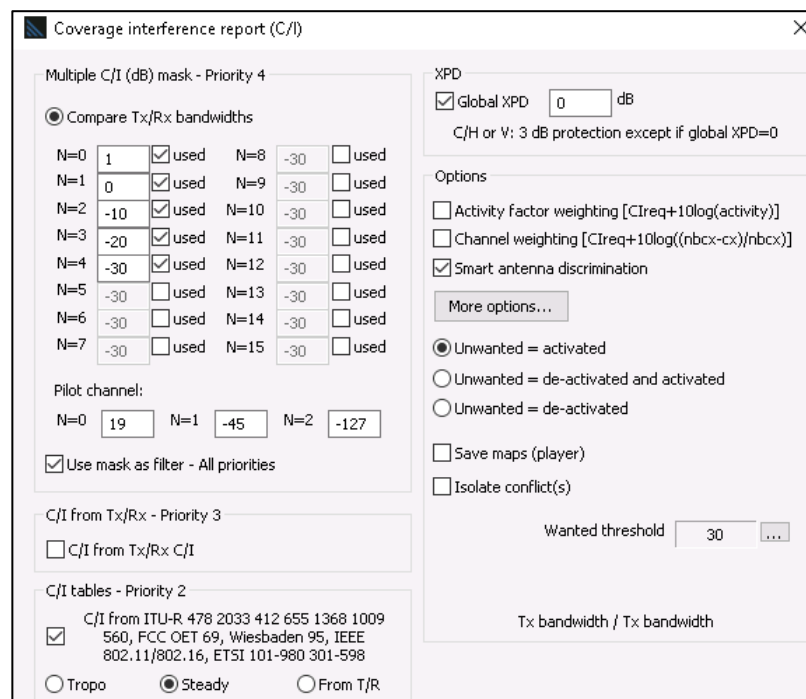


Figura 4-48. Opciones de configuración dentro de “*Global interference analysis*”.

Cabe destacar dos cuestiones importantes de este método:

- Por un lado, para que el programa distinga cómo debe hacer la simulación, hay que indicar cuáles son las señales deseadas (ILS LOC, ILS GP y VOR) y cuáles son las no deseadas (señales FM comerciales). Estas últimas son las que hipóticamente generarían interferencias en los sistemas de radionavegación. En este caso, el programa permite discernir las deseadas de las no deseadas en función de si se encuentran activadas o no en el momento de la simulación.
- Por otro lado, en base a lo establecido teóricamente, es conveniente marcar la opción de realizar el análisis en base a modelos estandarizados. En este caso, el ITU-R 1009 ya comentado está incluido entre ellos, por lo que es suficiente con señalar esta opción, evitando otras opciones demasiado avanzadas que podrían hacer excesivamente complejo la configuración del análisis.

Se ejecuta el análisis y se obtiene una lista vacía, lo que corresponde a ausencia de interferencias. Es un resultado positivo y acorde al contexto en el que se encuentra el trabajo. El sector aeronáutico exige alta fiabilidad y robustez frente a posibles debilidades en cualquiera de los sistemas. La parte de comunicaciones del avión, como el resto, debe estar protegida frente a interferencias para garantizar umbrales de seguridad máximos.

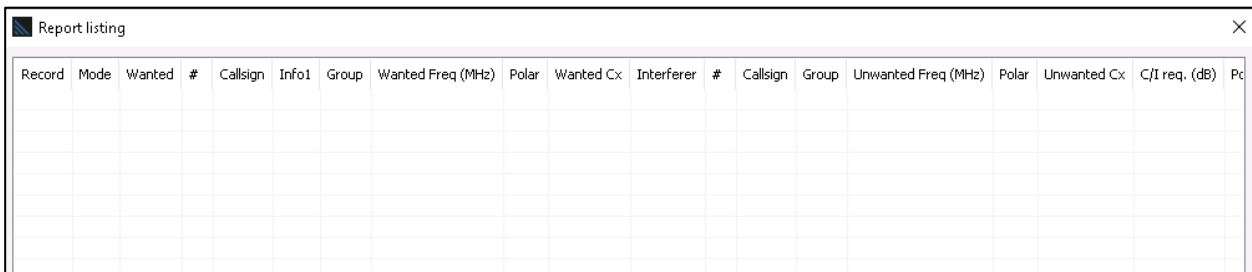


Figura 4-49. Análisis de interferencias de estaciones FM sobre radionavegación aérea en SVL.

Para que el análisis sea más consistente, se decide obtener el reporte de interferencias mediante otro método. El programa, mediante un análisis más predeterminado (con menos opciones de configuración propia) proporciona un análisis de interferencias dentro de “Spectrum”>ICAO / EUROCONTROL”, en el que se usa únicamente el modelo SM 1009. El método anterior es distinto ya que dentro de entre todas las opciones de configuración, se permite tener en cuenta muchos modelos como el ITU-R 1009 u otros de forma conjunta. De nuevo, se ejecuta la simulación y se reporta una lista en blanco, indicando que no debe haber interferencias de FM en ILS y VOR. A continuación, se muestran imágenes del método y el resultado.

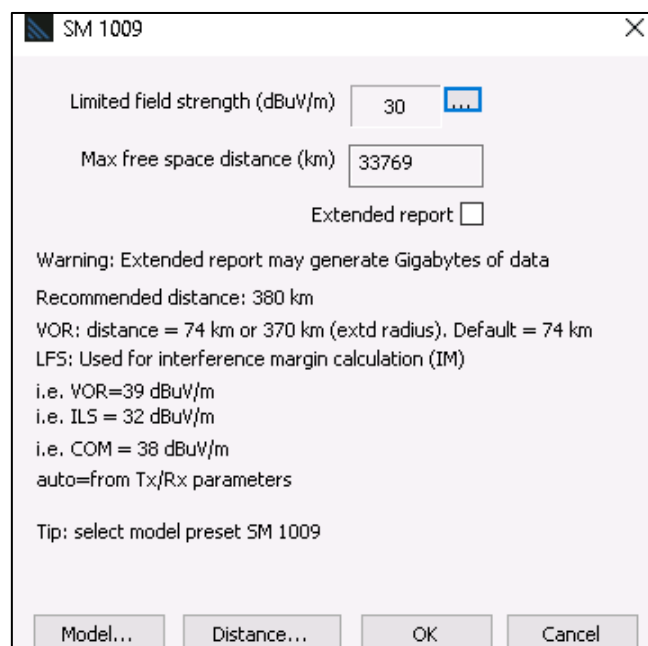


Figura 4-50. Ventana de configuración del método basado en SM 1009.

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
2	#####																
3	Test point	Type	Result (dB)	Interference	Wanted stati	Call sign	Wanted freq	FTx 1 MHz	FTx 2 MHz	FTx 3 MHz	Fintermod Iv	Intermod pr	FS1+correct.i	Correct fact	FS2+correct.i	Correct fact	FS3+c

Figura 4-51. Análisis alternativo de interferencias basado exclusivamente en SM 1009.

4.6.2 Análisis de interferencias modificando las potencias

Una vez comprobado que en el contexto real la simulación revela ausencia de interferencias asociadas a las estaciones FM, es interesante observar si cerca del escenario real hay posibilidades de que sí que hubiera interferencias. Para ello, y en primera instancia, se multiplican todas las potencias de las estaciones FM por 10, simulando así un escenario no real pero sí cercano en cuanto a parámetros de simulación se refiere. Se muestra un ejemplo de la reconfiguración de las estaciones FM, así como los resultados, donde se sigue observando que no se habría interferencias de FM en dicho escenario. Estos resultados también se obtienen mediante los dos métodos comentados anteriormente.

Figura 4-52. Reconfiguración de la estación de FM SEVILLA 9 (factor × 10 en potencia).

Record	Mode	Wanted	#	Callsign	Info1	Group	Wanted Freq (MHz)	Polar	Wanted Cx	Interferer	#	Callsign	Group	Unwanted Freq (MHz)	Polar	Unwanted Cx	C/I req. (dB)	Power	

Figura 4-53. Análisis de interferencias de estaciones FM sobre radionavegación aérea en SVL (factor $\times 10$ en potencia).

