



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño y puesta en marcha de un receptor SDR de bajo coste para
experimentación en la banda de HF*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Diego Javier Isaac Hernández

DIRECTOR: José María Núñez Ortuño

CURSO ACADÉMICO: 2014-2015

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño y puesta en marcha de un receptor SDR de bajo coste para
experimentación en la banda de HF*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

Universida_deVigo

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objeto establecer un sistema de recepción de señales de HF mediante un receptor de radio definido por software. Se trata de una tecnología emergente en la que los elementos hardware se ven reducidos, trasladando ciertas funcionalidades que antes recaían en el hardware a funciones implementadas por ordenador. Introducir dichas funcionalidades software ha permitido en nuestro trabajo, añadir más flexibilidad al sistema, facilitando además la capacidad de una rápida reconfiguración de sus parámetros tales como frecuencia o el ancho de banda. En el trabajo se detallan los resultados obtenidos de un sistema que evalúa diferentes software en entornos operativos distintos (Linux y Windows).

El motivo no es otro que el de comparar las ventajas que ofrecen ambos programas en el ámbito docente, experimentador e investigador. Estos software están apoyados por una serie de elementos hardware (circuitaría, antenas, receptor SDR y Up-converter).

La recepción se lleva a cabo mediante dos antenas de la banda de HF con características diferentes: la primera de ellas es una antena de hilo de 20 metros de longitud y la segunda es una monopolo vertical o látigo con una frecuencia central de 27 MHz. Se han seleccionado los elementos necesarios para la recepción SDR estableciendo unos límites de coste y teniendo en cuenta la calidad de las diferentes ofertas que actualmente se encuentran en el mercado.

Para finalizar se ha puesto en marcha un servidor web denominado WebSDR donde distintos usuarios pueden tener acceso al receptor SDR de forma concurrente.

PALABRAS CLAVE

Software Defined Radio, HF, SDR-Sharp, GNU-Radio, WebSDR.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar al tutor del presente trabajo D. José María Núñez Ortuño por su incansable esfuerzo profesional que tanto me ha ayudado a la hora de realizar el mismo. Su motivación y fuente de conocimientos son un ejemplo en el que fijarse para el futuro.

Agradezco al Centro Universitario de la Defensa su inestimable ayuda a la hora de poner medios a nuestra disposición.

Agradezco al CEMEDEM la ayuda prestada a la hora de la caracterización de la antena A99 Solarcom. Sus medios fueron muy útiles para entender en detalle el trabajo que se estaba realizando.

Agradezco a mi Comandante de Brigada, el T.N. Molina Martínez su ayuda como fuente de información para comprender el interés militar de este trabajo, en especial en la Armada.

Agradezco al CTE I.M. Lage Carreira y al CAP. I.M. Iglesias Sánchez, su apoyo prestado a la hora de recopilar información sobre las comunicaciones en el ámbito de I.M.

Agradezco a la Unión de Radioaficionados de Ourense (URO) su ayuda y calurosa acogida en sus instalaciones para familiarizarnos con la teoría básica de antenas.

Agradezco por ultimo a mi familia el apoyo prestado durante estos cinco años de carrera. Su ayuda, ánimos y cariño han significado un estímulo en ese tiempo.

Contenido

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción, motivación y objetivos.....	7
1.1 Introducción.	7
1.2 Motivación.	11
1.3 Objetivos.	12
2 Estado del arte	13
2.1 Definición de SDR.	13
2.1.1 Definición.	13
2.2 Evolución histórica.....	15
2.2.1 Desde el SPEAKEASY hasta el SDR 1000.....	15
2.2.2 SDR de bajo coste.....	21
2.2.3 Equipos SDR avanzados.....	25
3 Estructura de un receptor sdr	29
3.1 Principio de funcionamiento de un receptor SDR.	29
3.1.1 Introducción.....	29
3.1.2 Funcionamiento.	29
3.1.3 La conversión de frecuencias en un receptor SDR.	34
3.1.4 La demodulación en SDR.	36
4 Espectro de HF	39
4.1 Espectro de HF.....	39
4.1.1 Establecimiento de enlace en HF. Factores a tener en cuenta.	41
4.2 Interés militar y civil. Aplicaciones.	42
4.2.1 Interés militar.BFEM.....	43
4.2.2 Aplicaciones civiles.	44
5 Sistema de RX propuesto.....	45
5.1 Selección de antena. Características. Diagrama de Radiación.	45
5.1.1 SIGMA LW-20. (ANTENA 1).....	46
5.1.2 A99 SOLARCON. (ANTENA 2).....	49
5.2 Selección de equipo SDR. Características.....	51
5.3 Selección de UP-converter. Características.	52
5.4 Accesorios hardware.....	55
5.5 Software SDR evaluado.	56
5.5.1 SDRSharp	57
5.5.2 GNURadio.....	60
5.5.3 WebSDR.....	63
6 Resultados / Validación / Prueba	67
6.1 Resultados.....	67
6.1.1 Montaje de todos los equipos HW.....	67
6.1.2 Instalación de SDRSharp#.....	67
6.1.3 Instalación de GNURadio. Ejemplos de AM y FM.....	70
6.1.4 Instalación de WebSDR.....	72
7 Conclusiones y líneas futuras	75
7.1 Conclusiones.	75
7.2 Líneas futuras.....	75
8 Bibliografía.....	77

