

GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE
TELECOMUNICACIÓN



Trabajo Fin de Grado

Estudio de sistemas IFF de corto alcance.
Propuesta de una arquitectura



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR

Autor: Sergio Moreno Herráez

Tutora: M^a Pilar Jarabo Amores

Cotutor: Diego Fermín Vilca Ureta

2023

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
Escuela Politécnica Superior

GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN

Trabajo Fin de Grado

Estudio de sistemas IFF de corto alcance.
Propuesta de una arquitectura

Autor: Sergio Moreno Herráez

Tutora: M^a Pilar Jarabo Amores

Co-tutor: Diego Fermín Vilca Ureta

TRIBUNAL:

Presidente: Nerea del Rey Maestre

Vocal 1º: Silvia Jiménez Fernández

Vocal 2º: M^a Pilar Jarabo Amores

2022-2023

Agradecimientos

En primer lugar, quiero dar las gracias a mi tutora M^a Pilar Jarabo por aconsejarme y guiarme durante estos últimos pasos en mi etapa universitaria y en la elaboración de este proyecto.

También querría agradecer al departamento IFF de Indra por ayudarme y enseñarme todo lo aprendido sobre los radares, en especial a Diego Vilca y a mis compañeros por acogerme como uno más y ofrecerme siempre su ayuda para solventar los problemas que surgen al trabajar en un laboratorio.

Por último, y los más importantes, a mis amigos y familia. Especialmente a mis padres Ernesto e Irene, a mi hermano Álvaro y mi pareja Ana, por apoyarme en todas las decisiones que he tomado, animarme a seguir en los momentos complicados y siempre estar a mi lado. Sin vosotros todo esto no sería posible.

Ana, Álvaro. Vais a ser unos increíbles sanitarios.

A mis abuelos.

Índice

1	HISTORIA Y CONTEXTO DE LOS SISTEMAS RADAR.....	1
1.1	INTRODUCCION.....	1
1.2	RADAR PRIMARIO DE VIGILANCIA.....	3
1.3	RADAR SECUNDARIO DE VIGILANCIA.....	5
1.3.1	Antenas en los radares secundarios.....	6
1.3.2	Interrogaciones en SSR.....	8
1.3.3	Respuestas en SSR.....	10
2	SISTEMAS IFF.....	13
2.1	SISTEMAS IFF DE VIGILANCIA Y LARGO ALCANCE.....	13
2.2	SISTEMAS IFF DE CORTO ALCANCE.....	15
2.3	DIFERENCIAS ENTRE SISTEMAS.....	18
3	REQUISITOS PARA UN SISTEMA IFF DE CORTO ALCANCE.....	21
3.1	ANÁLISIS DE VIABILIDAD.....	21
3.1.1	Viabilidad técnica.....	21
3.1.2	Viabilidad financiera.....	21
3.1.3	Viabilidad del mercado.....	22
3.1.4	Viabilidad operativa.....	22
3.2	REQUISITOS DEL PRODUCTO.....	22
3.2.1	Descripción general.....	23
3.2.2	Estados y modos.....	23
3.2.3	Capacidades del sistema.....	24
4	PROPUESTA DE ARQUITECTURA.....	35
4.1	FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	37
4.2	BLOQUE DE PROCESADO.....	38
4.3	BLOQUE DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN.....	39
4.3.1	Generación de señales.....	40
4.3.2	Recepción de señales.....	40
4.4	BLOQUE DE AMPLIFICACIÓN Y CONMUTACIÓN.....	40
5	CONCLUSIONES.....	43
5.1	Líneas futuras de trabajo.....	43
	BIBLIOGRAFÍA.....	45

Índice de figuras

Figura 0. 1. Arquitectura básica de un sistema IFF [17].	xviii
Figura 1.1 Comparativa de los sistemas radar.	1
Figura 1.2 Representación de un sistema radar primario de vigilancia [4].	4
Figura 1.3 Representación de un sistema radar secundario de vigilancia [4].	5
Figura 1.4 Diagrama de radiación. Haces de interrogación y control [3].	6
Figura 1.5 Tipos de antena monopulso [6].	7
Figura 1.6 Monopulso por comparación en amplitud y señal de error [19].	7
Figura 1.7 Monopulso por comparación en fase	8
Figura 1.8 Pulsos de interrogación en Modos SIF [15].	9
Figura 1.9 Pulsos de interrogación en Modo S [15].	10
Figura 1.10 Pulsos de respuesta en Modo SIF [15].	11
Figura 1.11 Pulsos de respuesta en Modo S [15].	11
Figura 2.1 Radar Lanza LTR-25 [7].	14
Figura 2.2 Radar TPY-4 [8].	15
Figura 3.1. Estados de operación.	24
Figura 3.2 Función ISLS [15].	28
Figura 3.3 Función RSLs [15].	29
Figura 3.4. Ventana deslizante [6].	30
Figura 3.5 Monopulso [6].	31
Figura 4.1 Sistema IFF de corto alcance.	35
Figura 4.2 Diagrama de bloques.	36
Figura 4.3 Secciones de una fuente de alimentación conmutada [13].	38
Figura 4.4 Diagrama del bloque transmisión/recepción.	39
Figura 4.5 Esquemático de la sección de generación de señales.	40
Figura 4.6 Esquemático de la sección de recepción de señales.	41
Figura 4.7 Esquemático de las secciones de amplificación y conmutación.	41

Índice de tablas

Tabla 1-1 Modos de interrogación.....	8
Tabla 1-2 Modos de respuesta.....	10
Tabla 2-1 Características de sistemas IFF de corto alcance.....	17
Tabla 2-2 Comparativa entre los sistemas IFF de largo y corto alcance.....	18
Tabla 3-1 Datos sobre el transpondedor.....	25
Tabla 3-2 Pérdidas por propagación.....	25
Tabla 3-3 Datos sobre la estación terrena radar.....	26
Tabla 3-4 Datos sobre el enlace.....	26
Tabla 3-5 Resultados del enlace de bajada.....	27
Tabla 3-6 Resultados del enlace de subida.....	27

Lista de acrónimos

AC	Alternating Current
AESA	Active Electronically Scanned Array
ASTERIX	All Purpose Structured Eurocontrol Radar Information Exchanges
ATC	Air Traffic Control
BOE	Boletín Oficial del Estado
COAAAS	Centro de Artillería Antiaérea Semiautomático
DC	Direct Current
FRUIT	False Replies Unshynchronized to Interrogator Transmission
HPA	High Power Amplifier
IISLS	Improved Interrogation Sidelobe Suppression
IFF	Identification Friend or Foe
ISLS	Interrogation Sidelobe Suppression
LVA	Large Vertical Antenna
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time To Repair
PRF	Pulse Repetition Frequency
PSR	Primary Surveillance Radar
RF	Radio Frequency
RSLS	Reply path Side Lobe Suppression
SHORAD	Short Range Air Defence
SLS	Side Lobe Suppression
SPI	Special Purpose Identification
SSR	Secondary Surveillance Radar

Resumen

Con la creciente demanda de nuevos sistemas radar capaces de operar en situaciones y lugares de conflicto, surge la posibilidad de desarrollo de nuevos sistemas radar de corto alcance. Este Trabajo Fin de Grado tiene la finalidad de realizar una propuesta de sistema con estas características, así como la de presentar los conceptos relacionados con los radares e interrogadores.

Como punto de partida se introducen los términos y precedentes disponibles en el mercado actual de los radares, más concretamente en los sistemas radar IFF (*Identification Friend or Foe*) dado que será la tecnología empleada para la propuesta de sistema radar de corto alcance.

Seguidamente se desarrollan las características y especificaciones para que dicho sistema opere de manera óptima y cumpla la normativa específica para esta clase de sistema radar, concluyendo con una propuesta de diseño final del sistema radar IFF de corto alcance, que incluye diferentes bloques de operación detallando su funcionamiento y prestaciones.

Palabras clave

IFF, radar, corto alcance, requisitos, arquitectura, interrogador, blanco.

Abstract

With the growing demand for new radar systems capable of operating in situations and places of conflict, the possibility of developing new short-range radar systems arises. This Bachelor Thesis has the purpose of making a proposal for a system with these characteristics, as well as presenting the concepts related to radars and interrogators.

As a starting point, the terms and precedents available in the current radar market are introduced, more specifically in IFF (Identification Friend or Foe) radar systems, since it will be the technology used for the short-range radar system proposal.

Next, the characteristics and specifications are developed so that said system operates optimally and complies with the specific regulations for this class of radar system, concluding with a final design proposal for the short-range IFF radar system, which includes different operation blocks detailing its operation and benefits.

Key Words

IFF, radar, short range, requirements, architecture, interrogator, target.

Resumen extendido

El presente TFG (*Trabajo Fin de Grado*) se centra en el diseño y presentación de una propuesta de arquitectura para un sistema IFF (*Identification Friend or Foe*) de corto alcance.

Para poder llevar a cabo dicha propuesta, previamente habrá que comprender e introducir algunos elementos y definiciones como son el de radar, radar primario y radar secundario. Para ello, en la primer parte del trabajo se abordan estos temas.

Los radares secundarios son sistemas de identificación de blancos colaborativos que se basan en la comunicación entre el radar y el avión [1] [3]. Los sistemas militares reciben el nombre de IFF y fueron los precursores de los actuales radares secundarios civiles. Éste dispone de un sistema de transmisión-recepción (transpondedor) que recibe las señales emitidas por el transmisor radar secundario (interrogaciones) y responde a una frecuencia diferente aportando información sobre el propio avión, como el código de vuelo o la altitud. La metodología para la determinación de la distancia y posición del blanco es la misma que en los radares primarios. La diferencia principal entre un radar secundario y primario es que, en un radar primario, la señal recibida es el resultado de la dispersión de la energía incidente sobre la estructura del blanco hacia el radar, por lo que no se establece ningún enlace de comunicaciones.

Una vez introducidos los principales términos y conceptos, la siguiente parte del proyecto se centra en el estudio y las diferencias entre sistemas IFF de corto alcance y los sistemas IFF de vigilancia y largo alcance.

Los sistemas militares, IFF o Identificación Amigo-Enemigo, utilizan formas de onda y técnicas de modulación y codificación para que sean los vehículos amigos los que responderán a las interrogaciones permitiendo diferenciarlos de los enemigos. Otra característica muy importante es la necesidad de que las fuerzas hostiles no puedan utilizar el sistema en su beneficio. La utilización de códigos clave y técnicas criptográficas garantizan los requisitos de seguridad. La arquitectura básica para un sistema IFF es la recogida en la Figura 0. 1.

Se presenta un estudio detallado de estos sistemas, aportando ejemplos de sistemas actuales ofreciendo una mejor visión a cerca de esta clase de sistemas para así comprender el propósito del sistema radar de corto alcance sobre el cual se desarrolla el TFG.

Una vez definido el marco de estudio, los posteriores puntos del TFG se encargarán de explicar y detallar la propuesta de arquitectura para el sistema IFF de corto alcance.

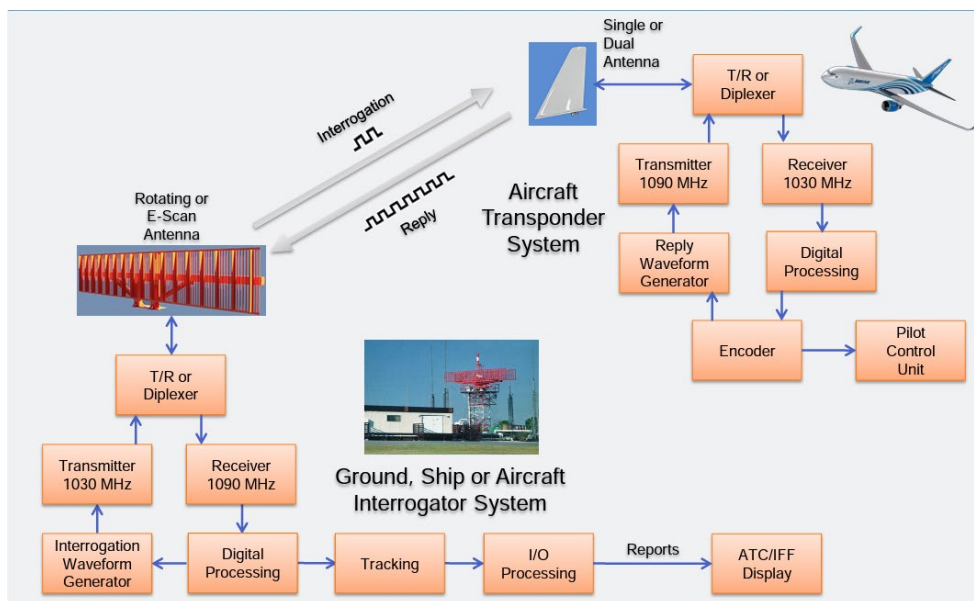


Figura 0. 1. Arquitectura básica de un sistema IFF [17].

El capítulo 3 recoge los requisitos para comenzar a diseñar el sistema radar. La definición de los requisitos a la hora de diseñar y llevar a cabo una arquitectura referente a cualquier tipo de sistema es de vital importancia, así como el análisis de viabilidad.

En primer lugar el análisis de viabilidad ofrece una visión del futuro que puede tener el producto a desarrollar, en función del mercado actual, así como las capacidades de la empresa dedicada a su fabricación. Los requisitos, por otra parte, detallarán y presentarán las funcionalidades y prestaciones del sistema, los cuales definirán condiciones y restricciones en el diseño del mismo.

Como parte final del TFG, teniendo en cuenta todo lo ya descrito y cumpliendo con la normativa y requisitos, el capítulo 4 presenta una primera arquitectura, donde se abordan los principales bloques para la realización de las operaciones de transmisión y recepción de las señales. Estos bloques serán los encargados de llevar a cabo las funciones del interrogador propuesto y cumplirán los requisitos definidos.

Finalmente, como cierre del TFG se aporta el capítulo 5 de conclusiones, donde se describen los objetivos cumplidos en el proyecto y la viabilidad del mismo. Además, se explican las líneas futuras de trabajo para un proyecto de estas características y los pasos que seguirá el sistema hasta llegar finalmente a su operación real.

1 HISTORIA Y CONTEXTO DE LOS SISTEMAS RADAR.

1.1 INTRODUCCION.

El término radar es un acrónimo de Radio Detection And Ranging, y hace referencia a la detección de objetos por medio de ondas electromagnéticas, transmitiendo una señal y extrayendo información de los blancos a partir de la energía dispersada por los mismos en la dirección del receptor radar [1].

Dentro de los sistemas radar podemos distinguir entre radares de vigilancia primarios y secundarios. Sin embargo, generalmente ambos se emplean de manera simultánea en sistemas localizados en aeropuertos o aeródromos. La principal diferencia entre ambos sistemas es el carácter cooperativo o no cooperativo del blanco: en los radares secundarios el blanco emite una señal de respuesta, estableciendo un proceso de comunicación, mientras que el primario esto no ocurre.

En este capítulo se introducirán los principios de funcionamiento de ambos sistemas representados en la Figura 1.1 Comparativa de los sistemas radar. para una mayor comprensión de los posteriores puntos de estudio, en los cuales se basará este proyecto.

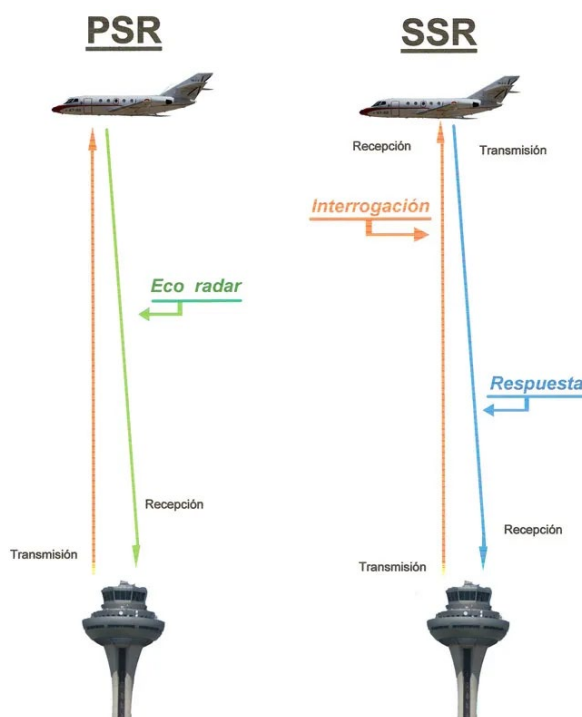


Figura 1.1 Comparativa de los sistemas radar.¹

La Figura 1.1 presenta de una forma visual e intuitiva las diferencias entre los sistemas ya mencionadas, donde por parte del sistema de Radar Primario o PSR (por sus siglas en inglés *Primary Surveillance Radar*) la señal de respuesta recibida por la estación radar es un eco generado por la estructura de la aeronave, por lo que mantendrá la misma forma de onda con

¹ Figura 1-1 obtenida de <https://www.gacetaaeronautica.com/gaceta/wp-101/?p=5748> Último acceso: 31-08-2023

variaciones de amplitud y fase generadas por la propagación de la onda electromagnética y el proceso de dispersión al incidir la señal radar sobre el blanco. En el sistema de radar secundario o SSR (del inglés *Secondary Surveillance Radar*) el blanco genera una señal como respuesta a la interrogación con la información solicitada, participando de manera activa en la comunicación entre estación radar y blanco.

Tras una breve introducción y aproximación a los sistemas radar, es necesario conocer algo de historia y de dónde surge este método para localización e identificación de blancos, que supuso un gran avance en estas tecnologías y sentó las bases de los sistemas actuales.

Pese a no saber con exactitud quién inventó el radar ni cuándo se produjo este descubrimiento, en 1885 Thomas Edison empleaba las radiocomunicaciones para prevenir colisiones en el mar. Años después, en 1904, Edouardo Branley, Christian Hulsmeyer y Nikola Tesla, de manera independiente y con base en el estudio anterior, emplearon un equipo previamente usado a una frecuencia de 600 MHz [1].