Más tarde, se realizan sendos análisis multiplicando las potencias $\times 100$ y $\times 1000$, obteniendo resultados similares.

En términos de potencias, se comprueba, por tanto, que los márgenes en los que se pueden mover las potencias de las estaciones FM sin causar interferencias son amplios en relación a los órdenes de magnitud. Es decir, se observa que la potencia no juega un papel determinante en la aparición de las interferencias que se analizan.

4.6.3 Análisis de interferencias modificando las frecuencias de transmisión de las estaciones FM

Para poder establecer otras conclusiones relevantes, se decide establecer otro escenario ficticio, pero coherente con los órdenes de magnitud del escenario real. En este escenario se mantienen todos los parámetros iniciales fijados para las estaciones FM, con la excepción de las frecuencias. Se cambian las frecuencias de todas las estaciones tal y como se muestra en las siguientes figuras, de tal forma que ahora todas transmitirán muy cerca de donde lo hacen algunos equipos del VOR e ILS. En concreto, se fijan frecuencias de entre 107,7 y 108,0 MHz, por lo que son frecuencias válidas para la difusión FM.

Tx/Rx parameters: 6 ALMADEN PLATA

General | Patterns | Channels | Site | Advanced

Type	Signal	Status	Frequency plan
Tx/Rx A (0)	FM stereo (1)	Unknown (0)	# 6 activated

Tx/Rx

Nominal power (W): 4512
Dynamic (dB): 0
Tx ant gain (dBi): 22.60
Rx ant gain (dBi): 12.00
Losses (dB): tx 0.00 rx 0.00
Tx add losses (dB): 0.00
E.I.R.P (W): 821049.1
Frequency (MHz): 107.700000
Antenna height (m): 37.00
Tx bandwidth (kHz): 200.00
Rx bandwidth (kHz): 200.00

Coverage

none
Delete info

OOB or Spurious (dBW/MHz): 0

Variable power
 Fixed power
 Fixed frequency
 Freq Hop / WB

Variable elevation
 Fixed elevation

Info

Callsign: ALMADEN PLAT Parenting: 0
Address: Date (yyyymmdd): 20210510
Info (1): Type ID: C
Info (2): Link:
Network ID: Group:
User: Call number: 0
Date: start / end: 0 / 0

Figura 4-54. Cambio de simulación fijando la frecuencia de “Almadén de la Plata” en torno a los 108 MHz.

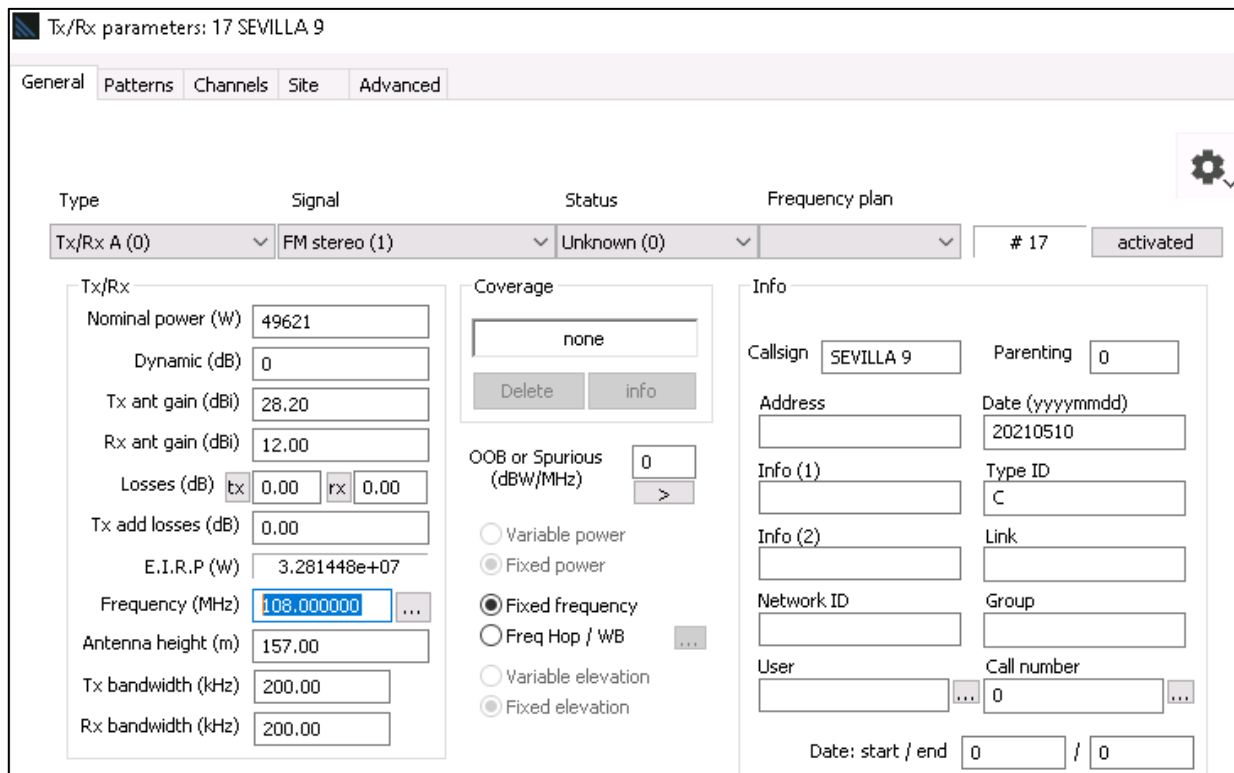


Figura 4-55. Cambio de simulación fijando la frecuencia de “Sevilla 9” en torno a los 108,0 MHz.

En este caso sí aparecen interferencias, y en gran número, habiendo usado para este análisis el método primeramente descrito. Sin embargo, se trata de interferencias que no son objeto de nuestro análisis, ya que se producen entre transmisores FM, pero no con respecto a los sistemas ILS o VOR. Es coherente la obtención de este resultado en tanto que en la simulación Interference (C/I) se contempla también la Rec. 412, específica para evitar las interferencias de unas emisoras FM a otras. En la siguiente tabla aparece un reporte detallado de las frecuencias generadas y el área que abarcan, entre otros detalles relevantes.

Tabla 4-2. Análisis de interferencias con modificación de las frecuencias de las estaciones FM.

Callsign	Wanted Freq (MHz)	Callsign	Unwanted Freq (MHz)	C/I req. (dB)	Pc interf.	Covered area (km ²)	Interfered area (km ²)
PILAS	107.800.000	SANLUCAR MAYOR	107.900.000	33.0	47.204.866	314.154.907	148.296.402
PILAS	107.800.000	SEVILLA 1	107.900.000	33.0	14.714.015	314.154.907	46.224.800
PILAS	107.800.000	SEVILLA 2	108.000.000	7.0	14.685.176	314.154.907	46.134.201
PILAS	107.800.000	SEVILLA 3	108.000.000	7.0	15.972.089	314.154.907	50.177.101
PILAS	107.800.000	SEVILLA 4	108.000.000	7.0	14.368.803	314.154.907	45.140.301
PILAS	107.800.000	SEVILLA 5	108.000.000	7.0	12.075.476	314.154.907	37.935.699
PILAS	107.800.000	SEVILLA 6	108.000.000	7.0	14.713.219	314.154.907	46.222.301
PILAS	107.800.000	SEVILLA 7	108.000.000	7.0	14.713.697	314.154.907	46.223.801
PILAS	107.800.000	SEVILLA 8	108.000.000	7.0	13.757.353	314.154.907	43.219.398
PILAS	107.800.000	SEVILLA 9	108.000.000	7.0	13.138.168	314.154.907	41.274.200
SANLUCAR MAYOR	107.900.000	PILAS	107.800.000	33.0	47.210.118	314.154.907	148.312.897