9 Anexos.....	79
9.1 Esquema interno Ham-it Up converter.....	80
9.2 Divagaciones sobre el acoplamiento antena cable estación HF CUD.....	81
9.3 Calibración del USB SDR.....	82
9.4 Caracterización A99 con analizador de espectros.....	83
9.5 Instalación final de la antena LW-20.	84
9.6 Glosario de abreviaturas.	85

Índice de Figuras

Figura 1-1 Foto de la primera antena de dipolo inventada por Hertz.	8
Figura 1-2 Diagrama de bloques GSM.	9
Figura 1-3 Diagrama de bloques SDR.	9
Figura 2-1 Logotipo del JTRS.	17
Figura 2-2 Proyectos ACTS	20
Figura 2-3 SDR-1000.	22
Figura 2-4 Arquitectura software del receptor SDR-1000.	22
Figura 2-5 Transceptor Flex-5000A.	24
Figura 2-6 Perseus SDR.	24
Figura 2-7 SunSDR-MB1.	25
Figura 2-8 SunSDR2.	26
Figura 2-9 Receptor SDR Colibri DDC.	26
Figura 2-10 Receptor SDR MINI PORTABLE	27
Figura 2-11 Receptor SDR DX PATROL.	27
Figura 3-1 Diagrama de un receptor SDR 1000	30
Figura 3-2 Secuencia de trabajo de las señales al pasar por un mezclador.	31
Figura 3-3 Receptor homodino	32
Figura 3-4 Receptor superheterodino.	32
Figura 3-5 Esquema de funcionamiento mezclador y posterior filtrado.	33
Figura 3-6 Principio del método de fase para generar señales SSB.	34
Figura 3-7 Principio del método de cuadratura IQ para señales de SSB.	35
Figura 3-8 Esquema del funcionamiento de un mezclador por cuadratura o mezclador IQ.	36
Figura 3-9 Representación vectorial de las señales I-Q desfasadas 90°.	37
Figura 4-1 Respuesta del receptor a una señal de HF.	39
Figura 4-2 Ejemplo de cálculo de enlaces radio en HF utilizando VOACAP.	42
Figura 4-3 El nuevo Teatro de Operaciones necesita integración e interoperabilidad.	43
Figura 4-4 Arquitectura de la prueba de implementación del BFEM a nivel nacional.	44
Figura 5-1 Esquema general de la instalación.	45
Figura 5-2 Ejemplo de UNUN 9:1.	46
Figura 5-3 Diagrama de radiación de la antena LW-20 en 4nec2.	48
Figura 5-4 SWR y coeficiente reflexión.	48
Figura 5-5 Diagrama de radiación 3-D.	49
Figura 5-6 Diagrama de radiación de un monopolo vertical de longitud $\lambda/2$.	50
Figura 5-7 SWR, coeficiente reflexión y diagrama de radiación 3-D.	51

Figura 5-8	NooElec NESDR USB RTL-SDR con su envuelta de aluminio.....	52
Figura 5-9	Placa base del Up converter.....	52
Figura 5-10	Esquema de funcionamiento de un Up converter.....	53
Figura 5-11	Convertidor de frecuencias a 100 MHz.....	54
Figura 5-12	Dongle TV-FM. RTL2832-R820T con el diodo de protección BAV99.....	55
Figura 5-13	Cable RG174.....	55
Figura 5-14	Adaptador SMA-BNC.....	56
Figura 5-15	Interfaz SDRSharp#.....	57
Figura 5-16	Diferentes posibilidades en OPCION RADIO.....	58
Figura 5-17	Diferentes posibilidades en AUTO TUNER.....	58
Figura 5-18	FFT Display.....	59
Figura 5-19	Espectrograma de frecuencias en la banda de 7 MHz.....	59
Figura 5-20	Esquema de bloques utilizado por GNURadio.....	60
Figura 5-21	Interfaz del programa GNURadio.....	61
Figura 5-22	Esquema del receptor AM implementado en GNURadio.....	62
Figura 5-23	Esquema del receptor FM implementado en GNURadio.....	63
Figura 5-24	Terminal con comando ifconfig para conocer dirección local.....	64
Figura 5-25	Fichero de configuración de WebSDR.....	65
Figura 5-26	Fichero .html de la aplicación desarrollada.....	65
Figura 6-1	Instalación SDRSharp#.....	67
Figura 6-2	Resultados prueba receptor AM.....	71
Figura 6-3	Resultados prueba receptor FM.....	72
Figura 6-4	WEBSDR-CUDENM (I).....	73
Figura 6-5	WEBSDR-CUDENM (II).....	73