En 1935, Robert Watson-Watt, físico escocés, patentó el radar. Pese a no ser el inventor, su trabajo sirvió para que el Reino Unido tomara la decisión de instalar sistemas radar en la costa con el fin de localizar aviones enemigos, siendo fundamental para lograr la victoria en la II Guerra Mundial por parte de las fuerzas británicas y los aliados [2].

El uso de los radares, por tanto, cobra mayor importancia y comienza con su desarrollo a raíz de este hito histórico dada la importancia militar de estos equipos. La capacidad de detección de blancos en este momento se producirá ya de una forma cooperativa, donde el equipo receptor de la señal emitida desde tierra participa de manera activa en la comunicación, respondiendo con un mensaje que contendrá diferentes datos referentes a la aeronave. Durante la guerra, esta capacidad de detección era muy preciada, ya que permitía identificar blancos amigos o enemigos. Estos sistemas con capacidad de emisión de señales desde tierra en dirección a las aeronaves para su identificación se denominaron IFF, por sus siglas en inglés *Identification Friend or Foe* y son el origen de los sistemas civiles denominados Radares Secundarios (SSR).

A partir de aquí, el uso de los sistemas radar es múltiple y abarca una gran cantidad de campos de operación además del militar. Las aplicaciones del radar hoy en día engloban el control de tráfico aéreo (ATC, del inglés *Air Traffic Control*), sistemas de defensa aérea, así como sistemas antimisiles, predicción del tiempo, detección de basura espacial e incluso es extendido a otros campos como el marítimo y terrestre.

A mediados de la década de 1960, el uso de los radares secundarios había logrado una gran expansión, que dio lugar a la aparición de los primeros problemas y la necesidad de una mayor regulación y control. Un mayor flujo del tráfico aéreo generará efectos indeseados como el garbling o el FRUIT (del inglés, *False Replies Unshynchronized to Interrogator Transmission*). De igual modo, y con el paso del tiempo, el aumento y la aparición de los sistemas de vigilancia y de aeropuertos produjeron un mayor uso del espectro dando lugar a sobre-interrogaciones. Este efecto se produce cuando las estaciones radar situadas en tierra emiten un elevado número de señales de interrogación hacia las aeronaves, generando un gran número de respuestas hasta el punto de hacer que los sistemas no sean eficientes.

Las respuestas recibidas a través de los lóbulos secundarios de los diagramas de radiación de las antenas del radar secundario son otro problema por resolver, al igual que otros muchos factores que surgen de la aparición de una tecnología y su implantación.

Con el objetivo de unificar protocolos de comunicación globales, se crea en 1969 el Air Traffic Control Advisory, en el que se sentarán las bases sobre los siguientes términos:

- Las frecuencias 1030 MHz y 1090 MHz deberán ser empleadas para mantener la compatibilidad de los sistemas existentes.
- Los nuevos sistemas deberán incluir un par de pulsos para impedir que los sistemas existentes intenten decodificar las interrogaciones.
- Las interrogaciones deberán contenerse dentro de los 30 μ s para cumplir con el periodo de supresión del sistema.
- Interrogación y respuesta deberán incluir paridad para evitar problemas de errores de transmisión debido a señales interferentes.
- Tanto los datos de identidad como de altura de la aeronave deberán incluirse en las respuestas para evitar problemas.
- La información necesaria para actualizar la pista de la aeronave debe obtenerse de una sola respuesta de la aeronave, lo cual requerirá de técnicas de monopulso [1].

Una vez introducidos los términos IFF y SSR, es interesante detenerse en ellos y ver qué los diferencia. La principal diferencia está relacionada con las formas de onda, modos de operación y la encriptación de las señales emitidas y recibidas en el ámbito militar para mayor seguridad en las comunicaciones y para evitar posibles engaños por parte del enemigo. Pese a estas diferencias los sistemas IFF deben garantizar la compatibilidad con los sistemas civiles (SSR).

1.2 RADAR PRIMARIO DE VIGILANCIA.

Un sistema radar primario de vigilancia (PSR) sitúa a los blancos respecto de la estación radar, determinando su acimut y distancia. Figura 1.2 Representación de un sistema radar primario de vigilancia [4]. Para lograrlo, el radar consta de una antena giratoria con un diagrama de radiación caracterizado por un haz estrecho en acimut y amplio en elevación (radares 2D) o un haz estrecho en acimut y en elevación (radares 3D), la cual transmite un pulso de radiofrecuencia y recibe como respuesta la energía reflejada o dispersada por los blancos cuando esta señal incide sobre ellos. La energía es recibida por la misma antena, siendo el sistema capaz de situar en blanco en función del tiempo que transcurre entre la transmisión y recepción de la energía, y a partir de la dirección de apuntamiento de la antena en el instante de transmisión del pulso.

Una de las grandes ventajas que presenta este sistema frente a SSR es que no requiere de ningún dispositivo en la aeronave para la recepción y decodificación de la interrogación y la transmisión de la respuesta; el blanco dispersa la señal en función de sus propiedades físicas y eléctricas. Este modo de operación permite extender la aplicación de los sistemas radar primarios a tareas de teledetección y a aplicaciones meteorológicas. Por el contrario, presenta algunos inconvenientes los cuales se han de tener en cuenta a la hora de tomar la decisión de instalar este tipo de sistema, el cuál puede recibir reflexiones erróneas como la de animales u objetos que se encuentren en la trayectoria de la señal, además de la imposibilidad de identificar la aeronave concreta para verificar si está o no autorizada.

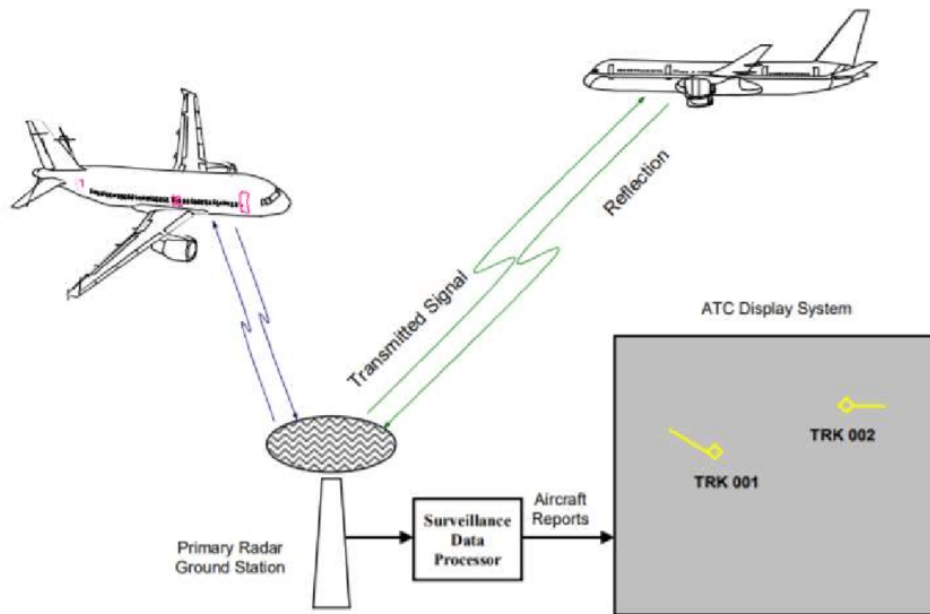


Figura 1.2 Representación de un sistema radar primario de vigilancia [4].

Se denomina clutter a la energía dispersada por todos aquellos elementos que reciben la onda transmitida por el radar y generan ecos como los de los blancos que se desean detectar. Los ecos radar generados por objetos no deseados constituyen señales interferentes que se suman al ruido de la cadena receptora y complican el proceso de detección de los blancos deseados.

A estos problemas se suman otros factores como la complejidad asociada al diseño y desarrollo de sistemas 3D capaces de estimar la altitud de los blancos, los elevados requisitos de resolución y complejas técnicas de procesamiento necesarios para la clasificación del tipo de blanco, siendo imposible determinar la aeronave concreta; las elevadas potencias transmitidas y los costes de desarrollo, despliegue y mantenimiento, con respecto a los sistemas SSR.

Para comprender los factores que afectan al funcionamiento del radar y como herramienta de gran utilidad para determinar la máxima distancia a la que un radar puede detectar un blanco, se deberá tener en cuenta la ecuación radar (1). Esta expresión matemática relaciona la distancia a la que un radar presenta unas características de funcionamiento específicas, con los parámetros que caracterizan al sistema radar, al blanco y al entorno [2].

$$P_r(W) = \frac{P_t \cdot G}{4\pi R^2} \cdot \sigma_{RCS} \cdot \frac{1}{4\pi R^2} \cdot A_{eff} \quad (1)$$

La expresión (1) incluye los siguientes parámetros:

- P_r es la potencia recibida.
- P_t es la potencia transmitida.
- G es la ganancia de la antena transmisora.
- R es la distancia entre la antena transmisora y el blanco.
- σ_{RCS} es la sección radar del blanco (parámetro que relaciona la potencia que recibe el radar en relación a la que incide sobre el objeto).
- A_{eff} es el área efectiva de la antena.

Aunque esta ecuación nos presenta una aproximación no del todo precisa, pues no contempla efectos producidos por ruido o pérdidas tanto en el sistema como en la propagación de las señales, nos permite ver la relación existente entre las potencias de transmisión y recepción, y cómo estas últimas serán considerablemente menores.

1.3 RADAR SECUNDARIO DE VIGILANCIA

Un sistema radar secundario de vigilancia (SSR) sitúa a los blancos gracias a la cooperación entre el radar y la aeronave, los cuales establecen enlaces radar-avión y avión-radar en frecuencias diferentes y con formas de onda bien definidas. Esto implica la necesidad de instalar un equipo en las aeronaves conocido como transpondedor [16].

Figura 1.3 Representación de un sistema radar secundario de vigilancia [4]. La señal emitida desde la antena situada en tierra, más conocida como interrogación, es transmitida con una frecuencia de 1030 MHz; la señal emitida por el transpondedor de la aeronave o respuesta, radiada a 1090 MHz. La interrogación transmitida está compuesta por pulsos codificados que se decodifican en el transpondedor de la aeronave para generar la respuesta codificada con la información de interés como altitud, posición, características de vuelo, etc.

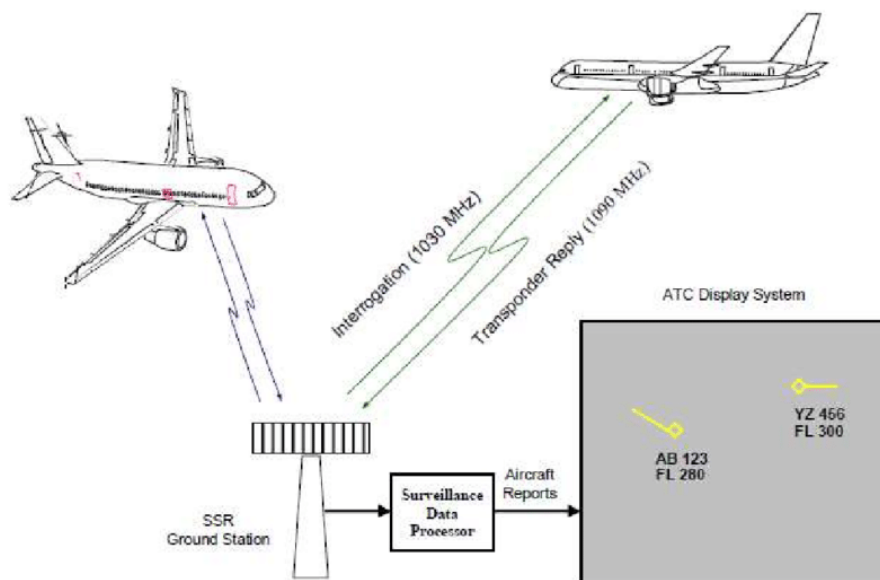


Figura 1.3 Representación de un sistema radar secundario de vigilancia [4].

Los sistemas radar secundarios de vigilancia se pueden clasificar en dos tipos dependiendo de los modos de operación, civil o militar.

- Un radar SSR civil tendrá la capacidad de interrogar en Modos SIF (1, 2, 3/A, C) y modo S.
- Un radar SSR militar tendrá la capacidad de interrogar en modos 4 y 5. Para poder llevar a cabo las interrogaciones en estos modos se requiere de una unidad criptográfica empleada para encriptar la información de la señal, logrando determinar si los blancos detectados son amigos o enemigos.

1.3.1 Antenas en los radares secundarios.

Las antenas empleadas en los sistemas SSR se componen de dos haces principales, un haz de interrogación y otro de control (Figura 1.4). El haz de interrogación tiene una alta ganancia y un lóbulo principal estrecho junto con lóbulos laterales bajos. Por otra parte, el haz de control presenta una ganancia mucho menor, y un ancho de haz mucho mayor con un nulo en la dirección de apuntamiento del haz de interrogación. El transpondedor de la aeronave compara las señales que transmiten ambas antenas y sólo responde cuando la de la interrogación es mayor que la de control.

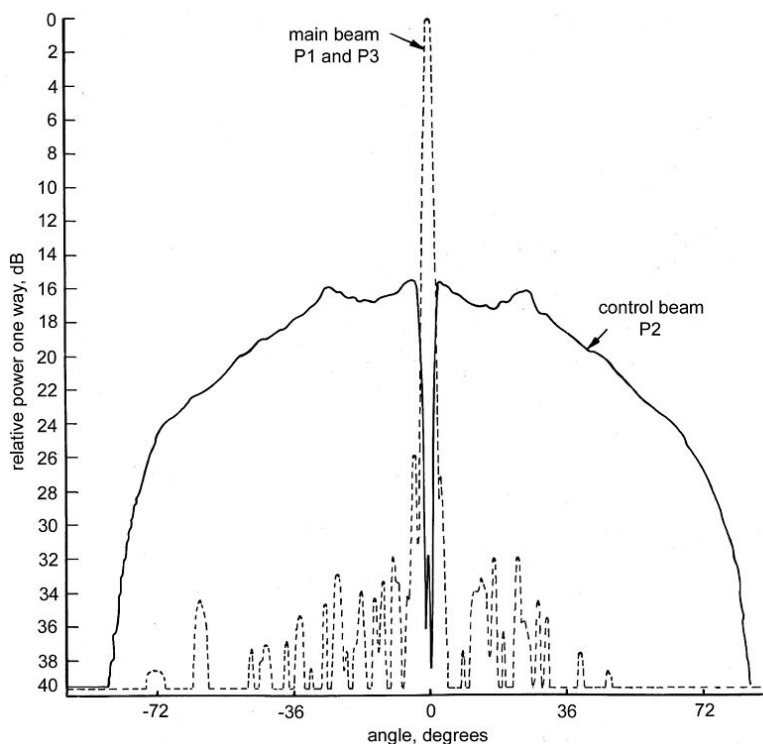


Figura 1.4 Diagrama de radiación. Haces de interrogación y control [3]

Las antenas empleadas en los sistemas radar SSR pueden tener un tercer haz, el diferencia, que junto con el suma (haz de interrogación) permite implementar la técnica monopulso para estimar la dirección de llegada del eco dentro de la celda de resolución del sistema.

Esta función monopulso es una técnica para la medición precisa del ángulo de llegada de una señal. El nombre viene dado por la capacidad de determinar el acimut o ángulo de elevación de llegada a partir de un solo pulso de respuesta.

Se pueden diferenciar dos tipos de antena con función monopulso, las de amplitud y las de fase. Las antenas de monopulso en amplitud se configuran con dos lóbulos de radiación con el mismo centro de fase pero apuntando a diferentes direcciones (Figura 1.5 a). Las señales S_1 y S_2 se combinan para la obtención de las señales suma, $\Sigma = S_1 + S_2$, y diferencia, $\Delta = S_1 - S_2$, que se utilizarán para estimar el error o la desviación del ángulo de llegada del eco del blanco respecto de la dirección de apuntamiento de la antena (6). Esto permite posteriormente su corrección y situar el blanco en la posición precisa en la que se encuentra.