SANLUCAR MAYOR	107.900.000	SEVILLA 1	107.900.000	45.0	58.066.132	314.154.907	182.417.603
SANLUCAR MAYOR	107.900.000	SEVILLA 2	108.000.000	33.0	58.255.657	314.154.907	183.012.985
SANLUCAR MAYOR	107.900.000	SEVILLA 3	108.000.000	33.0	60.769.894	314.154.907	190.911.606
SANLUCAR MAYOR	107.900.000	SEVILLA 4	108.000.000	33.0	57.550.845	314.154.907	180.798.798
SANLUCAR MAYOR	107.900.000	SEVILLA 5	108.000.000	33.0	55.348.365	314.154.907	173.879.593
SANLUCAR MAYOR	107.900.000	SEVILLA 6	108.000.000	33.0	58.066.132	314.154.907	182.417.603
SANLUCAR MAYOR	107.900.000	SEVILLA 7	108.000.000	33.0	58.066.132	314.154.907	182.417.603
SANLUCAR MAYOR	107.900.000	SEVILLA 8	108.000.000	33.0	57.562.241	314.154.907	180.834.595
SANLUCAR MAYOR	107.900.000	SEVILLA 9	108.000.000	33.0	56.785.299	314.154.907	178.393.799
SEVILLA 1	107.900.000	PILAS	107.800.000	33.0	14.714.015	314.154.907	46.224.800
SEVILLA 1	107.900.000	SANLUCAR MAYOR	107.900.000	45.0	58.061.262	314.154.907	182.402.298
SEVILLA 1	107.900.000	SEVILLA 2	108.000.000	33.0	98.950.008	314.154.907	310.856.293
SEVILLA 1	107.900.000	SEVILLA 3	108.000.000	33.0	94.791.582	314.154.907	297.792.389
SEVILLA 1	107.900.000	SEVILLA 4	108.000.000	33.0	98.775.477	314.154.907	310.308.014
SEVILLA 1	107.900.000	SEVILLA 5	108.000.000	33.0	93.037.575	314.154.907	292.282.104
SEVILLA 1	107.900.000	SEVILLA 6	108.000.000	33.0	100.000.000	314.154.907	314.154.907
SEVILLA 1	107.900.000	SEVILLA 7	108.000.000	33.0	100.000.000	314.154.907	314.154.907
SEVILLA 1	107.900.000	SEVILLA 8	108.000.000	33.0	95.543.345	314.154.907	300.154.114
SEVILLA 1	107.900.000	SEVILLA 9	108.000.000	33.0	94.590.280	314.154.907	297.160.004
SEVILLA 2	108.000.000	PILAS	107.800.000	7.0	1.419.364	314.154.907	4.459.000
SEVILLA 2	108.000.000	SANLUCAR MAYOR	107.900.000	33.0	58.100.447	314.154.907	182.525.406
SEVILLA 2	108.000.000	SEVILLA 1	107.900.000	33.0	98.950.008	314.154.907	310.856.293
SEVILLA 2	108.000.000	SEVILLA 3	108.000.000	45.0	95.723.670	314.154.907	300.720.612
SEVILLA 2	108.000.000	SEVILLA 4	108.000.000	45.0	97.742.037	314.154.907	307.061.401
SEVILLA 2	108.000.000	SEVILLA 5	108.000.000	45.0	93.900.079	314.154.907	294.991.699
SEVILLA 2	108.000.000	SEVILLA 6	108.000.000	45.0	98.950.008	314.154.907	310.856.293
SEVILLA 2	108.000.000	SEVILLA 7	108.000.000	45.0	98.950.008	314.154.907	310.856.293
SEVILLA 2	108.000.000	SEVILLA 8	108.000.000	45.0	96.541.451	314.154.907	303.289.703
SEVILLA 2	108.000.000	SEVILLA 9	108.000.000	45.0	95.538.602	314.154.907	300.139.191
SEVILLA 3	108.000.000	PILAS	107.800.000	7.0	1.540.291	314.154.907	4.838.900
SEVILLA 3	108.000.000	SANLUCAR MAYOR	107.900.000	33.0	60.664.086	314.154.907	190.579.193
SEVILLA 3	108.000.000	SEVILLA 1	107.900.000	33.0	94.791.582	314.154.907	297.792.389
SEVILLA 3	108.000.000	SEVILLA 2	108.000.000	45.0	95.723.670	314.154.907	300.720.612
SEVILLA 3	108.000.000	SEVILLA 4	108.000.000	45.0	93.585.362	314.154.907	294.003.021
SEVILLA 3	108.000.000	SEVILLA 5	108.000.000	45.0	94.021.707	314.154.907	295.373.779
SEVILLA 3	108.000.000	SEVILLA 6	108.000.000	45.0	94.791.582	314.154.907	297.792.389
SEVILLA 3	108.000.000	SEVILLA 7	108.000.000	45.0	94.791.582	314.154.907	297.792.389

SEVILLA 3	108.000.000	SEVILLA 8	108.000.000	45.0	96.604.700	314.154.907	303.488.373
SEVILLA 3	108.000.000	SEVILLA 9	108.000.000	45.0	95.731.914	314.154.907	300.746.490
SEVILLA 4	108.000.000	PILAS	107.800.000	7.0	13.882.515	314.154.907	43.612.598
SEVILLA 4	108.000.000	SANLUCAR MAYOR	107.900.000	33.0	57.537.826	314.154.907	180.757.904
SEVILLA 4	108.000.000	SEVILLA 1	107.900.000	33.0	98.775.477	314.154.907	310.308.014
SEVILLA 4	108.000.000	SEVILLA 2	108.000.000	45.0	97.742.037	314.154.907	307.061.401
SEVILLA 4	108.000.000	SEVILLA 3	108.000.000	45.0	93.585.362	314.154.907	294.003.021
SEVILLA 4	108.000.000	SEVILLA 5	108.000.000	45.0	92.139.196	314.154.907	289.459.808
SEVILLA 4	108.000.000	SEVILLA 6	108.000.000	45.0	98.775.477	314.154.907	310.308.014
SEVILLA 4	108.000.000	SEVILLA 7	108.000.000	45.0	98.775.477	314.154.907	310.308.014
SEVILLA 4	108.000.000	SEVILLA 8	108.000.000	45.0	94.445.129	314.154.907	296.704.010
SEVILLA 4	108.000.000	SEVILLA 9	108.000.000	45.0	93.568.555	314.154.907	293.950.195
SEVILLA 5	108.000.000	PILAS	107.800.000	7.0	1.068.963	314.154.907	3.358.200
SEVILLA 5	108.000.000	SANLUCAR MAYOR	107.900.000	33.0	55.214.100	314.154.907	173.457.794
SEVILLA 5	108.000.000	SEVILLA 1	107.900.000	33.0	93.037.575	314.154.907	292.282.104
SEVILLA 5	108.000.000	SEVILLA 2	108.000.000	45.0	93.900.079	314.154.907	294.991.699
SEVILLA 5	108.000.000	SEVILLA 3	108.000.000	45.0	94.021.707	314.154.907	295.373.779
SEVILLA 5	108.000.000	SEVILLA 4	108.000.000	45.0	92.139.196	314.154.907	289.459.808
SEVILLA 5	108.000.000	SEVILLA 6	108.000.000	45.0	93.037.575	314.154.907	292.282.104
SEVILLA 5	108.000.000	SEVILLA 7	108.000.000	45.0	93.037.575	314.154.907	292.282.104
SEVILLA 5	108.000.000	SEVILLA 8	108.000.000	45.0	97.027.772	314.154.907	304.817.505
SEVILLA 5	108.000.000	SEVILLA 9	108.000.000	45.0	98.153.809	314.154.907	308.355.011
SEVILLA 6	108.000.000	PILAS	107.800.000	7.0	2.748.294	314.154.907	8.633.900
SEVILLA 6	108.000.000	SANLUCAR MAYOR	107.900.000	33.0	57.922.413	314.154.907	181.966.095
SEVILLA 6	108.000.000	SEVILLA 1	107.900.000	33.0	100.000.000	314.154.907	314.154.907
SEVILLA 6	108.000.000	SEVILLA 2	108.000.000	45.0	98.950.008	314.154.907	310.856.293
SEVILLA 6	108.000.000	SEVILLA 3	108.000.000	45.0	94.791.582	314.154.907	297.792.389
SEVILLA 6	108.000.000	SEVILLA 4	108.000.000	45.0	98.775.477	314.154.907	310.308.014
SEVILLA 6	108.000.000	SEVILLA 5	108.000.000	45.0	93.037.575	314.154.907	292.282.104
SEVILLA 6	108.000.000	SEVILLA 7	108.000.000	45.0	100.000.000	314.154.907	314.154.907
SEVILLA 6	108.000.000	SEVILLA 8	108.000.000	45.0	95.543.345	314.154.907	300.154.114
SEVILLA 6	108.000.000	SEVILLA 9	108.000.000	45.0	94.590.280	314.154.907	297.160.004
SEVILLA 7	108.000.000	PILAS	107.800.000	7.0	1.419.745	314.154.907	4.460.200
SEVILLA 7	108.000.000	SANLUCAR MAYOR	107.900.000	33.0	57.899.845	314.154.907	181.895.203
SEVILLA 7	108.000.000	SEVILLA 1	107.900.000	33.0	100.000.000	314.154.907	314.154.907
SEVILLA 7	108.000.000	SEVILLA 2	108.000.000	45.0	98.950.008	314.154.907	310.856.293
SEVILLA 7	108.000.000	SEVILLA 3	108.000.000	45.0	94.791.582	314.154.907	297.792.389
SEVILLA 7	108.000.000	SEVILLA 4	108.000.000	45.0	98.775.477	314.154.907	310.308.014
SEVILLA 7	108.000.000	SEVILLA 5	108.000.000	45.0	93.037.575	314.154.907	292.282.104
SEVILLA 7	108.000.000	SEVILLA 6	108.000.000	45.0	100.000.000	314.154.907	314.154.907
SEVILLA 7	108.000.000	SEVILLA 8	108.000.000	45.0	95.543.345	314.154.907	300.154.114
SEVILLA 7	108.000.000	SEVILLA 9	108.000.000	45.0	94.590.280	314.154.907	297.160.004
SEVILLA 8	108.000.000	PILAS	107.800.000	7.0	1.526.826	314.154.907	4.796.600