Índice de Tablas

Tabla 2-1 Porcentaje de representacion de cada uno de los entes del comercio de SDR.....	21
Tabla 5-1Tabla TUNER-RANGO DE FRECUENCIAS.....	51
Tabla5-2 Kit NooElec HF.	56
Tabla 6-1Relación de ‘EMISIONES INTERESANTES’.....	68

1 INTRODUCCIÓN, MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción.

Un sistema de Radio Definida por Software (*Software Defined Radio*, SDR) es un sistema de radiocomunicación donde la mayor parte de los componentes necesarios se realizan por software en lugar de por hardware.

Desde el último tercio del siglo XXI con la llegada de los ordenadores personales, se han sustituido muchos de los dispositivos físicos que formaban parte de la vida cotidiana por programas informáticos. Como ejemplo de esto tenemos la calculadora mecánica Pascalina que con la llegada de la era digital se convirtió en un simple microchip con una potencia de cálculo infinitamente superior. Este último a su vez ha sido sustituido por innumerables emuladores informáticos y por una herramienta software mucho más potente denominada hoja de cálculo.

En el campo de las comunicaciones por radiofrecuencia no ha sido distinto. Los primeros equipos consistían en voluminosos sistemas compuestos por circuitos formados por enormes válvulas que han evolucionado hasta convertirse en pequeños circuitos integrados de silicio.

Gracias a los avances realizados en lenguajes de programación de alto nivel así como en la potencia de los modernos procesadores informáticos los circuitos digitales pueden ser emulados por software. Así pues, los sistemas radio están prescindiendo cada vez más de componentes físicos en aras de un gran aumento de sus componentes lógicos, más baratos, más dinámicos y más flexibles.

Todo esto parece conducirnos a una revolución de los sistemas de comunicaciones donde los componentes hardware no serán lo que limite los servicios disponibles para el usuario.

Durante la Primera Guerra Mundial uno de los principales medios de comunicación de tipo táctico eran las palomas mensajeras y en muchos países, incluido el nuestro, este medio de comunicación se ha mantenido prácticamente hasta la actualidad. Este hecho nos debe hacer reflexionar sobre el porqué de la convivencia de un medio tan arcaico durante casi un siglo con los modernos sistemas diseñados para la explotación del espectro electromagnético. Es decir, hasta hace pocos años parecía seguir siendo útil un medio antiguo pero fiable y económico, en comparación con otros más modernos pero quizás más vulnerables y muchísimo más caros. De modo que parece que la tendencia actual es la de encontrar un medio que nos permita un intercambio de información de un volumen igual o superior al de los medios actuales, al tiempo que robusto, interoperable y presumiblemente menos costoso.

Tradicionalmente los sistemas de telecomunicaciones, y en particular los sistemas de radiofrecuencia, se han descrito como el arte de aplicar las ecuaciones de Maxwell con el objetivo de comunicarse. Si hasta la actualidad estas aplicaciones se han realizado mediante componentes

hardware, la tendencia actual es la de aplicarlas de manera computacional, ya que, si algo es fácilmente implementable mediante un programa son los algoritmos y, al fin y al cabo, lo que desarrollaron Faraday, Gauss, Ampère, Lenz y aglutinó Maxwell, pueden traducirse a algoritmos.

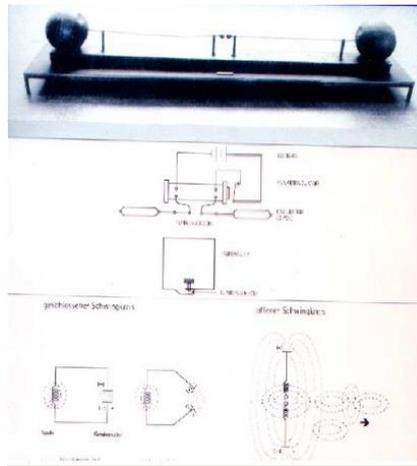


Figura 1-1 Foto de la primera antena de dipolo inventada por Hertz.