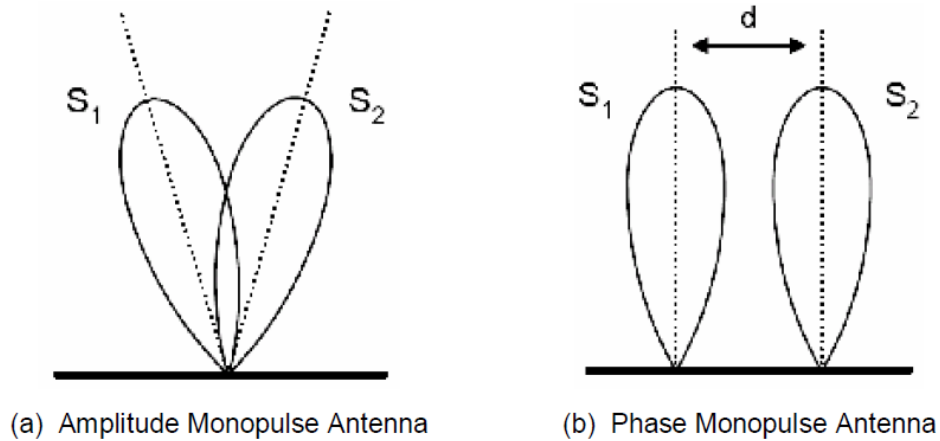


Figura 1.5 Tipos de antena monopulso [6].

$$\Theta = \frac{|\Delta|}{|\Sigma|} \cos(\phi_{\Sigma} - \phi_{\Delta}) \quad (6)$$

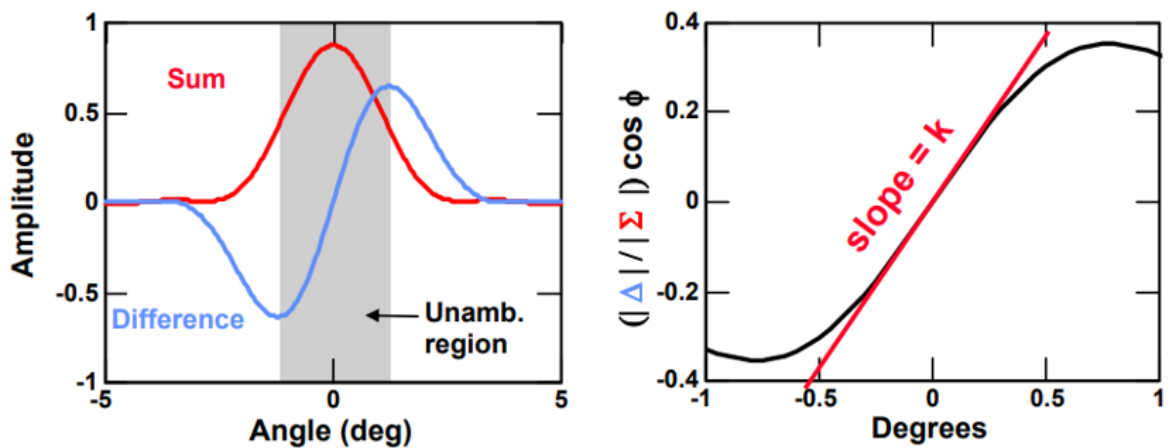


Figura 1.6 Monopulso por comparación en amplitud y señal de error [19].

La Figura 1.6 muestra las señales suma y diferencia en el momento de la recepción de una respuesta, además en también se puede apreciar el resultado obtenido de calcular la función error ya mencionada. De esta manera podemos situar los blancos a detectar por medio de la función monopulso en amplitud, donde la información de estos blancos se recibe por medio de haces en diferentes direcciones.

En las antenas monopulso de fase los haces apuntan en la misma dirección, pero sus centros de fase son diferentes (Figura 1.5 b)[6]. Mediante la expresión (7) se puede localizar y situar los blancos detectados. A diferencia de la función monopulso en amplitud, esta recibe la información desde la misma dirección pero con diferentes caminos recibidos (desfases) Figura 1.7.

(7)

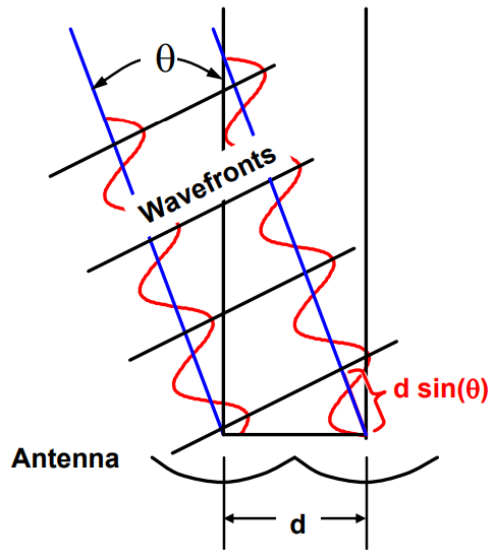


Figura 1.7 Monopulso por comparación en fase

1.3.2 Interrogaciones en SSR.

Comúnmente se conoce como interrogación a la señal transmitida desde la estación terrena con la finalidad de lograr una comunicación con los diversos blancos. Esta comunicación del enlace ascendente trabaja con una frecuencia de 1030 MHz. Esta interrogación está formada por tres pulsos P1, P2 y P3. Los pulsos P1 y P3 son transmitidos por el haz de interrogación o suma, y su espaciado determinará el contenido de los datos que se recibirán como respuesta desde el transpondedor, mientras que el pulso P2 se irradia desde el haz de control.

La amplitud de estos pulsos varía con la dirección de la antena siendo el P2 mayor en todas las direcciones excepto en la del lóbulo principal. Por medio de estas diferencias de amplitud y según las características de la señal recibida en el transpondedor, este tiene la capacidad de determinar si la interrogación se origina en el lóbulo principal o lateral de tal modo que decidirá si requiere de una respuesta o no [3]. Esta funcionalidad se conoce como SLS (*Side Lobe Supression*), inhibiendo de responder al transpondedor cuando no es apuntado por el lóbulo principal de la antena radar.

Modo	Aplicación	Función	T entre P1 y P3 (µseg)
1	Militar	IFF	3 ± 0.2
2	Militar	IFF	5 ± 0.2
3/A	Civil/Militar	Identificación	8 ± 0.2
B	Civil	Identificación	17 ± 0.2
C	Civil	Altitud	21 ± 0.2
D	Civil	Sin asignar	25 ± 0.2

Tabla 1-1 Modos de interrogación.

A continuación, se detallan algunas características acerca los diferentes Modos de operación que se pueden emplear a la hora de interrogar (Tabla 1-1). Los modo SIF (*Selective Identification Feature*) se utilizan para control de tráfico aéreo militar (el civil es el SSR, *Secondary Surveillance*

Radar) engloba a los modos de interrogación 1, 2, 3/A y C. Las interrogaciones consisten en la transmisión de tres pulsos tal y como se detalla en la Figura 1.8:

- Modo 1. Este modo es militar, empleando un código de dos cifras para el control de tráfico aéreo y para determinar el tipo de misión y aeronave.
- Modo 2. Modo con uso militar normalmente empleado para la identificación de una estructura de una aeronave. El código que emplea es de cuatro cifras.
- Modo 3/A. Este modo cuenta con la capacidad de operar en modo civil o militar según se requiera. Emplea un formato de código igual al empleado en Modo 2 para identificación ATC el cuál es asignado por la autoridad aeronáutica.
- Modo C. Es un modo de uso civil, este permite conocer el nivel de altura de vuelo con medida en pies.

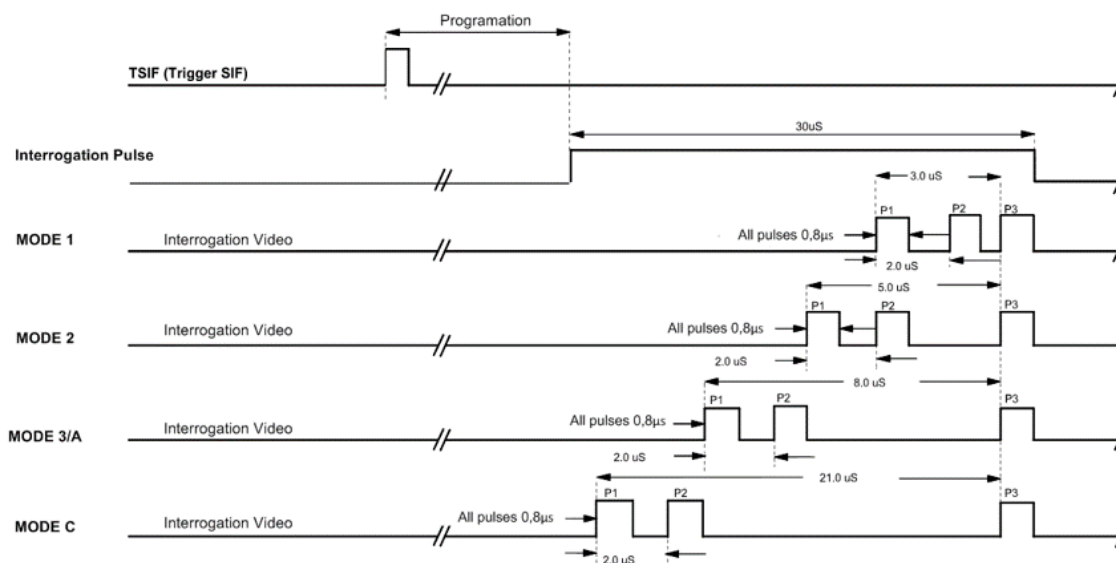


Figura 1.8 Pulsos de interrogación en Modos SIF [15].

El Modo S surge de la necesidad de solucionar ciertos problemas que presentan los modos anteriores, debido al desconocimiento del interrogador ni de la aeronave a la que se dirige una interrogación. En el modo S la interrogación incluye el identificador del interrogador y va dirigida a una aeronave en concreto mediante el uso de su identificador. Este modo permite la realización de squitters, respuestas que se transmiten sin necesidad de haber realizado una interrogación, lo cuales se utilizan en sistemas anticolidión entre aeronaves y para la implementación de técnicas de multilateración.

La señal modo S consta de cuatro pulsos, donde P1 y P2 son pulsos en amplitud, P6 contiene el bloque de datos de información, y P5 tiene la función de supresión de lóbulos laterales (Figura 1.9).

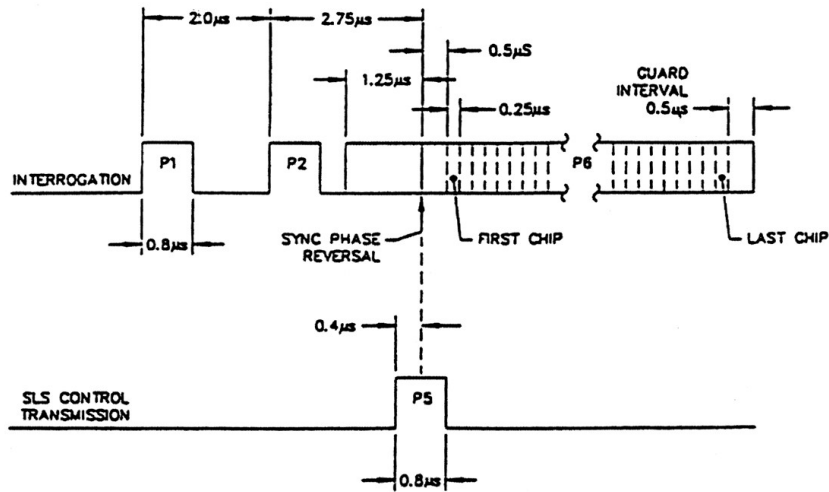


Figura 1.9 Pulsos de interrogación en Modo S [15].

1.3.3 Respuestas en SSR.

Tras recibir la información de la señal de interrogación, el transpondedor emite una señal de respuesta, la cual consiste en un tren de pulsos formando un código octal donde se contiene la información de la respuesta. Del mismo modo que para las interrogaciones, las respuestas tendrán una forma de señal diferente dependiendo del modo en el cual se esté operando, conteniendo los datos necesarios sobre la identificación de la aeronave, altitud, velocidad, etc. En cualquier caso, e independientemente del modo de operación que se esté empleando, la frecuencia para la señal de respuesta de este enlace descendente será de 1090 MHz.

- Modo SIF.

Esta señal de respuesta formada por el tren de pulsos se compone por dos pulsos F1 y F2 los cuales se denominan pulsos de encuadre y contienen a los 12 pulsos donde se encuentra la información de respuesta, estos se designan con A, B, C y D con un sufijo 1, 2 o 4. Finalmente encontramos un pulso el cual es indicador de posición especial, SPI (por sus siglas en inglés, *Special Purpose Identification*) este se utiliza ocasionalmente si es requerido pero no tiene por qué aparecer.

Modo	Código	T de los pulsos (μseg)
1	32	0.45
2	4096	0.45
3/A	4096	0.45
C	2048	0.45

Tabla 1-2 Modos de respuesta.

La Tabla 1-2 muestra los periodos de los puestos de respuesta para los diferentes modos, así como la cantidad de información requerida para cada uno de ellos, recogida en la columna del código, indicando en número de bits necesarios para una correcta decodificación de la señal y obtención de la información.

Dentro de estas respuestas existen tres códigos universales los cuales son de gran valor e importancia. El código 7700 indica emergencia, 7600 fallo en las comunicaciones de radio, y por último para indicar que se está produciendo un secuestro se identifica con el código 7500.

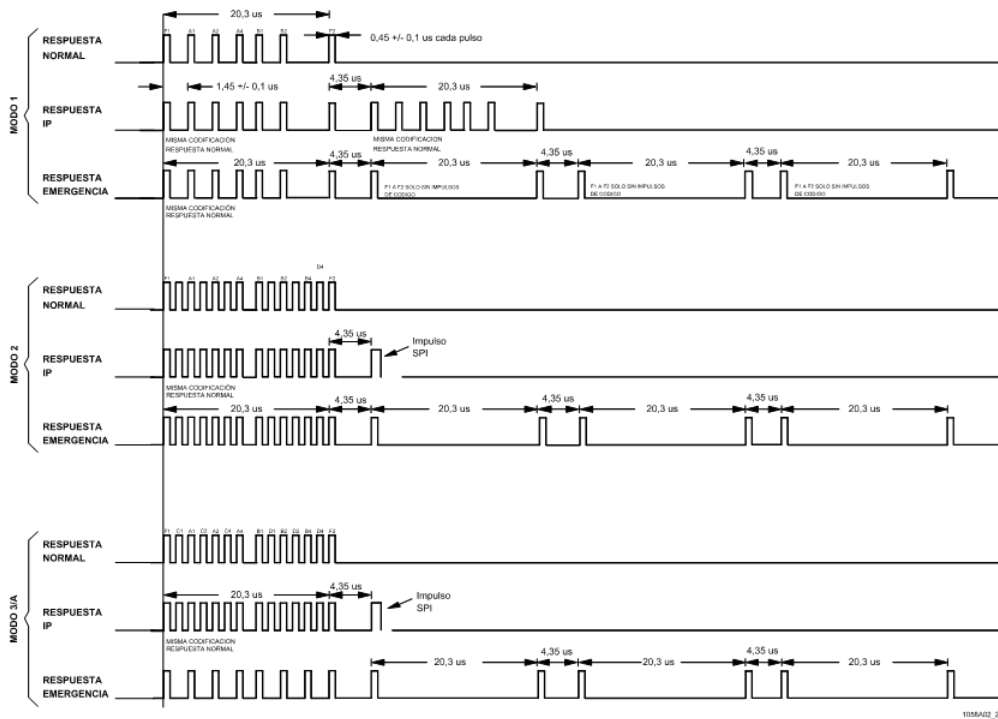


Figura 1.10 Pulsos de respuesta en Modo SIF [15].

De la misma manera que para los pulsos de interrogación ya presentados, la Figura 1.10 recoge la distribución y periodo de los pulsos de respuesta para los Modos SIF, siendo más evidentes las diferencias entre los mismos

- Modo S.

La respuesta de este modo al igual que su interrogación presenta unas características especiales y diferentes a las que se observar para los modos anteriores. Esta señal consta de un preámbulo de cuatro pulsos y, seguido a esto, transcurrido un periodo de tiempo de 8 μ seg tras el primer pulso del preámbulo aparece el bloque de datos donde se encuentra codificada la información.

La Figura 1.11 representa una estructura general sobre las respuestas de este modo y la cuál seguirán todas las señales que se transmitan en Modo S.

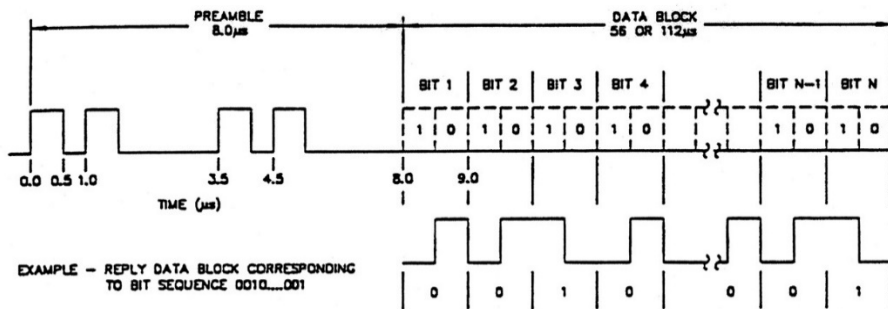


Figura 1.11 Pulsos de respuesta en Modo S [15].

2 SISTEMAS IFF.

2.1 SISTEMAS IFF DE VIGILANCIA Y LARGO ALCANCE.

Los sistemas de vigilancia y largo alcance están diseñados para detectar y rastrear activamente múltiples objetos a largas distancias. Este tipo de sistemas permiten monitorizar continuamente la ubicación de los sistemas aéreos amigos y enemigos dotándolos de multitud de funciones y aplicaciones con grandes beneficios.

Estos sistemas están viendo cómo en la actualidad se están creando nuevas amenazas con unas mejores características, apareciendo sistemas más sigilosos y rápidos que desafían su capacidad. Por este motivo, hoy en día las prestaciones de los sistemas de largo alcance se encuentran en evolución y desarrollo, para garantizar una protección de los espacios aéreos en el ámbito militar. En los servicios de ATC o control de tráfico aéreo, proporcionan a los controladores de tráfico aéreo los servicios necesarios para gestionar la separación entre aeronaves, además de poder solicitar información acerca del vuelo.

Para comprender el funcionamiento de esta clase de sistemas se detallará en este apartado el funcionamiento y algunas de las características principales sobre dos sistemas, el LTR-25 [7] y el TPY-4 [8], ambos englobados dentro de los sistemas militares.

El sistema LTR-25 es un radar de largo alcance tridimensional de estado sólido de última generación desarrollado por Indra (Figura 2.1). Este sistema ha sido diseñado como un radar táctico, con la capacidad de ser transportado por diferentes medios y el cual pertenece a la familia de los Lanza. Un radar táctico además de la capacidad de transporte ya mencionada tiene la particularidad de ofrecer una capacidad de despliegue rápido con el mínimo soporte de personal, así como un desempeño excelente en las condiciones más adversas. Estos pueden ser configurados desde sistemas radar de largo alcance, hasta sistemas de medio alcance o incluso con uso ATC/militar. Esto se consigue por medio de la configuración del software y la consola, permitiendo adaptar el radar a diferentes misiones o amenazas aéreas.