SEVILLA 8	108.000.000	SANLUCAR MAYOR	107.900.000	33.0	57.504.753	314.154.907	180.654.007
SEVILLA 8	108.000.000	SEVILLA 1	107.900.000	33.0	95.543.345	314.154.907	300.154.114
SEVILLA 8	108.000.000	SEVILLA 2	108.000.000	45.0	96.541.451	314.154.907	303.289.703
SEVILLA 8	108.000.000	SEVILLA 3	108.000.000	45.0	96.604.700	314.154.907	303.488.373
SEVILLA 8	108.000.000	SEVILLA 4	108.000.000	45.0	94.445.129	314.154.907	296.704.010
SEVILLA 8	108.000.000	SEVILLA 5	108.000.000	45.0	97.027.772	314.154.907	304.817.505
SEVILLA 8	108.000.000	SEVILLA 6	108.000.000	45.0	95.543.345	314.154.907	300.154.114
SEVILLA 8	108.000.000	SEVILLA 7	108.000.000	45.0	95.543.345	314.154.907	300.154.114
SEVILLA 8	108.000.000	SEVILLA 9	108.000.000	45.0	98.866.515	314.154.907	310.593.994
SEVILLA 9	108.000.000	PILAS	107.800.000	7.0	3.938.694	314.154.907	12.373.600
SEVILLA 9	108.000.000	SANLUCAR MAYOR	107.900.000	33.0	56.686.272	314.154.907	178.082.703
SEVILLA 9	108.000.000	SEVILLA 1	107.900.000	33.0	94.590.280	314.154.907	297.160.004
SEVILLA 9	108.000.000	SEVILLA 2	108.000.000	45.0	95.538.602	314.154.907	300.139.191
SEVILLA 9	108.000.000	SEVILLA 3	108.000.000	45.0	95.731.914	314.154.907	300.746.490
SEVILLA 9	108.000.000	SEVILLA 4	108.000.000	45.0	93.568.555	314.154.907	293.950.195
SEVILLA 9	108.000.000	SEVILLA 5	108.000.000	45.0	98.153.809	314.154.907	308.355.011
SEVILLA 9	108.000.000	SEVILLA 6	108.000.000	45.0	94.590.280	314.154.907	297.160.004
SEVILLA 9	108.000.000	SEVILLA 7	108.000.000	45.0	94.590.280	314.154.907	297.160.004
SEVILLA 9	108.000.000	SEVILLA 8	108.000.000	45.0	98.866.515	314.154.907	310.593.994

4.6.4 Método alternativo de análisis de interferencias

HTZ Communications ofrece otra opción, que se diferencia en cómo funciona de las anteriores ya que hay que activar todos los transmisores, tanto de los equipos ILS y VOR como de las estaciones FM comerciales. En este caso, las señales deseadas se seleccionan de forma conjunta; es decir, se marca el rango de frecuencias deseadas. En este caso, se trata de la banda de frecuencia, cercana a la FM, correspondiente a la transmisión de ILS y VOR, que oscila entre los 108,0 y 117,95 MHz.

Además, se señala también la opción que tiene en cuenta el modelo ITU-R 1009.

Se ejecuta el análisis y en este caso se puede hacer click derecho en cualquier punto del mapa, obteniendo para ese punto un listado de las frecuencias deseadas y una ventana desplegable en aquellas frecuencias deseadas que tienen asociadas interferencias. Para todos los análisis, se han ido escogiendo puntos situados en el aeropuerto.

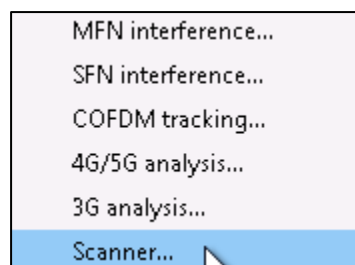


Figura 4-56. Opción *Scanner* para el análisis de interferencias.

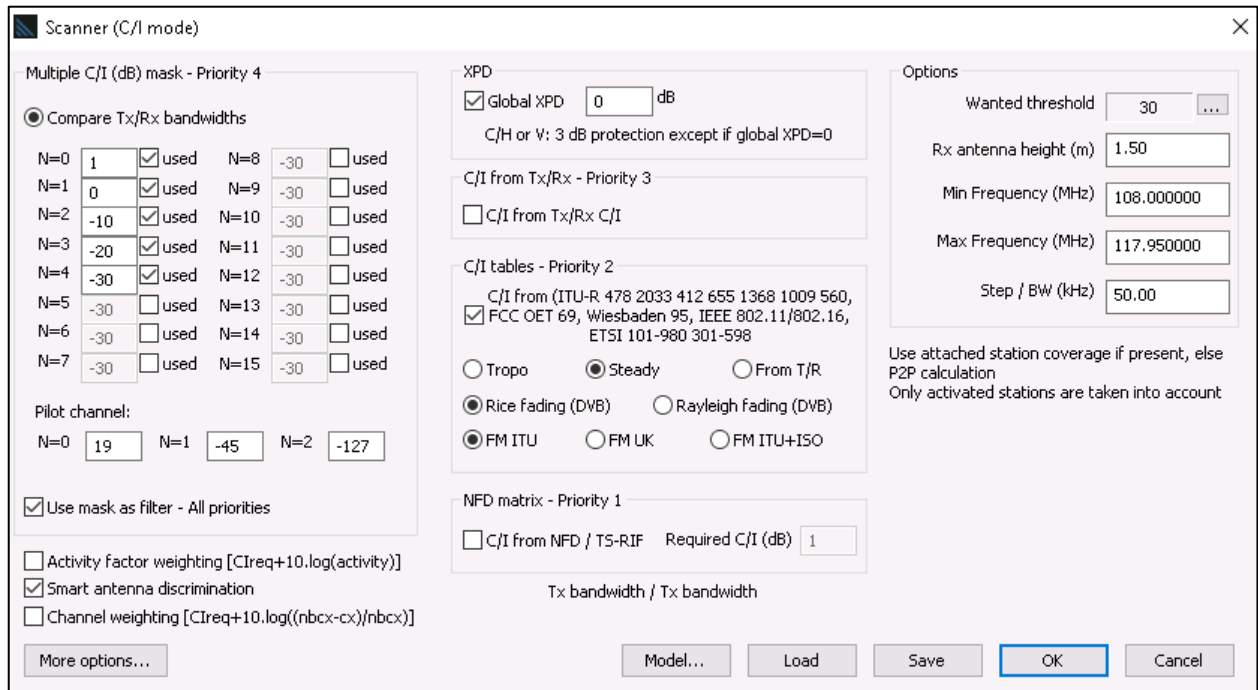


Figura 4-57. Configuración de la opción *Scanner* para el análisis de interferencias.