Uno de los padres de los sistemas de radiofrecuencia fue Heinrich Rudolf Hertz que en 1895 ya usó la una antena sintonizable, la antena de dipolo (**Figura 1-1**). Y decimos “ya usó” intencionadamente dado que, como veremos más adelante, el futuro va encaminado hacia ese principio de antena. A partir de entonces la búsqueda y el reto de las comunicaciones radio ha sido la explotación del espectro electromagnético. Durante más de cien años las herramientas con las que se ha contado han sido muy variadas: desde el primer sistema FDMA¹, desarrollado por el inventor danés Valdemar Poulsen en 1905, la modulación en amplitud (AM), que introdujo el canadiense Reginald A. Fessenden entre 1902 y 1906, y la modulación en frecuencia (FM), inventada por el ingeniero eléctrico estadounidense Edwin Armstrong en 1933. Sin embargo la mitad de todo el espectro utilizado por cada una de estas técnicas se desperdiciaba debido a las tolerancias de los filtros y los osciladores.

A partir de los años 70, [1] con el despertar de la era digital, aparecieron nuevos conceptos de radiocomunicaciones. Buen ejemplo de esto es el NMT (Nordisk Mobil Telefoni) que es el primer sistema de telefonía celular totalmente automático para el que se utilizaba multiplexación FDMA¹, modulación de voz FM, un procesamiento analógico en banda base, una compresión analógica de la voz y, lo realmente novedoso, un sistema de radio controlado por software.

En los mismos años 70 apareció POCSAG que introdujo un sistema de contador y de divisiones temporales para transmitir datos a los “buscas” (*paggers*) que demostró ser una manera eficaz de optimizar la explotación del espectro electromagnético. La idea de transmitir voz digital vía radio se hizo posible cuando J. Flannagan demostró que era posible mediante la codificación de voz por baja tasa de bits que desarrolló en 1972 en los Laboratorios Bell. Consiguió codificar la voz a 8 Kbits/seg. Una vez se consiguió la codificación de la señal, la experiencia en las transmisiones demostró que la distorsión por trayecto múltiple y la atenuación irregular de dicha señal afectaba más a los bits que a la voz analógica. Así pues, se tuvieron que buscar otros principios de modulación y códigos de protección de canal. El GSM (Sistema Global para las comunicaciones Móviles) fue una clara consecuencia de lo anterior, separó el desarrollo de los circuitos integrados digitales de la propia aplicación. De este modo GSM condujo a la consecución de una de las bases de la radio definida por software: el procesador digital de señal, más conocido como DSP.

¹ Son las siglas de *Frequency Division Multiple Access* (acceso múltiple por división de frecuencia), es una técnica de multiplexación en la que el acceso al medio se realiza dividiendo el espectro disponible en canales con frecuencias distintas en cada uno de ellos.

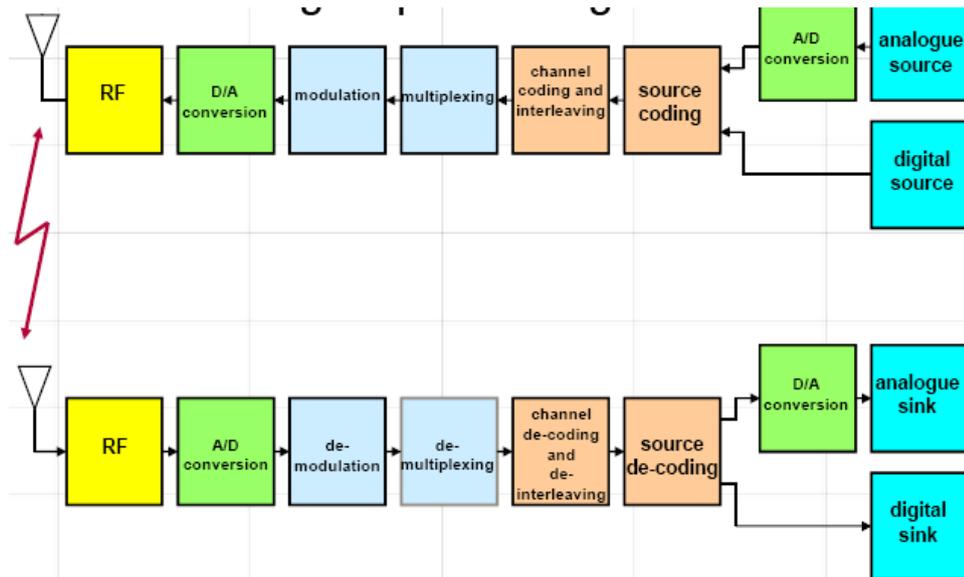


Figura 1-2 Diagrama de bloques GSM.