El radar LTR-25 es un radar primario de vigilancia (PSR) con la incorporación de un sistema de identificación amigo o enemigo (IFF) el cual es capaz de proporcionar la identificación de los blancos a través de interrogaciones y el procesamiento de automático de las respuestas recibidas en los diferentes modos de operación, Modos 1, 2, 3/A, C, S y 5. La función del primario es la detección de aquellos blancos no cooperativos dentro de la zona de cobertura, incluyendo datos sobre la altitud además de la distancia y el acimut. Los sistemas SSR y PSR trabajan de forma conjunta ofreciendo una mayor precisión en los datos obtenidos.

Algunas de las características que presenta este radar son: [7]

- Similitud con otros equipos de la familia Lanza.
- Emplea una técnica 3D de haz tipo pincel.
- Operación del radar en banda L.
- Digitalización total de los haces.
- Cobertura múltiple de largo alcance.
- Transmisor y receptor de estado sólido distribuido.
- Técnica de monopulso en acimut y elevación.
- Procesador de datos y de señal digital.
- Capacidades anti clutter.



Figura 2.1 Radar Lanza LTR-25 [7].

- Alta disponibilidad.
- Detección y aislamiento automático de fallos.
- Radar táctico.
- Consola de control del radar tanto remota como local (LRCC).

El radar TPY-4 de la compañía estadounidense Lockheed Martin, es un radar de defensa aérea de largo alcance con la capacidad de ser transportable u operar en instalaciones fijas. Este radar proporciona las capacidades necesarias en la actualidad para contrarrestar las amenazas, que cada vez son un mayor reto, y con una gran flexibilidad para ajustarse a las exigencias del entorno. Además, su diseño permite la capacidad de integración en los equipos de defensa aérea ya existentes y presenta capacidad de operación en entornos de radiofrecuencia conflictivos.

El diseño de este radar es totalmente digital lo que permite un ajuste rápido frente a las amenazas y misiones, una gran adaptación y facilita su funcionamiento frente a nuevos retos y ataques.

De todas sus capacidades, a continuación, se presentan algunas de sus características principales [8]:

- Cobertura del radar con un alcance en altitud de 30.5 km.
- Cobertura del radar con un alcance en distancia desde 555 km hasta 1000 km.
- Frecuencia de operación del radar en banda L (1215 a 1400 MHz)
- Operación simultánea de múltiples misiones.
- Vigilancia aérea y marítima.
- Búsqueda de misiles balísticos.
- Funcionamiento en condiciones extremas.
- Capacidad de operación en Modo 5.

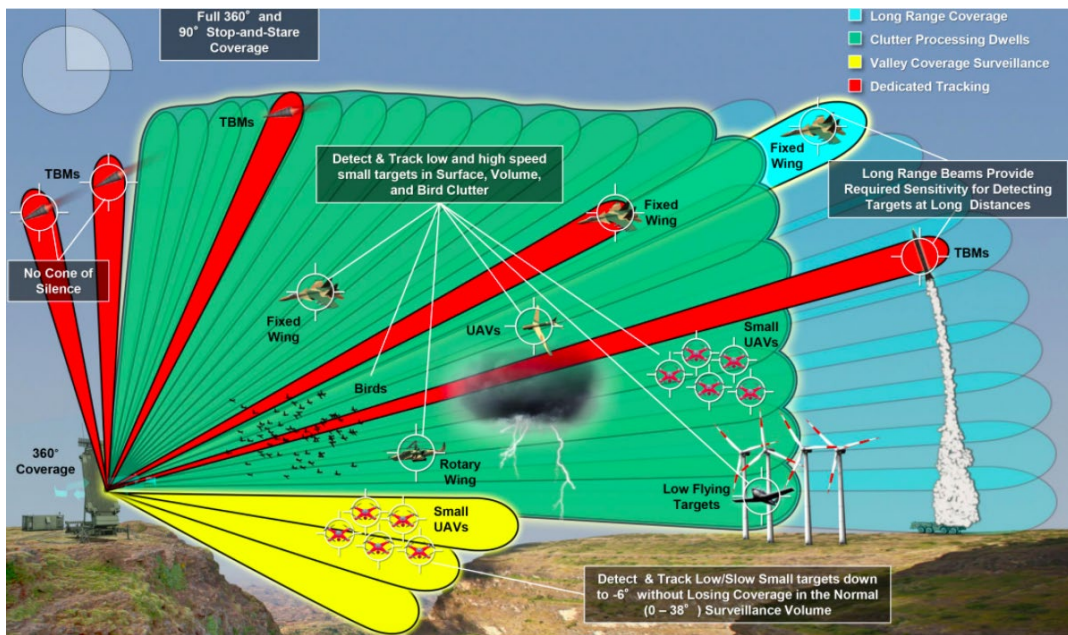


Figura 2.2 Radar TPY-4 [8].

La Figura 2.2 recoge las capacidades y prestaciones que ofrece este radar, donde se aprecia el rango de cobertura y algunos ejemplos de posibles blancos, categorizados en función de su grado de criticidad. A su vez esta imagen pretende representar la capacidad de operación simultánea para diferentes misiones, característica la cual es de gran valor por su polivalencia.

Comparando ambos sistemas, LTR-25 y TPY-4, presentan más similitudes que diferencias esto se debe a que ambos sistemas son ejemplos de sistemas militares IFF de vigilancia. Observando algunas de las prestaciones mencionadas, la principal diferencia entre estos sistemas se encuentra en los alcances que son capaces de cubrir, siendo por un lado el alcance del radar LTR-25 de hasta 460 km, mientras que el radar TPY-4 logra cubrir rangos de hasta 555 km. Pese a ello, el transporte, modos de operación, funcionamiento y bandas de frecuencia de estos radares son similares, e incluso en determinados factores idénticas.

2.2 SISTEMAS IFF DE CORTO ALCANCE.

Los sistemas IFF de corto alcance, pese a sus similitudes y características en común con los de largo alcance y vigilancia, tienen otras aplicaciones de interés. Un sistema radar de corto alcance, con aplicación al ámbito militar, sobre el cual se centrará este estudio, también conocido como SHORAD (*Short Range Air Defence*), es capaz de contrarrestar las emergentes amenazas de los vehículos aéreos no tripulados además de los blancos convencionales como pueden ser aeronaves.

Este tipo de tecnología y de sistemas son muy recientes, por lo que se requiere de estudios iniciales y de propuestas de nuevas arquitecturas.

En la Tabla 2-1 se detallan algunas de las características más destacables sobre estos radares en diferentes empresas, pudiendo comparar estos valores y ver sus similitudes y diferencias. Sin embargo no será posible la adquisición de todos los parámetros de cada sistema para estudiar

ya que cada empresa proporciona unos valores, pese a ello, esto servirá para comparar estos factores sobre diversos sistemas IFF de corto alcance.

En primer lugar los modos de operación disponibles para los sistemas escogidos son los mismos, esto se encuentra dentro de lo esperado ya que pese a ser sistemas diferentes, los modos de operación son un factor típicamente común. Del mismo modo se puede observar como las fuentes de alimentación escogidas son de 28 V DC para todos los sistemas sobre los cuales se conocen datos.

Las potencias de salida capaces de ofrecer estos sistemas se encontrarán alrededor de los 53 dBm, valor el cual deberá ser similar entre sistemas para cubrir unos rangos tanto en alcance como altitud similares.

Estos valores de alcance y elevación podemos observar como ya no son comunes para los sistemas aunque si próximos entre sí. Cabe destacar que el radar KRONOS tendrá capacidad de cubrir distancias de hasta 250 km, mientras que para el resto de los sistemas este valor será cercano a los 100 km. Esto puede deberse a que la empresa Leonardo decidiera incluir el valor máximo de distancia para el cual su sistema es capaz de lograr identificación de blancos, pero sin especificar el tipo de antena empleada para ello, ya que, en el caso de emplear antes dedicadas exclusivamente a funciones de detección en corto alcance, estos valores serán considerablemente inferiores como los disponibles para el resto de los sistemas.

Respecto al resto de valores presentados sobre el peso, dimensiones, frecuencias, temperaturas de operación... se puede observar que son similares. Se puede deducir que, dado que son el mismo sistema desarrollado por diferentes empresas y con sus particularidades, deben seguir unas características comunes. Un sistema IFF de corto alcance está diseñado para no ser de grandes dimensiones, con un peso ligero y el cuál sea capaz de operar en situaciones de condiciones extremas. Es por ello que se observan valores con características similares.

Una vez presentados estos datos sobre diferentes sistemas radar, se describe la propuesta de Indra. Esta multinacional española se encuentra en proceso de modernización de los COAAAS (por sus siglas, *Centro de Artillería Antiaérea Semiautomático*), cuyo propósito final es la de adaptarlo a las nuevas necesidades de proyectos futuros, siendo su principal novedad la de incorporar un nuevo radar de tipo AESA (por sus siglas en inglés, *Active Electronically Scanned Array*) [9]. Esta clase de radar de barrido electrónico activo presenta unas antenas las cuales se encuentran en fase, y las cuales están compuestas de módulos independientes denominados módulos transmisores-receptores (TRMs) los cuales se conectan a estas antenas de forma individual o subarrays. Este radar presenta una elevada eficacia dada su capacidad de observar las posibles amenazas que puedan aparecer en el espacio aéreo, así como la de vigilar varios puntos de manera simultánea.

A lo largo del proceso, Indra plantea la incorporación de un radar táctico multirol, el cuál consistirá en un sistema IFF de corto alcance con la capacidad de operar tanto en antena estática como giratoria dando cobertura para 360 grados. La definición de multirol viene dada por la capacidad de emitir diversos con funciones específicas, dotándolos de independencia en el momento de operación. Además, presenta una gran versatilidad dada su capacidad de integración junto con otros sistemas y una sencilla transportabilidad, permitiendo su despliegue en cualquier zona que lo requiera.

	IKZ-50P	MSFR-2100/36	TSA-1410	KRONOS	MPQ-64	TRML-4D
Empresa	Pitradwar	Weibel	Thales	Leonardo	Raytheon	Hensoldt
Operación	Modos 4 y 5 Nivel 1 (configuración por software del Nivel 2)	*	Modos 1, 2, 3/A, C, 4, 5	Modos 1, 2, 3/A, C, S, 4, 5	*	Modos 1, 2, 3/A, C, S, 4, 5
Potencia de salida	> 50 dBm	53 dBm	20 W (43 dBm) a 200 W (53 dBm)	*	*	*
Elevación	*	60°	*	Hasta 85° en seguimiento y hasta 70° en vigilancia	Desde -10 hasta 55°	Hasta 90° en seguimiento y hasta 70° en vigilancia
Alcance	25 km	30 km (RCS 1m ²), 20 km (RCS 0.1m ²), 10 km (RCS 0.01m ²)	1 km hasta 150 km	250 km	75 km	> 60 km
MTBF	≥ 5600 h	*	15000 h	*	*	*
MTTR	< 30 min	*	*	*	*	*
Fuente de alimentación	28 V DC, max 80 W	28 V DC	28 V DC	*	*	*
Dimensiones (WxHxD)	225x113x174 mm	*	170x89x239 mm	*	*	*
Peso	5 kg	*	< 1.8 kg sin baterías y crypto	*	*	*
Frecuencia	*	Banda X	Banda L	Banda C	Banda X	*
Temperaturas de operación	Entre -40 y +50 °C	Entre -32 y +55 °C	Entre -40 y 70 °C	*	*	Entre -40 y 71 °C
Humedad	<98% RH	*	Inmersión: 1 m bajo el agua 30 min (Mil-Std 810G) Lluvia: 1.7 mm/h	*	*	Capacidad de inmersión hasta 3000 m

Tabla 2-1 Características de sistemas IFF de corto alcance.

Esta visión general introduce al propósito y tema de estudio de este TFG. En los siguientes apartados se tratará en mayor profundidad las características y funcionamiento de un sistema IFF de corto alcance, donde se dará una aproximación y propuesta de arquitectura.

2.3 DIFERENCIAS ENTRE SISTEMAS.

Un sistema IFF de vigilancia o largo alcance y los de corto alcance, pese a seguir conceptos y modo de funcionamiento similares y basados en el mismo objetivo, presentan características diferenciadoras. Para la confección de la Tabla 2-2 se han empleado dos sistemas genéricos escogidos entre una gran multitud, donde se han incluido las características más destacables pudiendo distinguir a simple vista sus diferencias y semejanzas.

Los subsistemas IFF radar en su conjunto se componen de antena y sistema IFF, en este caso, y dado el tema de estudio, esta comparativa se realiza con base en los interrogadores. Los sistemas escogidos han sido el INT-2000ASM como ejemplo de sistema IFF de largo alcance, desarrollado por Indra, y el TSA-1410 de Thales, que se propone como sistema IFF de corto alcance (Tabla 2-1).

	Largo Alcance	Corto Alcance
Sistema IFF	INT-2000ASM	TSA-1410
Potencia de salida	≥ 63 dBm	20 W (43 dBm) a 200 W (53 dBm)
Rango	> 150 km	1 km hasta 150 km
Peso	≤ 75 kg	< 1.8 kg sin baterías y crypto
Fuente de alimentación	220 o 115 V AC	28 V DC
Dimensiones (WxHxD)	450x360x464 mm	170x89x239 mm
Temperatura de operación	Entre -40 y 60 °C	Entre -40 y 70 °C
Frecuencias	1030/1090 MHz	1030/1090 MHz

Tabla 2-2 Comparativa entre los sistemas IFF de largo y corto alcance.

Es evidente que, dado su nombre y definición, la mayor diferencia es el alcance de interrogación, donde de manera clara, los interrogadores de largo alcance tienen unas capacidades mayores y por tanto son capaces de cubrir grandes distancias. A este efecto se encuentra estrechamente ligada la potencia requerida: la potencia mínima del INT-2000ASM supera los 63 dBm, en el otro extremo tenemos los hasta 53 dBm del TSA-1410. Con estas potencias logramos cubrir las distancias ya mencionadas, para unos rangos mayores, la potencia de salida de los equipos deberá ser más.

Otros factores a tener en cuenta son las dimensiones, el peso y las fuentes de alimentación requeridas, estas últimas directamente ligadas a las potencias de transmisión.

Como últimas características de operación propuestas en esta tabla se incluyen las temperaturas y frecuencias de operación, estas últimas presentan unos valores similares e incluso en algunas situaciones idénticos.

Las temperaturas de operación, tanto para estos sistemas, como para el resto de los equipos disponibles en el mercado, se encuentran dentro de unos márgenes ya estipulados, por lo que se encontrarán dentro de unos márgenes próximos. Estas temperaturas de operación requerirán de unos valores extremos dada su operatividad militar y aplicación en zonas de conflicto donde el entorno y las condiciones a las que se ven sometidos los equipos son mucho más adversas.

Las frecuencias empleadas para estos sistemas pertenecen al rango definido para aplicaciones de radar secundario.

Las frecuencias en sistemas PSR, sin embargo, pueden variar en función de la empresa que desarrolle estos productos, y tal y como se distingue en la Tabla 2-1, podemos encontrar equipos de las mismas características que operen en bandas de frecuencia diferentes. Estas frecuencias dependerán de dónde se desarrollen estos sistemas, ya que cada país hace una asignación del espectro de frecuencias diferente, aunque existan bandas de frecuencia reservadas y empleadas en común. Accediendo al BOE (*Boletín Oficial del Estado*) se recoge cómo se divide el espectro electromagnético en la actualidad en España.

Estas características de operación vienen determinadas por las capacidades y prestaciones para las cuales se desarrollan los equipos. El principal fin y objetivo de un sistema IFF de corto alcance es ofrecer una capacidad de identificación en rangos no muy extensos. Esto se debe a que su principal aplicación es para zonas de conflicto que requieran un rápido despliegue y conocimiento del terreno. Sin embargo, los sistemas IFF de largo alcance, se emplean para una localización más lejana, siendo usados más comúnmente en estaciones terrenas para la gestión y localización del tráfico aéreo.

Los modos de operación en sistemas IFF de corto alcance no suelen requerir de modo S, dado que este modo es para operaciones de vigilancia no tácticas. Otra característica destacable es la rapidez de despliegue.

Como consecuencia, y como elemento fundamental para poder completar un sistema de estas características, es necesario la presencia de una antena para la transmisión y recepción de señales. El tipo de antenas empleadas en vigilancia civil o bases militares es comúnmente la de antenas LVA (del inglés, *Large Vertical Antenna*) o antenas las cuales por sus dimensiones permiten de elevadas ganancias y por tanto cubrir unos mayores rangos de operación. En sistemas tácticos, las antenas destinadas serán de unas dimensiones considerablemente menores y cuyas ganancias sean inferiores. Esto es debido a las necesidades y características de los sistemas de corto alcance donde las distancias a cubrir son menores, y para los cuales los tiempos de despliegue del sistema a de ser corto, imposibilitando la utilización de antenas como LVA para estos sistemas.

3 REQUISITOS PARA UN SISTEMA IFF DE CORTO ALCANCE.

3.1 ANÁLISIS DE VIABILIDAD.

Ya adentrados en el mundo de los radares, y con lo abordado en los capítulos anteriores, se continuará este TFG realizando una propuesta de arquitectura para un sistema IFF de corto alcance. A la hora de afrontar un proyecto de estas características, en primer lugar hay que conocer qué normativas se han de cumplir. Además, se deberán tener en cuenta las características que debe cumplir para un correcto desarrollo de sus funciones.

Proyectos de gran complejidad como es el de desarrollar un sistema de estas características, requieren una gran responsabilidad dado el impacto que pueden ocasionar. Por este motivo se realizan estudios o análisis de viabilidad los cuales se emplean para evaluar las posibilidades que ofrece el proyecto.