En primer lugar, se procede a la simulación del escenario inicial, sin modificar parámetros. Se observa que no hay interferencias asociadas a las comunicaciones FM comerciales. Las únicas interferencias que aparecen, de orden despreciable, son fruto de los equipos ILS y VOR propiamente, de manera que el resultado es coherente con los métodos anteriores.



Figura 4-58. Muestra parcial de resultados de Scanner para el escenario inicial.

En segundo lugar, se modifican las potencias de las transmisiones FM comerciales. Se obtienen resultados en la misma línea que los dos anteriores métodos, mostrando ausencia de interferencias asociadas a las señales FM. De nuevo, solo se observan algunas interferencias asociadas a los propios equipos de radionavegación aérea, pero ninguna de ellas relativas a las estaciones FM.

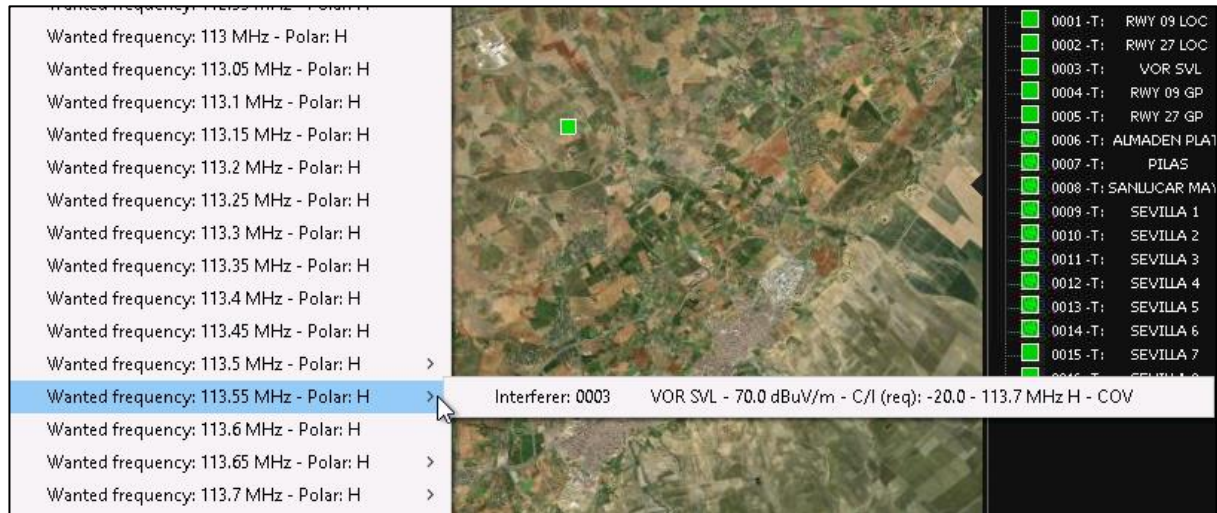


Figura 4-59. Muestra parcial del análisis multiplicando potencias de las FM por 10.



Figura 4-60. Muestra parcial del análisis multiplicando potencias de las FM por 1000.

En último lugar, se modifican las frecuencias tal y como se hizo ya anteriormente, haciendo que todas las estaciones FM comerciales sitúen la transmisión en los 108 MHz. En este caso, en la línea de lo obtenido a través de los anteriores métodos, aparecen interferencias, pero en este caso se trata de interferencias que sí son objeto de estudio, puesto que se trata de interferencias de FM sobre ILS y VOR. En concreto, se generan interferencias en las frecuencias cercanas a los 108 MHz.

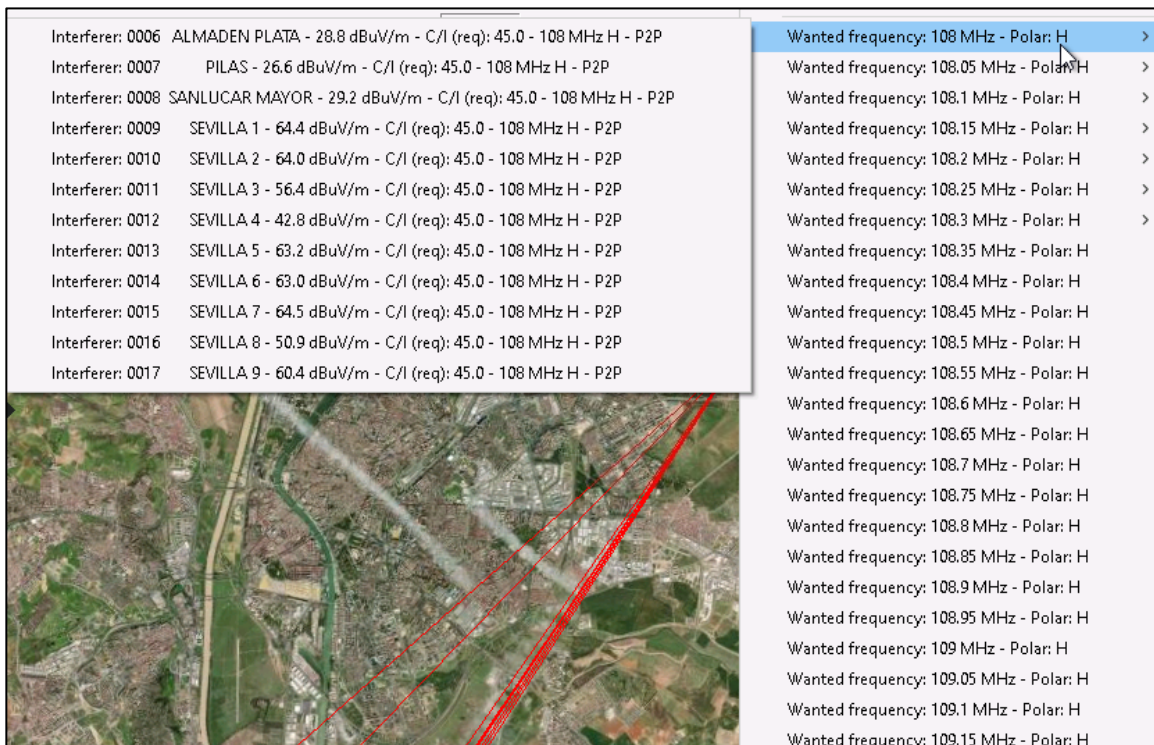


Figura 4-61. Muestra parcial del análisis fijando las frecuencias de las FM en 108 MHz.