Como se puede apreciar en el diagrama de bloques de la **Figura 1-2**, cada uno de los bloques se corresponde con una unidad hardware distinta y el problema se complica aún más en los móviles de última generación en el que conviven varios estándares diferentes incompatibles entre sí.

La radio definida por software[2], aparece como solución de raíz a estos problemas de coexistencia de tecnologías. La filosofía es, si la diferencia entre todos estos sistemas es la forma de onda, es decir, el modo en que se varía la forma de la señal portadora en el tiempo y cómo esa señal accede al medio, si se consigue definir dicha forma de onda mediante software no será necesario integrar diversos sistemas mediante diferentes componentes físicos sino cargar en un mismo sistema diferentes programas informáticos. De manera que el diagrama de bloques quede como el que se muestra en la **Figura 1-3**.

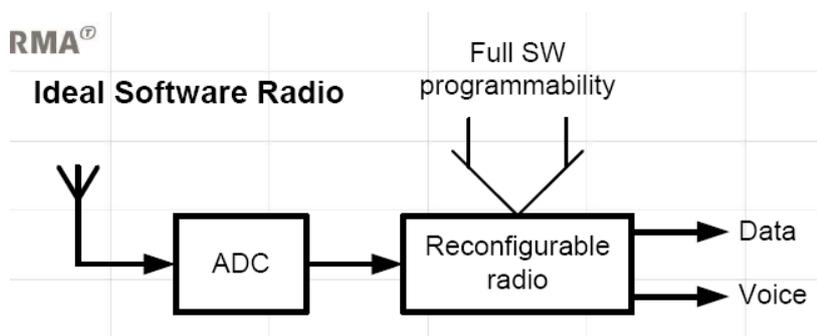


Figura 1-3 Diagrama de bloques SDR.

De este modo, y adelantándonos un poco al futuro, lo más probable es que dentro de unos años, con una tecnología con una potencia de procesamiento superior, los sistemas de radio sean definidos con software y el único elemento físico insustituible sea la antena. Esto posibilitará que se hable de conceptos como el de radio cognitiva², poco viables con la tecnología actual. La característica

² Radio Cognitiva: es una tecnología que permite que el transmisor/receptor de radio de un dispositivo conozca y se adapte a su ambiente (espectro electromagnético), aprendiendo de experiencias previas y adaptándose al entorno, para ser así mucho más eficiente.

principal que presenta esta tecnología, es la reducción de la electrónica asociada a los transmisores y receptores y demás circuitería. Esto se consigue, trasladando ciertas funcionalidades que antes recaían en el hardware a funciones implementadas por software. Introducir dichas funcionalidades software permite añadir más flexibilidad al sistema, facilitando además la capacidad de una rápida reconfiguración del enlace y de sus parámetros tales como frecuencia, ancho de banda, modulaciones y potencia. En un entorno ideal, en un sistema SDR la señal será digitalizada lo más cerca posible de la antena, es decir, trasladaríamos lo más cercano posible a la antena la frontera entre el mundo analógico y el mundo digital. Podemos decir que SDR es una técnica que consiste en poner el código de software lo más cerca posible de la antena, lo que hace que los problemas de radio en hardware se conviertan a problemas de radio en software. La característica fundamental del SDR es que las formas de onda transmitidas se definen por software, y este mismo software demodula la forma de onda recibida.

El presente trabajo tratará de abordar las cuestiones más importantes, referentes a éste nuevo modo de radiocomunicaciones. Para ello se pondrá en marcha un sistema de recepción SDR compuesto por un receptor, un convertidor de frecuencias, y dos antenas (una de ellas pendiente de instalación en el momento de escribir esta memoria). Además se comprobará la recepción de dicho sistema con señales HF (dada la importancia de esta banda en las comunicaciones militares a larga distancia). Para llevar a cabo el proyecto, se pondrán en marcha diversos software en entornos de trabajo diferentes (Windows y Linux), con los que se realizarán pruebas experimentales para determinar el comportamiento de las dos antenas utilizadas.