Estos estudios de viabilidad se han de realizar antes de comenzar a trabajar, pero una vez ya se tiene armado el proyecto. El análisis permitirá confirmar qué oportunidades de mercado ofrece y valorar los beneficios que se pueden obtener, aportando la información necesaria para saber si es conveniente o no continuar con el desarrollo del proyecto, reduciendo los riesgos de la operación.

Existen cuatro elementos a la hora de realizar un estudio de viabilidad, por lo que se realizará una estimación y aproximación al producto desarrollado en este proyecto sobre estos principales puntos del análisis.

Debido a la posibilidad de tener acceso a diferentes recursos disponibles de Indra, el estudio de viabilidad se enfocará y hará referencia a esta empresa, siendo la información aportada de dominio público y sin comprometer datos sensibles sobre la misma.

3.1.1. Viabilidad técnica.

El primer elemento para estudiar es la viabilidad técnica. Este análisis revisa el nivel de recursos técnicos a los que tiene alcance la organización, enfocándose en determinar si se ajustan a las necesidades del proyecto, así como el conocimiento por parte del capital humano encargado de realizar dichas tareas. De una manera más concreta, esta viabilidad técnica analiza minuciosamente los requisitos de software, hardware y tecnología necesarios para llevar a cabo dicho proyecto [14].

Enfocando ahora este análisis al sistema IFF de corto alcance, Indra tiene la capacidad técnica de soportar un proyecto de estas características dada su experiencia en el sector y el desarrollo de sistemas de largo alcance como los de la familia Lanza. Puede, por tanto, afrontarse el sistema IFF de corto alcance con las garantías suficientes de éxito dado que, pese a las diferencias entre sistemas, la multinacional española cuenta con los equipos técnicos y humanos necesarios para afrontar esta operación.

3.1.2. Viabilidad financiera.

Este elemento de viabilidad, como su nombre indica, hace referencia a si es factible o no el desarrollo del proyecto. Dentro de este análisis se incluyen datos sobre el coste y beneficios que puede reportar embarcarse en el proyecto. El objetivo final de un análisis financiero no es otro que entender los beneficios económicos que puede aportar el proyecto [14].

Para el caso de estudio, no se podrán aportar datos numéricos sobre los costes y beneficios que puede reportar sobre la empresa, dado que es de dominio privado. Sin embargo, se puede hacer una estimación sobre si el desarrollo es beneficioso o no para la compañía.

Económicamente, haciendo una reflexión, la apuesta por el desarrollo de un sistema IFF de corto alcance no supone grandes riesgos dado que al ser una empresa ya consolidada y con experiencia en el sector, parte con ventaja frente a nuevas empresas o aquellas que están en desarrollo. Dentro de este marco económico se destinarán gastos tanto a recursos humanos como materiales, cuya gestión no será compleja por la experiencia en proyectos de características similares. Sin embargo, la viabilidad de este proyecto depende en gran medida de lo demandado por el sector y de las ofertas que estén dispuestos a llevar a cabo.

3.1.3. Viabilidad del mercado.

La evaluación del mercado es una excelente oportunidad para identificar las actuales demandas, ofreciendo una idea de los ingresos que se pueden esperar y los riesgos potenciales que presenta el proyecto. Este elemento de análisis permite evaluar las posiciones que ocupa la competencia y extraer la mayor cantidad de datos posible para predecir el comportamiento del producto en el mercado [14].

En la actualidad, el sector de defensa está en pleno apogeo dado el aumento de demanda de sistemas con la capacidad de detección de blancos enemigos, así como de misiles en rangos de distancia cortos, permitiendo su identificación.

Como ya se vio en apartados anteriores, empresas como Lockheed Martin, Thales o Raytheon ya han desarrollado sistemas que ofrecen estas prestaciones con un impacto muy positivo para sus compañías. Es por ello que la empresa Indra ve en esta clase de sistemas una buena oportunidad de mercado.

3.1.4 Viabilidad operativa.

La viabilidad operativa se basa en la evaluación de la capacidad por parte de la organización de finalizar o no el proyecto. Esto incluye la necesidad de contar con diversos factores como son una estructura organizativa y un personal adecuado, así como conocer los requisitos legales vigentes.

Tras la conclusión de este estudio el equipo encargado de desarrollar el producto deberá tener una idea clara sobre los recursos de los que disponen y las competencias necesarias para realizar el trabajo.

3.2 REQUISITOS DEL PRODUCTO.

El desarrollo de unos requisitos para un proyecto es fundamental a la hora de la puesta en marcha del mismo, estos nos indicarán las normativas y características a cumplir por el producto, marcando una línea de trabajo clara.

A través de la descripción de los requisitos se deberán incluir diferentes propiedades del sistema, los cuales podremos categorizar en función de sus características:

- El tipo de requisito al que pertenece, estos pueden ser de capacidad o funcionalidad, de calidad, de interfaz, de mantenimiento, etc.
- Su criticidad, indicando la necesidad del requisito en casos especiales.

- Los métodos de verificación para la comprobación del cumplimiento de estos requisitos por medio de pruebas, análisis, mediciones, inspecciones, etc.
- Origen de los requisitos declarados, haciendo referencia al documento sobre el que se basan.

Estos puntos recogen de manera general cómo realizar unos requisitos para un sistema. Basándonos en esta idea, se procederá a definir unos requisitos para un sistema IFF de corto alcance, donde se detallarán los puntos de mayor interés para este proyecto.

3.2.1 Descripción general.

Como punto de partida, y para poner en contexto la definición de los requisitos, se incluirá una descripción general sobre el sistema propuesto. Un sistema IFF de corto alcance permite la identificación de blancos amigos o enemigos en rangos cuya distancia sea inferior a los 150 km, de forma genérica. Las distancias dependerán de diversos factores como las potencias de transmisión, las pérdidas de transmisión ocasionadas por la instalación o la antena.

Este TFG centrará su estudio en un sistema interrogador de corto alcance. Los requisitos y posterior propuesta de arquitectura cubrirán las necesidades y características de este sistema.

Algunas de las principales funciones del interrogador son:

- Generación y transmisión de las interrogaciones a través de los canales de transmisión y la antena.
- Recepción de las respuestas por medio de los canales dedicados a esta función.
- Análisis de los lóbulos laterales (función RSLs, del inglés *Reply path Side Lobe Suppression*)
- Análisis de monopolso.
- Capacidad de operación con unidades criptográficas.
- Interfaz con el operador.

3.2.2 Estados y modos.

El sistema IFF de corto alcance deberá tener definidos unos estados y modos de operación. Para este sistema en concreto se proponen los siguientes estados de operación (Figura 3.1):

- APAGADO. Estado en el cual el interrogador se encuentra apagado sin alimentación, lo que imposibilita cualquier operatividad del mismo.
- SILENCIO. En este estado el equipo se encuentra encendido y alimentado pero no generará ninguna señal. Este modo permitirá realizar operaciones de mantenimiento que requieran de la alimentación del sistema pero sin la transmisión de señales.
- OPERATIVO. Como el propio nombre indica, el estado operativo, indica que el sistema se encuentra en funcionamiento pero con la única salvedad de no transmitir las señales que se están generando. Este estado permitirá transmitir dichas señales en el momento que se indique. A su vez, el estado OPERATIVO permitirá realizar tareas de detección de fallos en dicho sistema.
- INTERROGACIÓN. Dicho estado permitirá el funcionamiento completo del equipo, transmitiendo las señales generadas en el modo configurado. El interrogador podrá transmitir uno o varios modos de interrogación según las necesidades de operación.

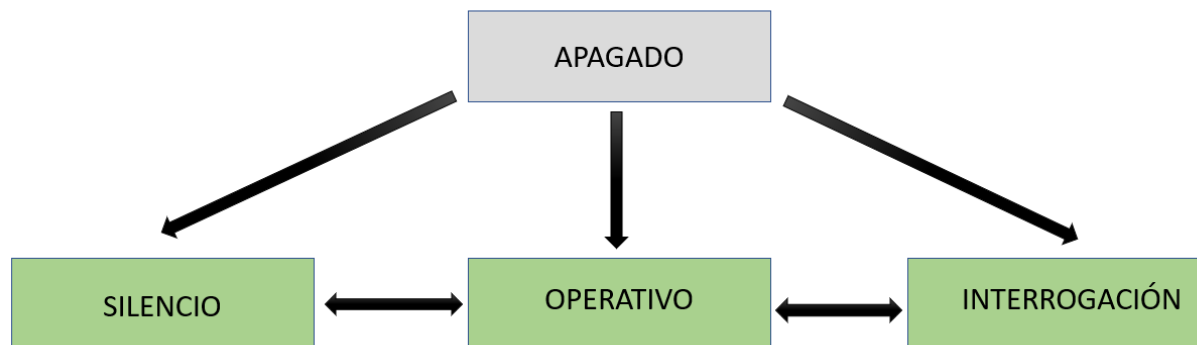


Figura 3.1. Estados de operación.

Además de los estados ya descritos, este sistema estará dotado para dar soporte con modos de operación 1, 2, 3/A, C (Modos SIF), Modo S Intermodos y Modo 5.

El Modo S ya descrito en la sección dedicada a las señales de interrogación y respuesta, presenta sin embargo una particularidad en la forma de operación denominado Modo S Intermodos, siendo necesaria una descripción sobre ello. El Modo S Intermodo engloba dos clases de interrogación, el Modo A/C/S all-call y el Modo A/C only all call.

- El Modo A/C/S all-call (IAL, ICL, S-all call) es un modo de interrogación en el cual se adquieren los códigos de identificación de Modo A y las alturas de todos los transpondedores que responden a los Modos A o C junto con las direcciones transpondedor de las aeronaves que responden Modo S. Además es un tipo de interrogación no selectiva usada en labores de vigilancia.
- El Modo A/C only all call (IAS, ICS) este modo de interrogación del mismo que para el caso anterior, adquiere los códigos de identificación de Modo A y las alturas de todos los transpondedores que responden a los Modos A o C, además de ser no selectiva y empleada para labores de vigilancia. Sin embargo, para este caso particular, los transpondedores con capacidad única de Modo S no responden.

Los sistemas IFF de corto alcance como el propuesto, surgen y centran su actividad en zonas de conflicto dadas sus prestaciones y características, tanto es así que no requieren de una implementación completa del Modo S. Estos modos militares cuentan con unas características diferentes y algo más complejas que los modos civiles ya que la información que se extrae de las señales contiene más datos sobre los diferentes blancos, además de la capacidad de encriptar mensajes como es el caso de aplicar un Modo 5.

Las características de las señales de interrogación y respuesta de estos modos se recogen en puntos anteriores de este documento (secciones 1.3.2 y 1.3.3).

3.2.3 Capacidades del sistema.

Este apartado englobará las diversas funcionalidades del sistema, donde se dividirán en agrupaciones según las diferentes capacidades. Esto permitirá una comprensión acerca del comportamiento del sistema.

3.2.3.1. Capacidades generales.

El principal punto es la capacidad de procesamiento de blancos para distancias comprendidas entre 1 km hasta los 400 km. Este rango parece elevado, sin embargo, como se explicó anteriormente, los rangos sobre los cuales se tiene capacidad para procesar blancos dependerán de diversos factores además del elemento interrogador.

También deberá cubrir unas prestaciones en cuanto a altitud y proporcionar capacidad de operación en acimut de 360º.

A continuación, se desarrollará una solución práctica a lo mencionado en este apartado para comprender la obtención de estos datos y los diversos factores que influyen sobre los mismos. Para ello, se realizará un balance de potencias de bajada y subida supuestos los valores ya enunciados.

En ambos enlaces habrá que tener claros los elementos que intervendrán en la comunicación para una correcta transmisión y recepción de las señales. Dentro de esta comunicación tendremos en cuenta las siguientes aportaciones:

- **El transpondedor**, es el equipo situado en las aeronaves y el cuál se encarga de recibir las interrogaciones, procesarlas, y enviar un mensaje de respuesta con la información correspondiente. Este elemento tendrá la aportación de potencia de salida necesaria para la transmisión de la señal; pérdidas por cables; ganancia de la antena del transpondedor.

En la Tabla 3-1 se incluyen valores estandarizados según diversos organismos. Para este caso, se emplearán unos datos en los márgenes de funcionamiento para garantizar la operatividad final del sistema.

Datos Transpondedor	Potencia de salida del transpondedor (dBm)	51
	Pérdidas por cables (dB)	3
	Ganancia de la antena del transpondedor (dB)	1

Tabla 3-1 Datos sobre el transpondedor.

- **Pérdidas por propagación.** Donde se tomarán en cuenta las diversas pérdidas producidas en la comunicación entre antenas. De la Tabla 3-2 podemos extraer varios factores, donde los valores referidos a pérdidas atmosféricas, por lentes y por difracción se pueden obtener de las normativas a cumplir por un sistema SSR, mientras que, por otro lado, encontramos las pérdidas por espacio libre. Las pérdidas por espacio libre son las producidas del supuesto de sustituir las antenas por dos isótropas (antenas ideales) situadas en un medio dieléctrico perfectamente isótropo e ilimitado, conservando la distancia entre antenas. Para la obtención de este valor intervienen factores como la distancia y frecuencia en la expresión (2) [10]. En el sistema IFF de corto alcance fijaremos unos valores de 1090 MHz y 110 km, respectivamente.

$$L_{bf} = 20 \cdot \log \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \right) \quad (2)$$

Pérdidas por propagación	Pérdidas atmosféricas (dB)	1,5
	Perdidas por espacio libre (dB)	134,11
	Pérdidas por difracción (dB)	0
	Pérdidas por lentes (dB)	0,6

Tabla 3-2 Pérdidas por propagación.

- **La estación terrena radar.** Los principales elementos del sistema a tener en cuenta son la antena de la estación terrena, las pérdidas de los cables necesarios en la instalación, la sensibilidad del receptor y la potencia de la señal recibida. Los valores de pérdidas y sensibilidad recogidos en la Tabla 3-3 son datos aportados por las diferentes normativas de los cuales se tomarán los extremos para garantizar el funcionamiento completo del sistema. La ganancia de la antena es un valor interesante, ya que depende del tipo de antena que se instale. En este caso se toma un valor de 15 dB ya que las antenas empleadas para los sistemas IFF de corto alcance emplean potencias similares, mientras que, para sistemas de corto alcance, las antenas empleadas aportan una mayor ganancia dada la necesidad de cubrir rangos de distancia superiores.

Datos Estación Radar	Ganancia de la antena en la estación (dB)	15,00
	Pérdidas por cables (dB)	3,00
	Sensibilidad (dBm)	-82,00
	Potencia de entrada en el receptor (dBm)	-75,21

Tabla 3-3 Datos sobre la estación terrena radar.

Como último factor, la potencia de entrada en el receptor [10] se obtiene por medio de la expresión (3). La potencia recibida P_{RX} se calcula por medio de la diferencia entre las ganancias totales del sistema G_T con las pérdidas producidas L_T .

$$P_{RX} = G_T - L_T \quad (3)$$

- **Datos del enlace.** Estos valores son los referentes a distancias y frecuencias necesarios para la obtención de los anteriores valores sobre pérdidas y potencias (Tabla 3-4).

Datos Enlace	Frecuencia (MHz)	1090
	Distancia (km)	110

Tabla 3-4 Datos sobre el enlace.

Como resultado final del cálculo del balance de potencias para el enlace de bajada se obtiene la Tabla 3-5 donde se puede apreciar un nuevo factor y es el del margen o diferencia entre la potencia de entrada en el receptor y la sensibilidad. Este margen es un valor que se obtiene para saber de cuántos dB se disponen en caso de que se produzca un mayor número de pérdidas en el sistema, derivados de la instalación u otros factores.

En la Tabla 3-5, determinados valores se encuentran marcados en diferentes colores. Los valores en amarillo pueden variar.

Por otro lado, los valores marcados en rojo son valores que dependen de los cálculos anteriormente descritos, que no se pueden modificar, salvo variación de otros factores como distancia, frecuencia, potencia...

Finalmente, el valor marcado en verde es el margen. Al tener un valor positivo como solución, tenemos un margen de tolerancia frente a posibles factores adversos que puedan surgir.

Una vez completado el estudio del enlace de bajada, de forma análoga se realiza el estudio del enlace de subida, obteniendo como resultado los valores de la Tabla 3-6.

Datos Transpondedor	Potencia de salida del transpondedor (dBm)	51
	Pérdidas por cables (dB)	3
	Ganancia de la antena del transpondedor (dB)	1
Pérdidas por propagación	Pérdidas atmosféricas (dB)	1,5
	Perdidas por espacio libre (dB)	134,11
	Pérdidas por difracción (dB)	0
	Pérdidas por lentes (dB)	0,6
Datos Estación Terrena	Ganancia de la antena en la estación (dB)	15,00
	Pérdidas por cables (dB)	3,00
	Sensibilidad (dBm)	-82,00
	Potencia de entrada en el receptor (dBm)	-75,21
Datos Enlace	Frecuencia (MHz)	1090
	Distancia (km)	110
Margen	Margen de bajada (dB)	6,79

Tabla 3-5 Resultados del enlace de bajada.

Datos Estación Terrena	Potencia de salida transmitida (dBm)	55
	Pérdidas por cables (dB)	1
	Pérdidas TRA (dB)	1,8
	Ganancia de la antena en la estación (dB)	15
Pérdidas por propagación	Pérdidas atmosféricas (dB)	1,5
	Perdidas por espacio libre (dB)	130,09
	Pérdidas por difracción (dB)	0
	Pérdidas por lentes (dB)	0,6
Datos Transponder	Ganancia de la antena del transpondedor (dB)	1
	Pérdidas por cables (dB)	3
	Sensibilidad del transpondedor en sistemas SSR (dBm)	-71
	Potencia recibida por el transpondedor (dBm)	-66,99
Datos Enlace	Frecuencia (MHz)	1030
	Distancia (km)	74
Margen	Margen de subida (dB)	4,01

Tabla 3-6 Resultados del enlace de subida.