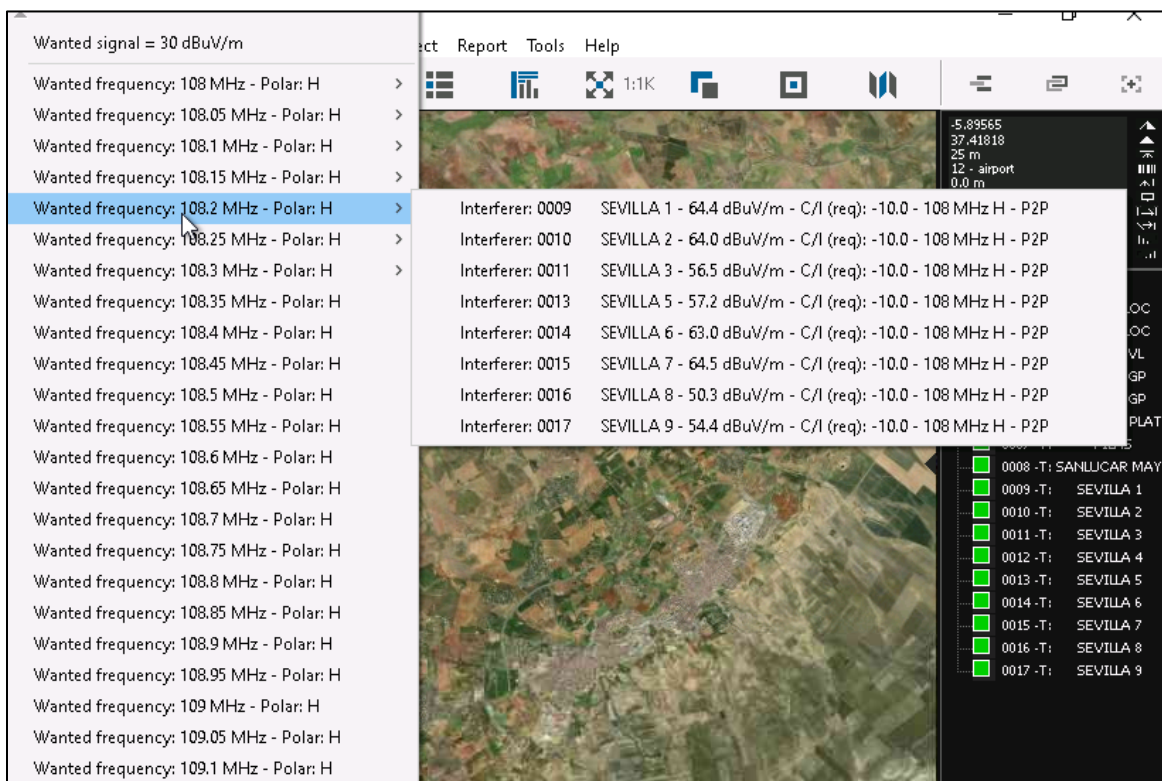


Figura 4-62. Segunda muestra parcial del análisis fijando las frecuencias de las FM en 108 MHz.



```
Wanted frequency: 116.65 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 116.7 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 116.75 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 116.8 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 116.85 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 116.9 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 116.95 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117.05 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117.1 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117.15 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117.2 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117.25 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117.3 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117.35 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117.4 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117.45 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117.5 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117.55 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117.6 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117.65 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117.7 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117.75 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117.8 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117.85 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117.9 MHz - Polar: H
Wanted frequency: 117.95 MHz - Polar: H
```

Figura 4-63. Tercera muestra parcial del análisis fijando las frecuencias de las FM en 108 MHz.

Cabe comentar que se observan diferencias a nivel de resultados entre este método y los anteriores para el escenario en el que se han reubicado las frecuencias de emisión de las estaciones FM, acercándolas a las de ILS y VOR. Sin embargo, esta diferencia presenta sentido en tanto que haciendo una revisión de los métodos usados, se comprueba que mediante *Scanner* se realiza un análisis más complejo, abarcando un radio conjunto y mayor para todas las estaciones. Esta justificación podría ser la causa de la detección mayor de interferencias mediante *Scanner*, siendo interesante sacar conclusiones a partir de este método.

En definitiva, se observa que la emisión FM en frecuencias que se encuentran a menos de 1 MHz de ILS y VOR, causa interferencias en estos sistemas de radionavegación, y concretamente en aquellos casos en las que la potencia nominal de la FM es relativamente alta.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

En primer lugar, tras la simulación de todos los sistemas implicados en el estudio, se obtienen una serie de comparaciones en torno a los valores numéricos de cobertura:

- Se observa que los niveles de señal recibidos en los puntos del aeropuerto son mayores para el caso de los localizadores del ILS, destacando el nivel de señal máximo recibido para la transmisión del localizador de la pista con orientación 27, valor de aproximadamente -2.1 dBm.
- Las sendas de planeo ocupan el segundo lugar en cuanto a niveles de señal que se reciben en los hipotéticos puntos del aeropuerto. Se comprueba a través de la simulación que el caso más favorable en este caso corresponde al GP de la pista con orientación 27, con -4.7 dBm de manera puntual.
- Tras estos equipos, se encuentra el VOR, en el que los valores de nivel de señal no superan, en el mejor de los casos, los -47.3 dBm, en el aeropuerto y sus inmediaciones.

Por tanto, se concluye que habrá que prestar mayor atención al VOR si se atiende a su menor nivel de señal recibida, ya que, si potencialmente hubiera más señales no deseadas, se encontraría más expuesto a las interferencias que los equipos del ILS, en cuestión de potencias.

En segundo lugar, se concluyó que el diseño de los sistemas ILS y VOR es complejo y resulta en equipos muy robustos [22]. Es decir, se encuentran lo suficientemente preparados para asumir la difusión de otras señales en el espacio. Esto implica que los equipos de recepción ILS y VOR, integrados en las aeronaves, presentan la suficiente inmunidad siempre que las señales de difusión FM no superen ciertos niveles determinados a la entrada del receptor. De esta manera, si el conjunto de señales de difusión FM no supera en el aeropuerto dichos niveles de diseño marcado, no producirán interferencias o degradaciones perjudiciales en la señal, mientras que sí los superan, habrá que analizar de qué tipo y en qué frecuencias se producen.

En tercer lugar, a través de las distintas simulaciones, y cotejando los resultados obtenidos en la última parte del capítulo 4, se llega a la conclusión de que la difusión FM comercial no causa interferencias en el Aeropuerto de Sevilla, y en concreto, en los sistemas de radionavegación aérea ILS y VOR. Los resultados se obtienen a partir de tres métodos diferentes, lo que confirma la veracidad de los datos obtenidos. A partir de este punto, hay que señalar distintas variantes realizadas con respecto al escenario realista e inicialmente simulado:

- Una variación ha consistido en aumentar las potencias de los equipos transmisores por factores de 10, 100 y 1000, manteniéndose la ausencia de interferencias.
- Otras variaciones corresponden al traslado ficticio de frecuencias de emisión por parte de las emisoras FM comerciales consideradas. En este caso, las emisiones se fijan en la simulación entre 107,7 MHz y 108 MHz, perteneciendo a la franja de difusión FM, pero acercando la transmisión a la banda aeronáutica. Tras las simulaciones, se observan resultados que indican la existencia de interferencias en este escenario, lo que confirma que, en la emisión de las FM, habrá que prestar más atención a los márgenes de frecuencia que a los de potencia.

Estas variaciones permiten saber cuál es el margen de ausencia de interferencias en el que se encuentran estos sistemas en el Aeropuerto de Sevilla, pudiendo concluir que dicho margen es considerablemente amplio. Es decir, los parámetros inicialmente simulados, que se corresponden con el escenario más fiel posible a la realidad del contexto, pueden variarse sensiblemente y seguir siendo robustos frente a las hipotéticas interferencias causadas por las comunicaciones FM.

5.2 Posibles líneas futuras del trabajo

En cuanto a las posibles líneas futuras en las que podría desarrollarse el estudio, es razonable dividir las entre:

1. Líneas que se encuentran encaminadas a ampliar la muestra del estudio.
2. Líneas que responden a mejorar la relación entre simulación y realidad.
3. Líneas que buscan aumentar los escenarios a partir de otras modificaciones de parámetros realistas e iniciales.