1.2 Motivación.

El gran auge de las nuevas tecnologías implementadas por software y la gran evolución de los ordenadores de propósito general han dado lugar a la proliferación de estándares radio que requieren terminales, estaciones e infraestructuras de lo más complejas en algunos casos. La principal motivación del presente trabajo es profundizar en el conocimiento de estos nuevos conceptos, en especial en la tecnología conocida como SDR como posible solución a estos problemas. Para investigar en este campo, nos gustaría maximizar la flexibilidad de un sistema de comunicaciones basándonos en equipos comerciales de bajo coste.

El objetivo es experimentar para extraer conclusiones que puedan ser de utilidad desde un punto de vista académico (en concreto el uso de dichos dispositivos en la parte práctica de la asignatura Sistemas de Radiocomunicaciones del Centro Universitario de la Defensa). Por otro lado, el hecho de que sea una tecnología basada en software, hace que el coste del desarrollo se vea reducido drásticamente, lo que motiva a la instalación de una posible futura estación transceptora multibanda basada en estas tecnologías.

Desde otros puntos de vista, como el ecológico por ejemplo, se puede ver que los residuos industriales se verán reducidos considerando que SDR, "elimina" mucho hardware. Desde el punto de vista legal, muchos aspectos regulatorios también pueden verse facilitados, especialmente la certificación de terminales teniendo en cuenta que es sólo el software lo que debe certificarse. También existen muchas ventajas que nos han hecho pensar en esta tecnología relacionadas con la calidad de los servicios de soporte por parte de los operadores, ya que las actualizaciones, adición de servicios y seguimiento a los usuarios, se realizarán de manera más eficiente.

La banda elegida es HF pues se trata de un margen de frecuencias con un gran alcance. Además, permite un reducido ancho de banda a la hora de realizar el muestreo y posterior procesado de las diferentes señales radio. Otro de los objetivos que motivan la elección de esta banda en concreto, es el interés en comunicaciones militares en esta banda.

En general, la tecnología SDR es una motivación ya que por su propia filosofía posibilita múltiples aplicaciones, incluyendo nuevos terminales para soportar servicios avanzados de radiocomunicaciones, infraestructura de comunicaciones (estaciones base principalmente), soporte a tecnologías acceso radio banda ancha, tanto en entornos privados como públicos (educación, ocio, emergencias, militar, trabajo, etc.).

1.3 Objetivos.

Este trabajo tiene como finalidad principal aproximar al lector a la tecnología SDR, así como diseñar, desarrollar y poner en marcha un receptor radio de bajo coste para experimentar en la banda de HF. El trabajo abarcará un estudio en profundidad del estado actual de dicha tecnología, seguido de unos análisis detallados de los componentes (software y hardware) usados en ésta. Seguidamente se analizará el material necesario (antena, conversor elevador, equipo receptor, software, etc.), montaje e interconexión de componentes y la puesta en marcha del sistema de recepción, así como pruebas para la verificación del correcto funcionamiento. La comparativa en diferentes áreas de actuación entre el sistema planteado y el resto de la gama de receptores SDR que se ofertan en el mercado actualmente, será otro de nuestros objetivos.

Uno de las prioridades que se establecen desde un primer momento será la investigación sobre la base de diferentes entornos informáticos. Primeramente bajo Windows (SDR Sharp) y seguidamente, en un entorno Linux (GNURadio). Se establecerá posteriormente una comparativa indicando las aplicaciones que se presentan más interesantes desde el punto de vista docente.

La experimentación en la banda de HF así como el estudio de las diferentes señales recibidas en la estación será el principal objetivo. Se tratará pues, de recabar una serie de frecuencias con una calidad e intensidad suficientes que puedan ser estudiadas y analizadas con el objetivo de determinar la fiabilidad del sistema.

Por último se ha marcado como objetivo final la posibilidad de que todo aquel usuario que esté interesado en nuestro sistema sea capaz de recibir, escuchar y capturar las emisiones que sean continuamente recibidas en el laboratorio de electrónica del Centro Universitario de la Defensa en la ENM (Marín). Para ello se pretenderá poner en marcha un servidor web denominado WEBSDR-CUDENM donde distintos usuarios pueden tener acceso al receptor SDR de forma simultánea.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Definición de SDR.