Del análisis de la Tabla 3-6 se aprecian algunas diferencias con respecto al enlace de bajada:

- Uno de los primeros valores es el de la distancia. El valor obtenido para el enlace de bajada es ligeramente inferior al obtenido para el enlace ascendente, por lo que es lógico pensar en dicha variación y observar que pese a verse reducida esta distancia el margen obtenido para este enlace ascendente podría aumentar. Esto podría llevarse a cabo modificando los factores de potencia y de frecuencia ya que estos afectan de manera notoria en el resultado final del enlace y permiten un ajuste de dicho margen, así como el de las distancias.

- Para este enlace la potencia transmitida es algo mayor, algo esperado ya que la instalación de la estación terrena permitirá unas mayores potencias dadas sus características. Por el contrario, la sensibilidad en el transpondedor es menor, debido al mismo factor y que la instalación de los equipos en las aeronaves está más limitada.

El estudio realizado permite concluir que el enlace de subida es más sensible.

3.2.3.2. Capacidades en transmisión.

Los requisitos que se proponen para la transmisión en este sistema IFF de corto alcance son:

- El interrogador de corto alcance tendrá implementadas las funciones ISLS (*Interrogation Sidelobe Suppression*) e IISLS (*Improved Interrogation Sidelobe Suppression*).

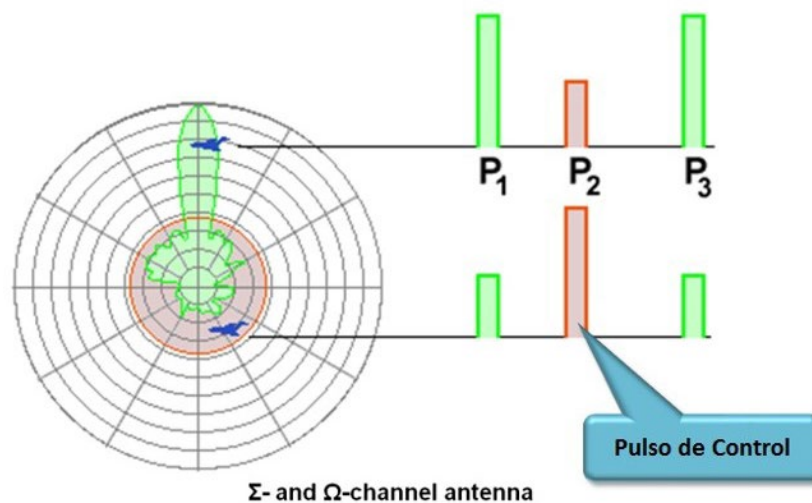


Figura 3.2 Función ISLS [15].

En la Figura 3.2 se muestra el patrón de una antena para las interrogaciones en SSR. Los transpondedores reciben un pulso P2 con un nivel de potencia menor que los pulsos P1 y P3 al ser el ser el haz principal de interrogación. Sin embargo, fuera de este haz, la situación es opuesta donde se puede apreciar que la situación es la opuesta: el pulso P2 tiene mayor o igual ganancia al pulso P1, por lo que no responderán a las interrogaciones. Esta función ISLS se aplica para la supresión de lóbulos laterales en interrogación y es fundamental para un correcto funcionamiento del sistema.

Con respecto a esta función surge IISLS la cuál es una versión mejorada de ISLS.

- La frecuencia de transmisión estará comprendida en el rango $1030 \text{ MHz} \pm 10 \text{ kHz}$.
- Dispondrá de dos canales de transmisión para la propagación de las señales de interrogación. De estos canales uno será un canal SUMA y otro OMNI.
- La potencia de la que se dispone para operar en transmisión por parte del interrogador de corto alcance es de +55 dBm.
- Tendrá capacidad de aportar un control de potencia de las señales de RF (*Radio Frequency*) según unos valores con unas tolerancias recogidas según las normativas a cumplir por dicho sistema.

- Del mismo modo el equipo interrogador tendrá unos valores de potencia de RF definidos para la salida de los conectores de los canales SUMA y OMNI en periodos en los cuales no se transmite con ningún tipo de radiación espuria.

3.2.3.3. Capacidades en recepción.

A continuación, se continuará describiendo las características y capacidades a cumplir en la recepción de las señales.

- El interrogador de corto alcance tendrá implementada la función RSLs, Figura 3.3.

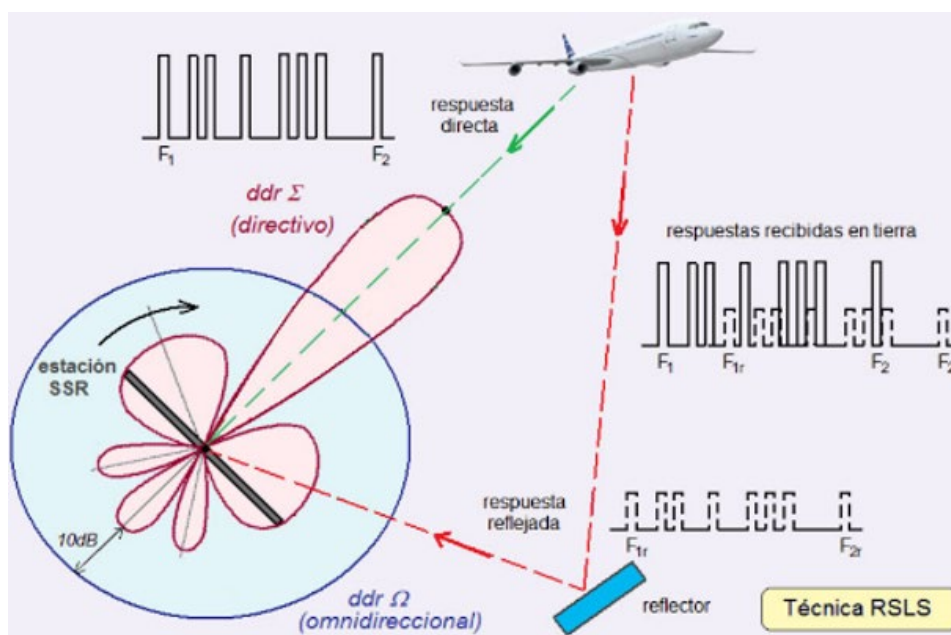


Figura 3.3 Función RSLs [15].

En el proceso de recepción, las señales, después de ser sometidas a un filtrado y amplificación, se aplican a un mezclador, donde se convierten a frecuencia intermedia, IF. Una vez realizado este proceso y con las señales en IF, se amplifican y demodulan.

Si las señales de vídeo del canal de suma son más pequeñas que la del canal de control, se suprimen para realizar de este modo la función RSLs, donde se realiza la supresión de los lóbulos laterales en recepción.

- La frecuencia de recepción estará comprendida en el rango $1090 \text{ MHz} \pm 10 \text{ kHz}$.
- Dispondrá de tres canales dedicados a la recepción de las señales. De estos canales se pueden distinguir el canal SUMA, DIFERENCIA y OMNI.
- El interrogador de corto alcance tendrá una limitación en cuanto a la capacidad de recepción de señales, esta, vendrá marcada por valor de potencia el cual se encuentra en la normativa a cumplir por dicho sistema.

3.2.3.4. Capacidades de procesado.

Este punto de estudio sobre las capacidades de procesado indicará algunas de las técnicas empleadas para la detección y extracción de datos sobre las señales recibidas.

- El funcionamiento del interrogador bajo condiciones adversas debe mantener una operatividad, debido a que estos sistemas de corto alcance están pensados para su

operación en zonas de conflicto. Es por ello que debe garantizar cierta operatividad en dichas situaciones. Dicha operatividad vendrá marcada por diferentes pruebas que el sistema deberá cumplir acorde a las diferentes normativas vigentes. Debido a la criticidad de este sistema, para este caso de estudio en el TFG, y dadas las limitaciones sobre la información que podrá detallarse, a continuación se realizará una descripción de algunas de estas capacidades de operación.

La operatividad del sistema engloba aquellos factores los cuales pueden ocasionar un error o mala función del mismo, para ello, algunas pruebas para probar y garantizar su funcionamiento son las de someter a estos equipos a situaciones límite las cuales prueben el cumplimiento de la normativa específica.

Algunas de estas pruebas pueden ser la de someter al equipo a trabajar con gran cantidad de información para probar la saturación del equipo, de este modo se podrá comprobar y garantizar que el equipo sea capaz de detectar los blancos de interés pese a obtener información innecesaria, pero la cual se detectará dadas las zonas de operación. Otro modo para comprobar la operatividad del mismo consistirá en inducir fallos en el sistema de forma intencionada para así ver cuál es su comportamiento y corroborar la detección de blancos.

- El interrogador de corto alcance tiene capacidad para ser configurado con el uso del procesado por medio del método de ventana deslizante.

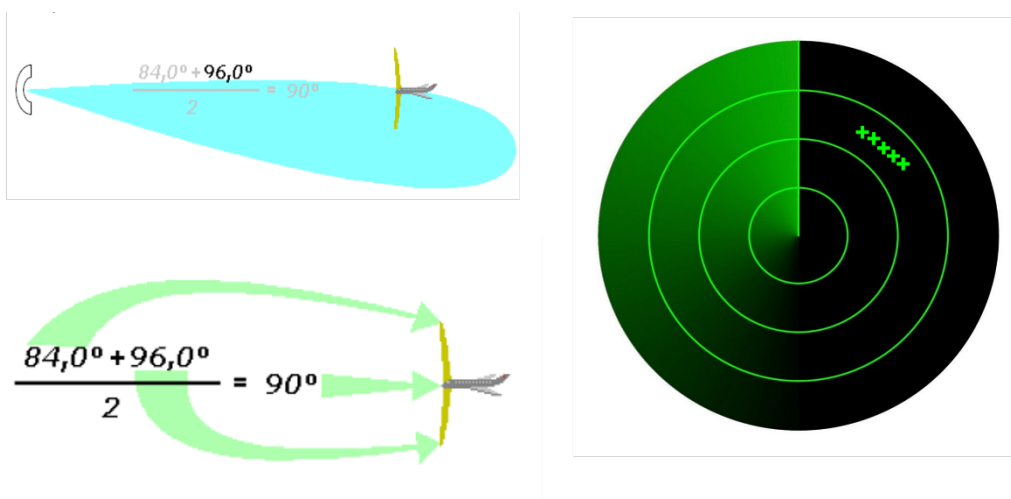


Figura 3.4. Ventana deslizante [6].

La detección de las respuestas se basa en la presencia de los pulsos de encuadramiento, los cuales forman parte de la señal de respuesta. Para poder obtener estos pulsos deberán existir los "blancos de vídeo". Del mismo modo deberán capturarse los pulsos de video comprendidos entre los pulsos de encuadramiento para poder así asociarles una distancia y un azimut. Para realizar esta técnica de ventana deslizante (Figura 3.4), además del proceso de filtrado, se deberá esperar a que dichos pulsos se repitan en sucesivas exploraciones [11].

- El interrogador de corto alcance tiene capacidad para ser configurado con el uso del procesado por medio del método de monopulso.

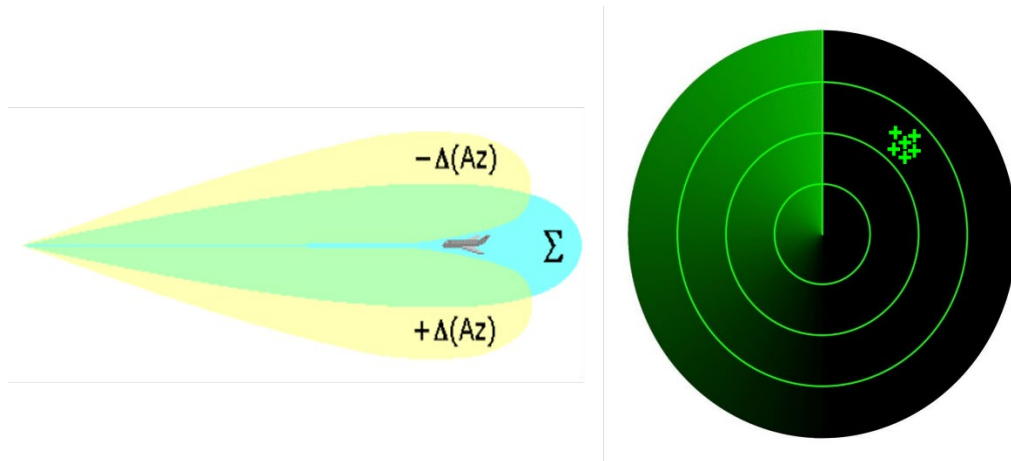


Figura 3.5 Monopulso [6].

La técnica monopulso ya ha sido descrita en puntos anteriores, sin embargo, cabe destacar a la vista de la Figura 3.4 y la Figura 3.5, la disposición que presentan los blancos a la hora de mostrar la solución en las pantallas:

- Por un lado, la ventana deslizante presenta los blancos de manera lineal, y a la hora de la solución final muestra el valor intermedio de las muestras obtenidas.
- Para la otra técnica de monopulso se puede apreciar cómo estos valores se agrupan en torno al mismo blanco el cuál será presentado como solución final. Esta técnica garantiza una mayor precisión a la hora de situar los diversos blancos.

Este sistema tendrá la capacidad de operar con ambas técnicas a elección del operador o según la aplicación para la que se aplique. Generalmente el sistema IFF de corto alcance empleará la técnica monopulso para la decodificación de las señales ya que dota al sistema de una mayor precisión y situación de los blancos.

3.2.3.5. Capacidades detectoras.

Las probabilidades de detección son valores de gran valor dado que indican en porcentaje la cantidad de blancos que es capaz de declarar el sistema de entre todos los presentes.

Como aproximación para este proyecto se aportan datos sobre las capacidades que ofrecen los sistemas de carácter civil, ya que los datos referentes a sistemas militares se encuentran clasificados. Sin embargo, conocer estos factores es de interés para realizar una aproximación a los valores que deberá cumplir dicho sistema. Estos factores a los cuales se hará mención seguirán las normas recogidas según EUROCONTROL [18].

- La probabilidad de detección ha de ser superior al 97%

La probabilidad de detección de falsos blancos (probabilidad de falsa alarma) es otro factor para tener en cuenta y sobre el cual se obtiene datos ya que afecta directamente a la comunicación del sistema. Este dato tiene en cuenta aquellos factores que producen una detección errónea de blancos, esto puede ser debido a múltiples factores como pueden ser efectos producidos por reflexiones, PRF (*Pulse Repetition Frequency*), entre otros.

- La probabilidad de detección de falsos blancos será inferior al 0,1%

3.2.3.6. Capacidades de resolución.

Los valores de resolución son recogidos por las diversas normativas a cumplimentar por parte de un sistema IFF de corto alcance. Dentro de estos valores de resolución se pueden introducir cuáles son dichos factores de estudio. Pero al menos debe cumplir con las operatividades dispuestas en la normativas militares y civiles.

Los principales factores de interés para la determinación de la resolución son los que se obtienen por medio del acimut y distancia para indicar la precisión con la cual está operando el sistema. Para estos valores de precisión de resolución distinguiremos entre los debidos a errores sistemáticos y aleatorios.

Con respecto a los valores de precisión para los errores sistemáticos se deberá cubrir al menos [18]:

- Distancias menores a 100 m.
- Acimut inferior a 0,1°.

En otro lugar los valores de precisión para los errores aleatorios deberán cubrir al menos [18]:

- Distancias menores a 70 m.
- Acimut inferior a 0,08°.

Estos valores presentados se rigen por la normativa civil debido a la confidencialidad de los datos referentes a sistemas militares. De igual modo estos valores serán próximos a lo requeridos por el sistema, ya que los requisitos a cumplir para sistemas militares presentarán una mayor restricción.

3.2.3.7. Capacidades fiabilidad.

Las capacidades de fiabilidad son los factores que nos indicarán la probabilidad de que un sistema tenga un funcionamiento correcto. Los principales factores que se encargan de medir esta capacidad son MTBF (del inglés *Mean Time Between Failures*) y MTTR (*Mean Time To Repair*), los cuales son indicadores de la disponibilidad de los equipos.

MTBF o tiempo medio entre fallos, es la media de tiempo en promedio entre una avería y otra en un equipo o sistema (4). Como su nombre indica, este valor se encarga de indicar el tiempo medio de operatividad. Del mismo modo este factor está estrechamente ligado a funciones de mantenimiento en los equipos, principalmente en su diseño y construcción, proceso de instalación y operaciones de mantenimiento [11]. El valor definido para el sistema IFF de corto alcance propuesto es el de $MTBF > 15000h$.

$$MTBF = (\text{Tiempo total disponible} - \text{Tiempo perdido}) / \text{Número de paradas} \quad (4)$$

Por otro lado, MTTR o tiempo medio de reparación representa el tiempo empleado en reparar un fallo tras su detección. Se calcula por medio de la expresión (5) en la cual intervienen el tiempo de mantenimiento para la corrección de los errores y el número de operaciones necesarias para reparar dicha avería, aportando como solución el tiempo medio en la reparación de un fallo.

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de mantenimiento para corrección de errores}}{\text{número de operaciones}} \quad (5)$$

El MTTR cuenta el tiempo desde el inicio hasta el fin de dicha reparación, sin tener en cuenta el proceso de detección de dicha avería. En este caso, dicho parámetro está relacionado directamente con el mantenimiento de los equipos. Para este sistema de estudio propuesto el valor marcado será de un MTTR < 30min.

MTTR y MTBF son indicadores de gran relevancia ya que permiten indicar el rendimiento que ofrecerán los equipos a desarrollar, así como los costes que estos generarán para la empresa. Es evidente deducir que lograr un valor de MTBF elevado, así como un MTTR mínimo es lo óptimo para un mejor funcionamiento de los equipos y para los intereses de las empresas dedicadas al desarrollo y mantenimiento de equipos tecnológicos [11].