Por un lado, en torno al tamaño de la muestra del estudio, sería interesante tener en cuenta todas las estaciones FM de la provincia sin excepción, independientemente de qué tipo de gestión sea o a qué ámbito pertenezcan. Para mayor énfasis, sería posible ampliar el estudio a todas las estaciones de la Comunidad Autónoma de Andalucía, dando un salto considerable en el número de estaciones consideradas, si bien sería conveniente realizar una valoración de las ventajas que aporta introducir en la simulación tal cantidad de datos en comparación con la complejidad que implicaría.

Por otro lado, respecto al posible objetivo de mejorar la simulación acercandola aún más a la realidad, se pueden considerar varias posibilidades:

- Obtener datos de potencias y ganancias, uno a uno, de cada una de las estaciones FM consideradas, sustituyendo así las hipótesis realizadas en el presente estudio en las que se parte del dato disponible de p.r.a para calcular potencias y ganancias. Este punto presentaría complejidad al no haber encontrado datos concretos de potencias y ganancias de todas las estaciones FM, por lo que habría que hacer un estudio de búsqueda pormenorizada para saber si se pueden obtener la totalidad de estos datos o no. Además, en este sentido también será interesante obtener datos particularizados en lo referente a diagramas de radiación y otros parámetros más avanzados.
- Otra opción es realizar trabajos de campo. Sería interesante poder contactar con el Aeropuerto de Sevilla y ver si se permite y es posible realizar medidas de los niveles de señal y otros parámetros en la realidad, con equipos de medida adecuados de telecomunicación *in situ*, en determinados puntos del aeropuerto y sus inmediaciones. Estas medidas permitirían establecer correlaciones entre simulación y realidad y en base a ellas, realizar correcciones en la configuración de parámetros para así obtener mapas de cobertura aún más realistas. Posteriormente, cuando se realizara el análisis de interferencias, los datos obtenidos serían, por tanto, aún más precisos.
- Incluir en las simulaciones el resto de los sistemas de radionavegación aérea posibles, además de ILS y VOR.

Por último, en lo relativo al aumento de escenarios variados con respecto al inicial y realista, se puede:

- Una manera de profundizar en el análisis sería no tener en cuenta ninguna estación FM real y suponer estaciones ficticias, con datos coherentes, fijando frecuencias concretas de transmisión que pudieran causar problemas en las comunicaciones. La simulación se haría tras realizar un estudio previo teórico de las frecuencias hipotéticamente problemáticas.
- Otra idea podría ser cambiar la ubicación de los equipos en la simulación. Es decir, manteniendo todos los parámetros realistas, se podría volver a simular cambiando únicamente el emplazamiento de ILS, VOR, para así poder obtener datos relacionados con la influencia, orografía y contexto del terreno, así como la orografía. Datos como potencias, ganancias y patrones de radiación seguirían siendo los configurados inicialmente para el aeropuerto de Sevilla.

En definitiva, se pueden realizar análisis teóricos preliminares de la dependencia de distintos parámetros configurables con respecto a la aparición de interferencias y partiendo de estos datos, ejecutar simulaciones que permitan establecer más correlaciones. Así, estos resultados podrían constituir aportes interesantes con posibilidad de ser extrapolados también a otras terminales aeroportuarias.

REFERENCIAS

- [1] B. Forssell, Radionavigation systems, New York [etc.]: Prentice Hall International (UK), 1991.
- [2] L. Tetley y D. Calcutt, Electronic navigation systems, Oxford; Boston: Butterworth-Heinemann, 2001.
- [3] M. Kaiton y W. R. Fried, Avionics navigation systems, New York: John Wiley and Sons, 1997.
- [4] L. V. Valencia, Sistemas de Navegación Aérea en el Aeropuerto, Sevilla, 2017.
- [5] R. B. d. A. V. Santos, Impact of FM Broadcast Signals on Aeronautical Radionavigation, Lisboa, 2015.
- [6] B. Kendal, Manual of avionics: an introduction to the electronics of civil aviation, Oxford; London; Edinburgh [etc.]: Garsington Road; John Street; Ainslie Place, 1979.
- [7] W. Rankin, «The Geogrpahy of Radionavigation and the Politics of Intangible Artifacts,» *The Johns Hopkins University Press*, vol. 55, nº 3, pp. 622-674, 2014.
- [8] F. C. Ruiz, *Ayudas a la navegación aérea*, Sevilla: Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Sevilla.
- [9] M. F. i. Domènec y C. L. Olano, «Diploma de Especialización Profesional Universitario en Producción y Realización de Programas Radiotelevisivos,» Alfa Delta Digital S.L., Valencia (España).
- [10] F. R. Micolau y F. T. Ruiz, «Comunicaciones analógicas: modulaciones AM y FM. Una perspectiva histórica,» FUOC. Fundació para la Universitat Oberta de Catalunya.
- [11] D. Stacey, Aeronautical Radio Communication Systems and Networks, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, 2008.
- [12] a. soluciones, *PIM Productos de Intermodulación Pasiva*.
- [13] N. B. d. Carvalho y R. C. Madureira, «Intermodulation Interference in the GSM/UMTS Bands,» Portugal.
- [14] Wikipedia, «Intermodulación» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Intermodulaci%C3%B3n> [Último acceso: 6 mayo 2021].
- [15] ITU-R, Compatibility between the sound-broadcasting service in the band of about 87-108 MHz

- and the aeronautical services in the band 108-137 MHz, Recommendation.
- [16] <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1009-1-199510-1/es>.
- [17] S. J. Siu, *Gestión de las Frecuencias Aeronáuticas en las Regiones CAR y SAM. Taller Regional en Preparación para la Decimoquinta Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT CMR-15)*, Lima, Perú, 2013.
- [18] O. Smarrelli, *Consideraciones sobre el espectro de frecuencia para la infraestructura de navegación*, Lima, Perú: ICAO .
- [19] . d. A. C. I. O. R. Sudamericana., *Evaluación de los requisitos operacionales para determinar la plantación de mejoras de las capacidades de comunicaciones, navegación y vigilancia (CNS) para operaciones en ruta y área terminal*, Lima, Perú.
- [20] ATDI, «Getting started with HTZ Communications - Technical Assistance».
- [21] L. B. Agudelo y J. E. S. Carrillo, «MANUAL BÁSICO DE APRENDIZAJE ICS TELECOM – ATDI».
- [22] «RAP 310,» de *Especificaciones Relativas a las Radioayudas para la Navegación*, 2013, pp. Volumen I, Capítulo 3.
- [23] CCIR, *Consideraciones generales relativas a la interferencia perjudicial desde el punto de vista de los servicios móviles aeronáuticos y el servicio de radionavegación aeronáutica*, 1982-1986-1990.
- [24] Wikipedia, «Amplitud modulada,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Amplitud_modulada. [Último acceso: 2 Mayo 2021].
- [25] Á. Araguz, «Equipos de imagen CFGM Equipos electrónicos,» 2010/2013. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/equiposdeimagengmfp/1-transmision-de-television/2-antenas-de-television/parmetros-de-una-antena>. [Último acceso: 3 mayo 2021].
- [26] Universidad de Alcalá, «Radiofaros - Procesado de señal y teoría de la comunicación».
- [27] CCIR, «Polarización de las emisiones de radiodifusión con modulación de frecuencia en la banda 8 (ondas métricas),» 1970-1974-1978-1982-1986-1990.
- [28] F. Ramos, «radioenlaces - Antenas para radiodifusión,» [En línea]. Available: <http://www.radioenlaces.es/articulos/antenas-para-radiodifusion/>. [Último acceso: 3 mayo 2021].
- [29] OMB Broadcast, «Antenas de radio FM y radio digital,» [En línea]. Available: <https://omb.com/es/sistemas-electronicos/antenas/radio-fm/>. [Último acceso: 3 mayo 2021].
- [30] OMB Broadcast, «Antena de polarización circular GP - Especificaciones técnicas».
- [31] OMB Broadcast, «Antena de polarización circular MP - Especificaciones técnicas».
- [32] OMB Broadcast, «Antena de polarización circular SGP - Especificaciones técnicas».