2.1.1 Definición.

El concepto de SDR [3] vio la luz a finales de los años 70 con la introducción de radios multimodo operando en la banda de VHF. El Air Force Avionics Laboratory desarrolló el programa ICNIA (*Integrated Communication, Navigation, Identification and Avionics*) en los EE.UU. Este programa diseñó una arquitectura de radio multibanda, trabajando en la banda de 30 MHz-1.600 MHz, que fue probada en vuelo con éxito. El informe final del programa fue entregado en 1992 y el ICNIA se convirtió en la primera radio programable. El DoD (Departamento de Defensa) de EE. UU. comenzó el desarrollo de la tecnología SDR a través del proyecto de investigación militar SpeakEasy[4]. El SpeakEasy era un transceptor diseñado por las empresas Hazeltime y Motorola para dotar de comunicaciones tácticas militares desde 2 MHz hasta 2 GHz, y a su vez establecer interoperabilidad entre los diferentes estándares de comunicaciones existentes, alrededor de 10 tipos diferentes de tecnologías, y los equipos radios existentes en el ejército estadounidense (Tierra, Armada y Fuerza Aérea) en un solo equipo programable. El prototipo debía tener la posibilidad de actualizar su código para así tener en cuenta posibles futuros estándares.

Dicho proyecto empezó en 1991 y cuatro años más tarde fue posible lograr los objetivos planteados. En aquel momento el Gobierno de EE. UU. invitó a la industria a participar en el fórum MMITS (*Modular Multifunction Information Transfer Systems*). Este foro fue creado, en 1996, con la idea principal de servir de dirección para el establecimiento de un estándar de arquitectura abierta válido para el programa SpeakEasy. En 1999 el MMITS Forum cambio de nombre pasándose a denominar SDR Forum. Desde entonces ha promovido la tecnología SDR con aplicaciones de telefonía móvil civil, sistemas de comunicaciones personales (PCS) y servicios de telefonía de 3G y 4G.

Actualmente el SDR Forum es denominado Wireless Innovation Forum y está formado por 120 miembros, entre empresas (Harris, Indra, Thales, Huawei, etc.), organismos gubernamentales (NASA, Airforce Research Lab, etc.) e instituciones académicas (University of Oulu, UMIC, etc.). En unión con el Object Management Group (OMG) es la más importante organización internacional que promueve las radios definidas por software. Antes de empezar a diseccionar los aspectos más técnicos de lo que se entiende por SDR, vamos a intentar establecer una definición que se ajuste lo máximo posible a un concepto en continua evolución como es el de esta novedosa manera de entender las comunicaciones vía radio.

Diversos estamentos e instituciones colaboraron en el desarrollo de SDR, pero se puede afirmar que el término SDR fue introducido por Joseph Mitola, (considerado por muchos el padre del SDR)

quien publicó su primer artículo al respecto en 1992. En él definió el sistema SDR como un sistema de radiocomunicaciones en el que los componentes que son implementados típicamente en hardware (como los mezcladores, filtros, amplificadores, moduladores/demoduladores, detectores de señal, etc.) se construyen virtualmente usando el software de un ordenador personal o en cualquier otro dispositivo de computación. Por ser el creador del término *Software Radio*, citaremos también la definición dada por el propio Mitola[5]:

“A Software Radio is a radio whose channel modulations waveforms are defined in software. That is waveforms are generated as sampled digital signals, converted from digital to analog via wideband DAC (Digital to Analog Converter) and the possibly upconverted from IF (Intermediate Frequency) to RF (Radio Frequency). The receiver, similarly, employs a wideband ADC (Analog to Digital Converter) that captures all the channels of the software radio node. The receiver then extracts, downconverts and demodulates the channel waveform using software on a general purpose processor”.

Sin embargo, se pueden encontrar un gran número de definiciones para describir la SDR. De modo que *The Wireless InnovationForum*, en colaboración con el grupo P1900.1 del Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), han establecido una definición de SDR coherente y que proporciona una clara visión general de dicha tecnología y sus beneficios asociados. Así pues la radio definida por software se define como:

“La radio en la que todas o algunas de las funciones de capa física están implementadas por software”.

A partir de ese momento surgen varias definiciones de Software Radio, ya que es un término bastante ambiguo y no marca unas fronteras claras. Algunas de estas definiciones se citan a continuación:

“Sistemas de radio en los que la interfaz aire es configurable por software”

“Radio cuya funcionalidad es reconfigurable por software”

“Software Radio es un radio sustancialmente definido en software y cuyo comportamiento en capa física puede ser significativamente alterado a través de cambios en su software”.

La última definición ha sido acordada entre el IEEE P1900.1[6] y el SDR Forum, [7] y dice:

“Radio en la que algunas o todas las funciones de la capa física son definidas mediante software”.

Técnicamente el Software Radio refleja la unión de dos fuerzas tecnológicas desarrolladas en los años 90, como son las comunicaciones digitales de radio y tecnología de software. El concepto SDR surge, como veremos más adelante, para solucionar de una manera no definitiva los inconvenientes de compatibilidad e interoperabilidad que existen entre los diferentes sistemas radios que operan durante los años 90.