3.2.3.8. Capacidades ambientales.

Para este apartado referido al entorno se describirán los requisitos ambientales que se han considerado imprescindibles en el diseño del sistema IFF de corto alcance. Cada requisito propuesto para este apartado irá acompañado de una normativa la cual detallará las pruebas concretas a realizar para poder considerar que el sistema supera las pruebas pertinentes de forma satisfactoria.

Son diversos los factores que se han de tener en cuenta a la hora de desarrollar los requisitos que se han de cumplir en el ámbito ambiental, sin embargo, y dadas las características de este sistema, habrá factores que no serán necesarios cumplimentar.

El sistema propuesto es un equipo el cual deberá soportar rigurosas pruebas ambientales, pero con la característica de que se encontrará a cubierto principalmente. El sistema interrogador de corto alcance es un sistema el cual estará diseñado para establecerse en el interior de vehículos, principalmente terrestres, pero con capacidad a su vez para ser instalado en aviónica o al sector naval.

Siguiendo lo descrito se presentarán aquellos factores ambientales los cuales tendrán efecto sobre dicho sistema.

- Temperatura.
- Humedad.
- Hongos.
- Corrosión.
- Vibración.
- Choque.
- Polvo y arena.
- Niebla salina.
- Altitud.

Cada uno de estos factores ambientales va a asociado a una normativa la cuál describe las diferentes pruebas que deberá soportar el sistema frente a dichos factores, donde se comprobará su operatividad y resistencia los valores establecidos en la normativa.

Estas capacidades ambientales se desarrollarán conforme la normativa descrita en el documento MIL-STD-810H.

4 PROPUESTA DE ARQUITECTURA.

El sistema IFF de corto alcance propuesto consta de diferentes elementos y subsistemas. La parte correspondiente al sistema interrogador es donde se centran los esfuerzos del desarrollo de este TFG.

Pese a que este sistema en su conjunto excede el alcance del TFG, sí es interesante tener una visión de conjunto sobre dicho sistema y a su vez, de este modo, situar el sistema interrogador de corto alcance y la relación y conexiones que guarda con el resto de los elementos.

A la vista de la Figura 4.1 podemos apreciar y situar el sistema IFF de corto alcance. En dicha figura se pueden observar las conexiones necesarias para una correcta operatividad para la recepción y transmisión de las señales, así como la antena empleada y sobre la cual se detallaron algunas de las características referentes a la potencia. Esta antena deberá, en cualquier caso, ser compatible con las características a cumplir por el sistema en su conjunto. En caso de la utilización de una LVA, las capacidades del sistema variarán y el conjunto del sistema pasará a ofrecer las funcionalidades de un sistema civil. En el presente TFG se considera la utilización de una antena que ofrezca capacidades militares, como rápido despliegue y velocidades de giro, entre otras características.

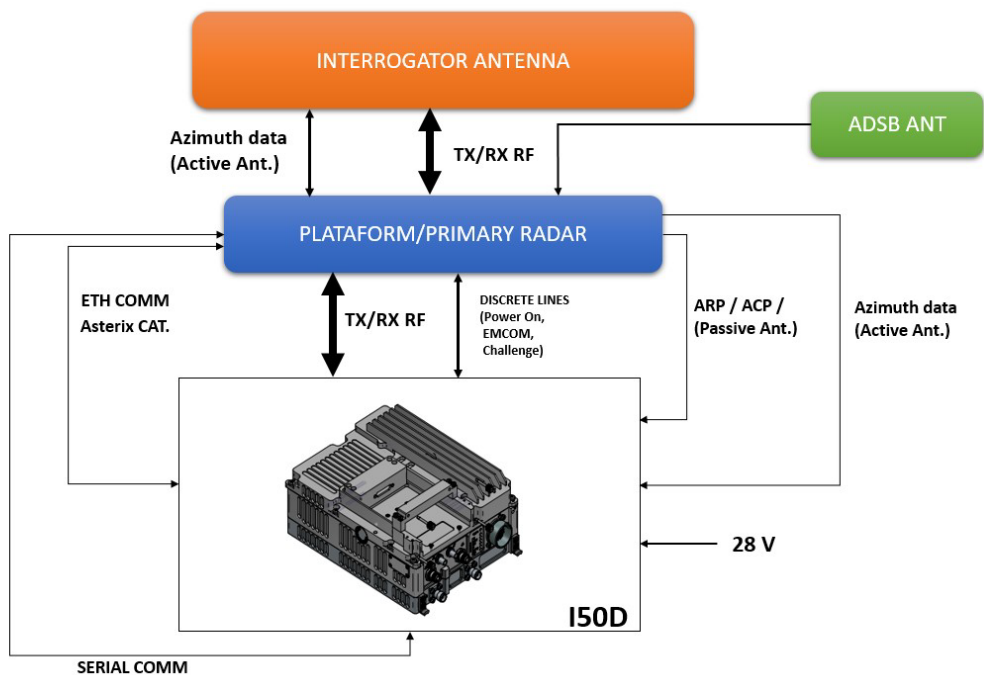


Figura 4.1 Sistema IFF de corto alcance.

La definición de los bloques de operación consistirá en la creación de los diferentes módulos necesarios para que en su conjunto formen el interrogador de corto alcance. Para ello, se definieron en el apartado anterior “Requisitos para un sistema IFF de corto alcance”, los requisitos, características y normas que deberá cumplir dicho sistema para lograr la operatividad propuesta y un desempeño satisfactorio de las funciones requeridas. Es vital una buena definición de estos requisitos ya que estos guiarán la estructura y bloques del sistema.

Inicialmente, basándonos en los requisitos, se deberán incluir dos canales dedicados a la transmisión de las interrogaciones, y tres para la recepción de las señales de respuesta. Estos

canales son algo esencial para el funcionamiento del sistema y desde donde se dará cuerpo al resto de necesidades para la propuesta de arquitectura.

Para que los canales de transmisión y recepción operen según lo requerido, deberán recibir instrucciones que indiquen qué modos de interrogación se están empleando en cada momento, cuáles son las técnicas de procesado empleadas, etc. Para lograr esto, se necesitará de la implementación de 1,2 o más tarjetas procesadoras encargadas de llevar a cabo dichas funciones. El número de tarjetas vendrá determinado por las necesidades propias del módulo y sus limitaciones.

Finalmente, para que lo anterior sea posible, se requiere de alimentación de los diferentes circuitos integrados y placas empleados en los diversos procesos. Por ello, es necesario incluir una fuente de alimentación suficiente para dar capacidad de operación simultánea de los múltiples componentes.

Teniendo en cuenta esto, se debe conseguir que el ensamblado y cooperación ente dichos bloques sea eficiente y funcional. A continuación se presentan los elementos necesarios para el desarrollo del sistema, con su posterior organización en bloques de operación donde se detallará la operatividad de los mismos. Estos elementos previamente introducidos serán:

- 1 fuente de alimentación.
- 1 bloque para el procesado de las señales.
- 1 bloque de transmisión y recepción.
- 1 bloque de amplificación.

Dichos elementos son la base del sistema y origen de los diferentes bloques de operación. Como visión general del sistema propuesto, la Figura 4.2 presenta los principales bloques de operación.

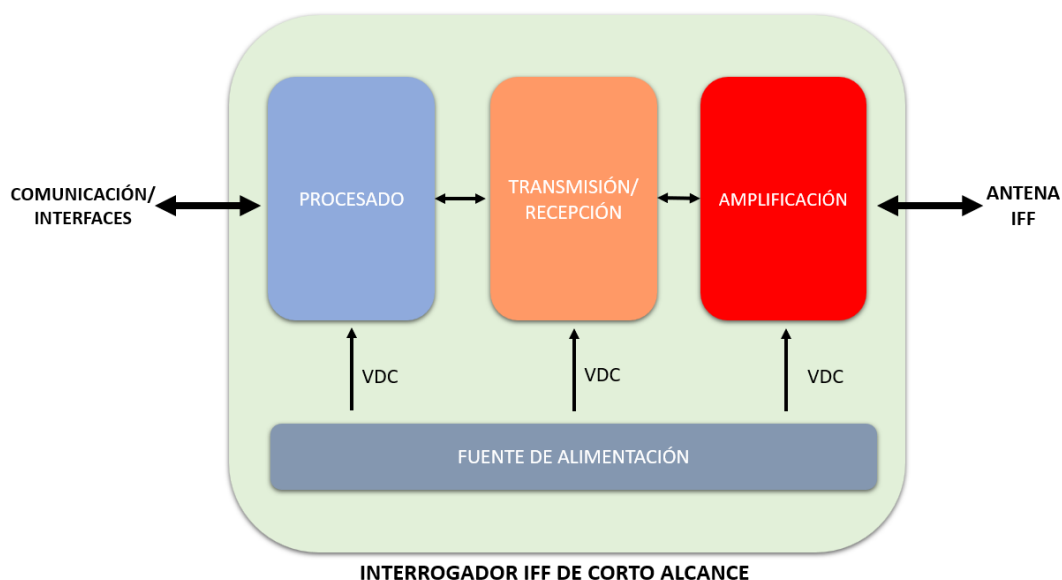


Figura 4.2 Diagrama de bloques.

Este sistema interrogador de corto alcance tiene la capacidad de determinar si los blancos procesados son amigos o enemigos. Sus principales formas de procesado consisten en la interrogación, respuesta y reconocimiento.

El proceso de interrogación consiste en la transmisión de las interrogaciones en los diferentes modos de operación para los cuales tiene capacidad de funcionamiento. Dichos modos de

operación son los definidos en el capítulo 1, los cuales atienden a unas características de tiempos de subida, periodos y anchos de pulso recogidos según las normativas vigentes para sistemas IFF. Los modos de interrogación son independientes del alcance del sistema, dependen de las características necesarias para proporcionar la información necesaria sobre los diversos blancos detectados.

El proceso de detección de las anteriores señales de interrogación por los blancos o plataformas es el denominado proceso de respuesta, donde, tras el procesamiento de la señal de interrogación recibida, se transmite una señal de respuesta la cual contiene la información modulada, acordes al modo de interrogación recibido.

Como parte final del proceso, se procede al reconocimiento de dichas señales de respuesta transmitidas. Donde, tras ser recibidas y decodificadas, se obtienen los correspondientes códigos, distancias y acimuts proporcionados por el blanco en la respuesta. Estos datos serán presentados al sistema a través de las interfaces y protocolos de comunicación correspondientes.

4.1 FUENTE DE ALIMENTACIÓN.

La fuente de alimentación se encarga de transformar la corriente procedente de la línea eléctrica de manera directa en la necesaria para un adecuado funcionamiento de la gran mayoría de dispositivos, es decir, una fuente de alimentación transforma la corriente alterna (AC, del inglés *Alternating Current*) en corriente continua (DC, del inglés *Direct Current*) [12].

Existen diferentes tipos de fuentes de alimentación según sus prestaciones: lineales y conmutadas. Para este sistema IFF la más adecuada es una fuente conmutada. Sin embargo, es interesante conocer algún matiz referente a las fuentes lineales, detallando en mayor profundidad las conmutadas al ser las elegidas para el sistema.

Una fuente de alimentación lineal es más sencilla, pero sus prestaciones son menores y su eficiencia es muy baja. Esta clase de fuentes de alimentación son fáciles de producir y mantener, pero no son interesantes para el sistema IFF debido a las elevadas pérdidas de energía en el proceso de conversión de corriente alterna a continua.

Las fuentes conmutadas son más complejas, tienen una eficiencia mucho mayor y dimensiones considerablemente menores, característica importante teniendo en cuenta los requisitos de volumen y peso [13]. Atendiendo a la Figura 4.3 el funcionamiento de esta fuente de alimentación es el siguiente:

- Partiendo de la entrada AC, donde tendremos una tensión en alterna, se realiza un filtrado para proteger al circuito de posibles subidas de tensión causadas por la red o interfaces externas. A continuación, la corriente pasa por el puente rectificador y llega al transformador a través del transistor.
- El transformador se rige por las señales procedentes del controlador y el optoacoplador, donde tras una comprobación previa sobre la tensión de salida, dependiendo de si esta aumenta o disminuye, variará el ancho del pulso controlando de esta manera el transistor y manteniendo una tensión constante a la salida.

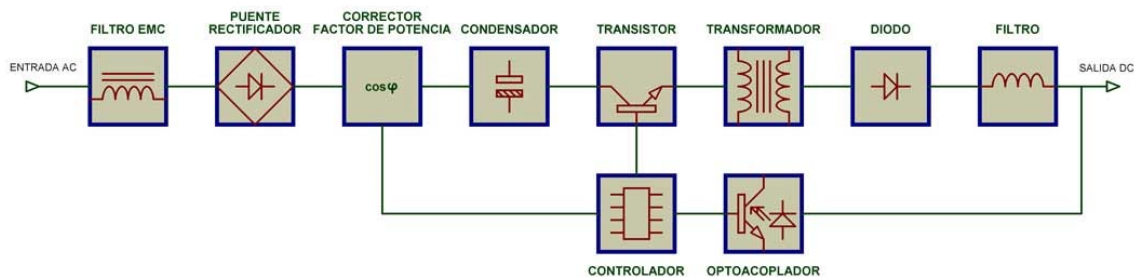


Figura 4.3 Secciones de una fuente de alimentación conmutada [13].

- A la salida del transformador se rectifica la tensión rectangular para pasar por la última sección donde accede a un filtro de salida evitando los armónicos superiores, así como las interferencias generadas por el convertidor.

Tras este proceso de conversión de la señal, se obtiene como resultado una tensión continua estabilizada, la cual alimentará al resto de componentes y bloques del sistema interrogador.

Esta fuente de alimentación proporcionará un voltaje externo de 28 VDC hacia el equipo para generar los voltajes para el funcionamiento del sistema IFF de corto alcance.

4.2 BLOQUE DE PROCESADO.

El bloque de procesado se compone principalmente de una tarjeta de procesado donde se realizarán los diversos procesos que se presentan a continuación.

- Generación de las señales de interrogación para su posterior transmisión por medio de los canales oportunos. En este proceso, la tarjeta procesadora se encargará de generar los pulsos de interrogación para los diferentes modos de operación para los cuales tiene capacidad de funcionamiento el sistema.

Una vez generados estos pulsos, se procesa la información del modo de operación seleccionado para posteriormente generar las señales específicas a transmitir por medio de los canales dedicados a esta función. Del mismo modo, y como ya se adelantó en los requisitos a cumplir por parte del sistema, este deberá ser capaz de proporcionar las funciones de supresión de lóbulos laterales, funcionalidad la cual se integra en este bloque.

- Recepción de los datos de acimut de los múltiples blancos, procesado y generación de información detallada del parámetro.
- Interfaz dedicada al control y activación de las señales de modulación e interrogaciones.

Las características anteriormente mencionadas hacen referencia a la generación de señales para su posterior transmisión, sin embargo, este bloque de procesado también deberá proporcionar las capacidades necesarias en la recepción de las señales. Respecto a este punto, se presentan las capacidades que dará dicho bloque para el funcionamiento del sistema:

- Capacidad de detección de los modos de operación. Las señales recibidas pasarán por un proceso de decodificación de las respuestas de donde se obtendrán los datos de información referentes a cada blanco procesado: altitud, dirección, identificación...

- Generación de los resultados que se presentarán en la consola o terminal desde el cuál el personal encargado de la gestión de los datos tendrá acceso para la localización e identificación de los blancos. Para la generación de estas respuestas se tiene capacidad de procesado por medio del método ventana deslizante o monopolso.
- Capacidad y funcionalidad de controlar y supervisar los diferentes elementos que componen el sistema IFF de corto alcance, indicando el bloque de operaciones y el fallo detectado por medio de indicadores led situados en la estructura del equipo.
- Proceso de comunicación dedicado que mantiene continuamente la conexión a las interfaces y las aplicaciones para la presentación de los datos. Este es un proceso específico definido en las normativas y documentos referentes a los interrogadores.

El proceso de comunicación implementado para este sistema de corto alcance se regirá por lo definido en la normativa para los servicios de tráfico aéreo ASTERIX (*All Purpose Structured Eurocontrol Radar Information Exchanges*). Este formato está diseñado para sistemas con ancho de banda limitado. Permite la transmisión de toda la información necesaria con la menor carga de datos posible, agilizando los procesos de procesado y presentación de los resultados.

4.3 BLOQUE DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN.

El bloque diseñado y propuesto para la transmisión y recepción, por un lado, recibirá los datos de señal a transmitir en forma de interrogaciones procedentes del bloque de procesado y generará las señales que se transmitirán tras un paso previo por el bloque de amplificación. Por otro lado, recibe las señales de respuesta y proporciona las entradas al bloque de procesado encargado de su decodificación y la extracción de la información requerida sobre los blancos. La Figura 4.4 muestra el bloque al completo de transmisión y recepción de la señal. A continuación, se describen los procesos de generación y recepción de señales.