- [33] OMB Broadcast, «Antena de polarización vertical VER LB - Especificaciones técnicas».
- [34] M. G. Alatríste, «slideshare - Realización de la práctica de ILS,» Instituto Politécnico Nacional - Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 9 5 2013. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/magnalatríst/practica-de-navegacion-1-3-dep>. [Último acceso: 3 mayo 2021].
- [35] HEBERGEMENTWEBS, «Tutorial sobre teoría de antenas - Teoría de la antena: antena log-periódica,» [En línea]. Available: <https://www.hebergementwebs.com/tutorial-sobre-teoria-de-antenas/teoria-de-la-antena-antena-log-periodica>. [Último acceso: 4 mayo 2021].
- [36] Wikipedia, «Wikipedia,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:LPDA-Antenna.jpg>. [Último acceso: 4 mayo 2021]. Licencia: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.es>
- [37] Wikipedia, «Wikimedia commons,» [En línea]. Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/57/ILS_localizer.jpg. [Último acceso: 4 mayo 2021]. Licencia: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>
- [38] Wikipedia, «Wikimedia commons,» [En línea]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Glide_path_transmitters#/media/File:Gleitwegsen der f%C3%BCr_Runway_32R.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Glide_path_transmitters#/media/File:Gleitwegsen_der_f%C3%BCr_Runway_32R.jpg). [Último acceso: 4 mayo 2021]. Licencia: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>
- [39] Wikipedia, «Wikimedia commons,» [En línea]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Funkfeuer-Heringsdorf.jpg>. [Último acceso: 5 mayo 2021]. Licencia: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>
- [40] Telectronika. El Blog de las Telecomunicaciones, Redes y Tecnología., «Cálculo de Atenuación en el Espacio Libre,» [En línea]. Available: <https://www.telectronika.com/herramientas/perdida-en-el-espacio-libre/>. [Último acceso: 6 mayo 2021].
- [41] UIT-R, «RECOMENDACIÓN UIT-R P.525-2. CÁLCULO DE LA ATENUACIÓN EN EL ESPACIO LIBRE,» 1978-1982-1994.
- [42] M. J. M. Ayora, *Tema 5. Radiopropagación. Complementos de Transmisión por Línea y Radio*, Primer Cuatrimestre 2020/2021.
- [43] C. P. Vega, «Capítulo 11. Propagación,» Universidad de Cantabria, pp. 401-479.
- [44] UIT-R, «RECOMENDACIÓN UIT-R P.526-15. Propagación por difracción.» 1978-1982-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2005-2007-2009-2012-2013-2018-2019.
- [45] Universidad Miguel Hernández de Elche, «Difracción,» [En línea]. Available:

- <http://rsefalicante.umh.es/TemasOndas/Ondas10.htm>. [Último acceso: 6 mayo 2021].
- [46] ITU-R, «ITU-R P.528-3 Aeronautical Propagation Model Guide,» 2016.
- [47] ATDI - Technical support, «Radio Propagation in ATDI Tools - Release number 3.0».
- [48] UIT-R, «RECOMENDACIÓN UIT-R P.528-3. Curvas de propagación para los servicios móvil aeronáutico y de radionavegación aeronáutica que utilizan las bandas de ondas métricas, decimétricas y centimétricas.» 1978-1982-1986-2012.
- [49] UIT-R, «RECOMENDACIÓN UIT-R P.528-4. Método de predicción de la propagación para los servicios móvil aeronáutico y de radionavegación aeronáutica que utilizan las bandas de ondas métricas, decimétricas y centimétricas.» 1978-1982-1986-2012-2019.
- [50] Wikipedia, «Baliza no direccional» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Baliza_no_direccional. [Último acceso: 6 mayo 2021].
- [51] Wikipedia, «GBAS» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/GBAS>. [Último acceso: 6 mayo 2021].
- [52] Wikipedia, «Equipo medidor de distancia» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/GBAS>. [Último acceso: 6 mayo 2021].
- [53] Ciencia y Poder Aéreo (Cienc. Poder Aéreo) - Revista Científica de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana, «Enlaces de datos en vhf (vdl) dentro del contexto CNS/ATM para la prestación de los servicios de tránsito aéreo en colombia,» [En línea]. Available: <https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/article/view/21/122>. [Último acceso: 6 mayo 2021].
- [54] Wikipedia, «Sistema de aterrizaje por microondas,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_aterrizaje_por_microondas. [Último acceso: 6 mayo 2021].
- [55] Textos Científicos.com, «Modulación de Frecuencia - FM,» [En línea]. Available: <https://www.textoscientificos.com/redes/modulacion/frecuencia>. [Último acceso: 6 mayo 2021].
- [56] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, *Real Decreto 964/2006, de 1 de septiembre, por el que se aprueba el Plan técnico nacional de radiodifusión sonora en ondas métricas con modulación de frecuencia.*, 18 de septiembre de 2006.
- [57] Centro Internacional de Adiestramiento de Aviación Civil (CIAAC), «Aviónica moderna,» [En línea]. Available: <http://cursobasicoiva-a.weebly.com/3-avioacutenica-moderna.html>. [Último acceso: 8 mayo 2021].
- [58] Guía Informativa del Aeropuerto de Sevilla-San Pablo (SVQ) - Web No Oficial, «Aeropuerto de Sevilla (SVQ),» [En línea]. Available: <https://www.sevilla-airport.com/es/>. [Último acceso: 8

- mayo 2021].
- [59] Aeropuerto de Sevilla © 2021, «Aeropuerto de Sevilla. Información - Contacto - Datos generales» [En línea]. Available: <https://www.aeropuerto-sevilla.com/info-aeropuerto-sevilla.htm>. [Último acceso: 8 mayo 2021].
- [60] Aeropuerto de Sevilla © 2021, «Mapas del aeropuerto.» [En línea]. Available: <https://www.aeropuerto-sevilla.com/mapas-aeropuerto.htm>. [Último acceso: 8 mayo 2021].
- [61] OurAirports, «Sevilla Airport (SVQ, LEZL)» [En línea]. Available: <https://ourairports.com/airports/LEZL/>. [Último acceso: 8 mayo 2021].
- [62] OurAirports, «Sevilla VOR-DME (SVL)» [En línea]. Available: https://ourairports.com/navaids/SVL/Sevilla_VOR-DME_ES/. [Último acceso: 8 mayo 2021].
- [63] Aeropuerto de Sevilla © 2021, «Terminal del aeropuerto de Sevilla San Pablo.» [En línea]. Available: <https://www.aeropuerto-sevilla.com/terminal-aeropuerto-sevilla.htm>. [Último acceso: 8 mayo 2021].
- [64] Wikipedia, «Wikimedia commons.» [En línea]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anex_of_SVQ_Terminal.jpg. [Último acceso: 8 mayo 2021]. Licencia: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en>.
- [65] SkyVector - Aeronautical Charts, «LEZL - Sevilla Airport,» [En línea]. Available: <https://skyvector.com/airport/LEZL/Sevilla-Airport>. [Último acceso: 8 mayo 2021].
- [66] Google, «Google Maps,» [En línea]. Available: <https://www.google.es/maps/@37.4276126,-5.7623493,77m/data=!3m1!1e3>. [Último acceso: 8 05 2021].
- [67] División Española de IVAO, «FICHA RESUMEN DE PROCEDIMIENTOS DE AERÓDROMO SEVILLA - LEZL,» 2020.
- [68] OACI - International Civil Aviation Organization, «Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation - Aeronautical Telecommunications. Volume I: Radio Navigation Aids.» 2006.
- [69] OACI - International Civil Aviation Organization, «Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation - Aeronautical Telecommunications. Volume V: Aeronautical Radio Frequency Spectrum Utilization.» 2013.
- [70] Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, *Práctica 2: Introducción a HTZ Communications de ATDI. TECNOLOGÍAS DE PLANIFICACIÓN DE SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIÓN. Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación.*, Sevilla, 2020/2021.