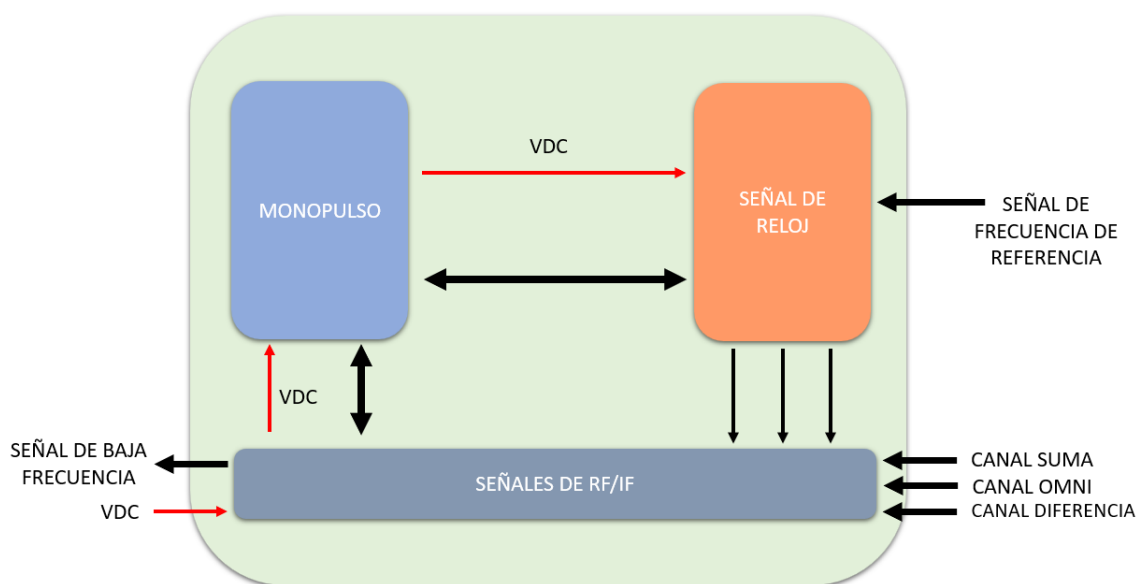


Figura 4.4 Diagrama del bloque transmisión/recepción.

4.3.1 Generación de señales.

El esquema de esta sección se presenta en la Figura 4.5. Las señales se transmiten a través del canal suma (interrogación) y el omnidireccional (supresión de lóbulos laterales, SLS). A partir de las señales de control y los datos procedentes del bloque de procesado, se realiza la modulación de las señales con las características adecuadas para el modo de operación seleccionado. Tras ello, se lleva a cabo una conversión de frecuencia a la portadora correspondiente al canal de transmisión: 1.030 MHz.

Las señales se amplifican para adecuar el nivel para los amplificadores de potencia (HPA, *High Power Amplifier*).

En esta sección del bloque de transmisión/recepción, se genera el reloj de referencia del equipo interrogador y el oscilador local que se utiliza para los procesos de conversión de frecuencia.

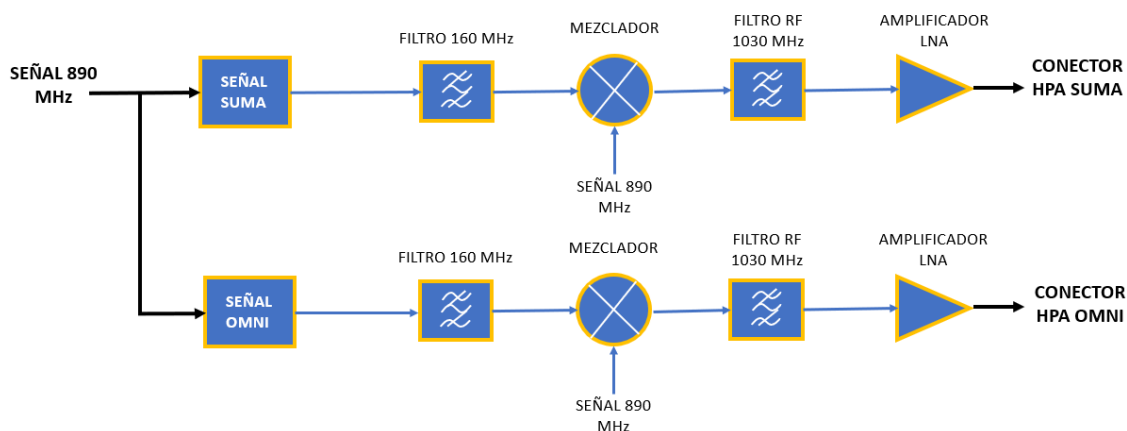


Figura 4.5 Esquemático de la sección de generación de señales.

4.3.2 Recepción de señales

Esta sección toma las señales de RF capturadas por las antenas SUMA, OMNI y DIFERENCIA (Figura 4.6). Estas señales están sobre una portadora de 1.090 MHz. Incorpora los procesos de filtrado, amplificación, conversión a frecuencia intermedia (IF) y envío al procesador de conversión de IF a banda base.

Las señales obtenidas como resultado del proceso de recepción se denominan comúnmente vídeos. Estos vídeos se envían al bloque de procesado para el análisis de los blancos y la realización del procesado para la supresión de los lóbulos laterales.

El procesador monopolso está integrado también en esta sección.

4.4 BLOQUE DE AMPLIFICACIÓN Y CONMUTACIÓN.

Para una correcta transmisión de las señales de interrogación se requiere de un bloque de amplificación que adecúe las señales con la potencia necesaria para cumplir los requisitos de cobertura. Este bloque dispondrá de un circulador que permite la utilización de una misma antena para para la transmisión y la recepción de las señales. La unidad de conmutación es un complemento al circulador que permite alcanzar los niveles de aislamiento requeridos para proteger al receptor durante la transmisión de las interrogaciones. En la Figura 4.7 se representan ambos bloques para los canales de transmisión (suma y omnidireccional).

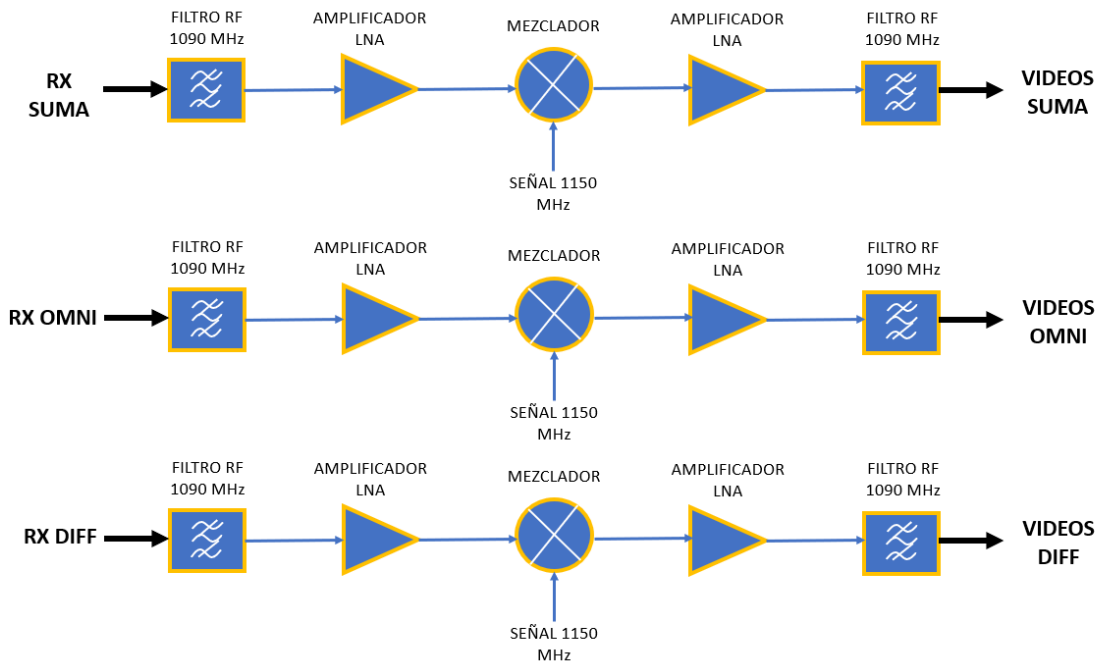


Figura 4.6 Esquemático de la sección de recepción de señales.

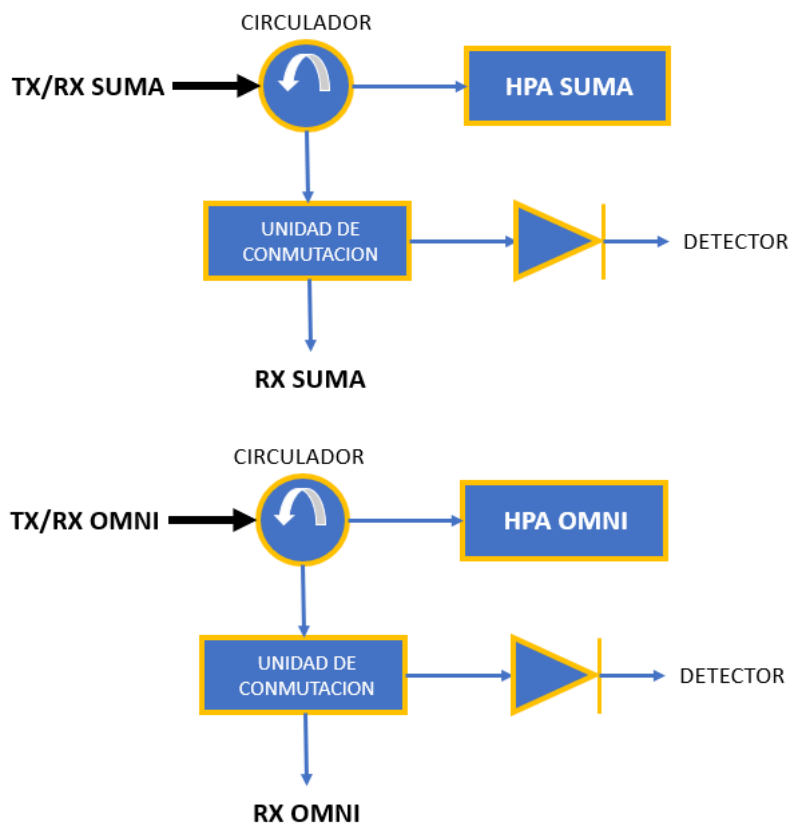


Figura 4.7 Esquemático de las secciones de amplificación y conmutación.

La etapa de amplificación de potencia recibe las señales moduladas y amplificadas del bloque de transmisión (Figura 4.5) y las amplifica hasta adecuarlas al nivel requerido para su transmisión por las antenas, de tal modo que no sufran ninguna variación a excepción de la amplificación necesaria conservando las características del tipo de interrogación deseada.

Este conjunto de HPA, tanto para el canal SUMA como OMNI opera con cualquiera de las formas de interrogación definidas por los modos de operación, siendo la frecuencia central de operación 1030 MHz.

Además, y como característica de gran valor, este módulo ofrece la capacidad de generación de señales para la monitorización continua en el proceso de transmisión, indicando posibles incidencias como la de presencia de potencia reflejada. Ofrecer dicha capacidad permite prevenir la rotura de los diferentes componentes de los bloques debido a la aparición de señal reflejada.

A partir de las señales procedentes del bloque de transmisión y recepción, esta sección realiza la modulación de las señales con las características adecuadas para el modo de operación seleccionado, cambiando la frecuencia a 1030 MHz y amplificándola hasta el nivel requerido en los conjuntos HPA de radiofrecuencia.

El circulador empleado corresponde con un dispositivo electromagnético de 3 puertos que proporciona una baja atenuación cuando la señal se propaga en una dirección y una alta atenuación cuando la señal se propaga en la dirección opuesta usado para conectar las antenas de transmisión y recepción.

La función del detector es la de monitorizar la señal reflejada procedente de las antenas durante los periodos de transmisión. Si se excede el nivel umbral establecido, se corta la transmisión como medida de prevención frente a posibles roturas.

5 CONCLUSIONES.

Debido a las necesidades surgidas de la nueva aparición y evolución de las tecnologías en los sistemas radar, se decidió la realización de un TFG para una primera propuesta de arquitectura para un sistema IFF de corto alcance, partiendo de la realización de un estudio de los sistemas radar actuales y de las nuevas necesidades relativas a sistemas de corto alcance.

Con lo obtenido de la realización de este proyecto se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Se han definido los requisitos y especificaciones mínimas que debe cumplir el sistema IFF radar de corto alcance.
- Para ello se ha realizado un estudio del mercado, de los conocimientos sobre tecnología radar y de la experiencia de empresas del sector.
- Se aportan valores aproximados para los parámetros de funcionamiento del sistema, concluyendo tras el estudio realizado, que dadas las características y especificaciones diseñadas para el sistema, éste las cumplirá y ofrecerá la solución para las nuevas necesidades a cubrir.
- Los requisitos estimados se cumplirán siguiendo las especificaciones y documentación seleccionados para este TFG.

Finalmente, como cierre al proyecto y conclusiones, se puede garantizar que el sistema radar IFF de corto alcance desarrollado será capaz de cumplir con las características y prestaciones necesarias en situaciones de interés.

5.1 Líneas futuras de trabajo.

Una vez concluido el diseño y desarrollo del sistema radar IFF de corto alcance, los pasos a seguir para llevar a la práctica el estudio teórico realizado, comenzarán con el montaje de las diferentes tarjetas y bloques que conforman el sistema. Se deberá probar de manera independiente el funcionamiento de los bloques antes de pasar a armar el bloque completo. La fase final consistirá en la comprobación del sistema en entornos de simulación.

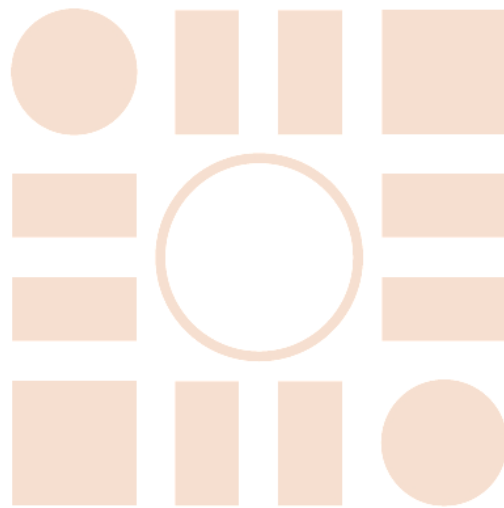
Estos pasos posteriores a la propuesta teórica del TFG llevarán consigo el desarrollo de los documentos pertinentes para la fabricación, montaje y prueba de los diversos módulos, así como del bloque completo.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1]. Merrill. I. Skolnik. *Introduction to radar systems*, McGraw-Hill Book Company, 1981.
- [2]. Merrill. I. Skolnik. *Radar Handbook*, McGraw-Hill Book Company, 1981.
- [3]. M. C. Stevens. *Secondary Surveillance Radar*. Norwood, MA: Artech House, 1988.
- [4]. Koh Che Hun. *Development of an algorithm for correlation of aircraft positioning data from radar and ADS-B sensors*, Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/331033102_DEVELOPMENT_OF_AN_ALGORITHM_FOR_CORRELATION_OF_AIRCRAFT_POSITIONING_DATA_FROM_RADAR_AND_ADS-B_SENSORS Último acceso: 31-08-2023
- [5]. Cai Fei, Fan Hongqi, Song Zhiyong, Fu Qiang. *Difference beam aided target detection in monopulse radar*, ATR Key Laboratory, National University of Defense Technology, 2015.
- [6]. INDRA, *Analysis of IFF sub-system monopulse capability*, Torrejón de Ardoz, 2008.
- [7]. INDRA, *Lanza Radar LTR-25*, Disponible en: https://www.indracompany.com/sites/default/files/indra_ltr-25_radar_en_03_2021_0.pdf Último acceso: 31-08-2023
- [8]. LOCKHEED MARTIN, *TPY-4 Next Generation Multi-Mission Radar*, Disponible en: https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/rms/documents/ground-based-air-surveillance-radars/TPY-X_TPY-4_brochure.pdf Último acceso: 31-08-2023
- [9]. B. Carrasco, *Indra plantea modernizar el sistema Coaaas del Ejército con un nuevo radar*. Infodefensa, noviembre 2020. Disponible en: <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/3124087/indra-plantea-modernizar-sistema-coaaas-ejercito-nuevo-radar> Último acceso: 31-08-2023
- [10]. Rec. UIT-R P.341-4, *Noción de pérdidas de transmisión en los enlaces radioeléctricos*, Disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.341-4-199510-S!!PDF-S.pdf Último acceso: 31-08-2023
- [11]. Francisco Vidal, *MTTR y MTBF: Qué son y cómo calcularlos*, Disponible en: <https://www.stelorder.com/blog/mttr-y-mtbf-que-son-y-como-calcularlos/> Último acceso: 31-08-2023
- [12]. ELECTRONIC BOARD, *¿Qué es una fuente de alimentación? ¿Cómo funciona?*, Disponible en: <https://www.electronicboard.es/que-es-una-fuente-de-alimentacion-2/> Último acceso: 31-08-2023
- [13]. Finestec, *Como funcionan las fuentes de alimentación I*, Disponible en: <https://fidestec.com/blog/fuentes-de-alimentacion-conmutadas-01/> Último acceso: 31-08-2023
- [14]. Julia Martins, *Como aplicar un estudio de viabilidad en la gestión de proyectos*, <https://asana.com/es/resources/feasibility-study> Último acceso: 31-08-2023
- [15]. INDRA, *IFF/SSR Especificaciones Técnicas*, Torrejón de Ardoz, 2019.
- [16]. *Radar Secundario (SSR)*, Disponible en: https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/temarios/Curso%20de%20Comunicaciones%20Tema%2010%20Radar_Secundario.pdf Último acceso: 31-08-2023
- [17]. F. D. Messina, "Messina, Overview of Secondary Surveillance Radar (SSR) and Identification Friend/Foe (IFF) Systems". Disponible en: <https://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/overview-of-ssr-and-iff-systems.pdf> Último acceso: 31-08-2023
- [18]. EUROCONTROL, *Radar surveillance in en-route airspace and major terminal areas*, Disponible en: <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-standard-radar-surveillance-en-route-airspace-and-major-terminal-areas> Último acceso: 31-08-2023

- [19]. Introduction to Radar Systems. Tracking and Parameter Estimation. MIT Lincoln Laboratory. Disponible en: <https://www.ll.mit.edu/sites/default/files/outreach/doc/2018-07/lecture%209.pdf> Último acceso: 31/08/2023

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR



Universidad
de Alcalá