Esta solución se encuentra definiendo un conjunto de procedimientos y técnicas orientadas a realizar el procesamiento de señales de información por medio de procesadores digitales programables, los cuales pueden ser modificados mediante software, logrando así un cambio dinámico, automático y eficiente entre tecnologías sin tener que incurrir en gastos/costos por concepto de nuevos equipos y evitando incrementos considerables en el tamaño de estos.

2.2 Evolución histórica.

2.2.1 Desde el SPEAKEASY hasta el SDR 1000.

En los siguientes epígrafes se va a exponer una pequeña perspectiva histórica de la evolución de las arquitecturas SDR así como su estado actual mediante la exposición de algunos de los proyectos más influyentes de SDR. Se tratará el programa SPEAKeasy, que demostró el potencial de estos sistemas en la radio militar. Más tarde, se verá la evolución del programa JTRS, que pretende reemplazar los sistemas hardware de radio militar por la SDR mucho más flexible e interoperable.

El SPEAKeasy [8] fue un programa del Departamento de Defensa de los EE.UU. cuyo objetivo era, en cooperación con la industria civil, demostrar el buen funcionamiento del concepto de software radio programable multimodo y multibanda operando entre 2 MHz hasta 2 GHz. Se desarrolló para poder operar con múltiples sistemas radio militares mediante el empleo de formas de onda que pueden ser seleccionadas en su memoria o descargadas desde un sistema de almacenamiento interno u OTA (*over-the-air*). El SPEAKeasy se diseñó como una arquitectura totalmente abierta capaz de proporcionar conexiones seguras, interoperabilidad y programabilidad. Los beneficios de la arquitectura incluyen conexiones fiables entre varios radios y puente entre diferentes sistemas. Las aplicaciones militares incluyen sistemas radio tácticos así como comunicaciones de voz y de datos con aeronaves y dentro del campo de batalla. También existen aplicaciones civiles como las comunicaciones de emergencia, comunicaciones entre las fuerzas de seguridad y seguridad pública.

El programa SPEAKeasy evolucionó desde las primeras tecnologías de la fuerza aérea, como el TAJPSP (*Tactical Anti Jam Programmable Signal Processor*) que se inició en 1989 y el sistema ICNIA, que fue uno de los primeros sistemas en usar un módem programable digital desde finales de la década de los 70.

SPEAKeasyPhaseI.

El principal objetivo de SPEAKeasyPhase I (1992-1995) fue desarrollar un módem reconfigurable con una arquitectura abierta y demostrar su viabilidad. Los objetivos eran probar el potencial de la SDR para resolver los aspectos de la interoperabilidad y los problemas relacionados con la disminución en tiempo del ciclo de vida del producto, debido a la rápida evolución de este tipo de tecnologías. Para conseguir esto, la adición de nueva tecnología tuvo que ser controlada y simplificada. Con respecto a este último punto, el objetivo era conformar una arquitectura software que pudiese soportar la adición de nuevas formas de onda.

La extensión total del ancho de banda se dividió en tres sub-bandas con componentes de canales RF independientes. Únicamente la banda media, de 30 MHz a 400MHz, se implementó en lo que fue una demostración de viabilidad.

El diseño de la primera fase (*Phase I*) incluía convertidores de alta y de baja de RF con un amplio ancho de banda, alta velocidad, cuatro procesadores de señal digital Texas Instruments C40 de 40 MHz y un módulo de seguridad de la información (INFOSEC) RISC también de 40 MHz denominado CYPRIS. El módulo INFOSEC incluía tanto seguridad de comunicaciones (COMSEC) como seguridad en la transmisión (TRANSEC). El término COMSEC denota la funcionalidad de encriptación de los datos de un mensaje, mientras que el término TRANSEC denota el apoyo de la funcionalidad de modulación diseñada para proteger las transmisiones de posibles interceptaciones, como puede ser el salto de frecuencias. CYPRIS era programable y los algoritmos criptográficos se implementaron en software. Sin embargo existen algunas publicaciones en las que se menciona que CYPRIS no se usó hasta la segunda fase (*Phase 2*) del SPEAKeasy.

El hardware se construyó usando un chasis VME. El bus VME se usaba para el control y había otro bus especializado en datos. Como parte del interfaz de usuario se usó una estación de trabajo SPARC de la empresa Sun.

El amplio rango de frecuencias se dividió, en tres sub-bandas con partes de radio analógicas diferentes. Las formas de onda de banda ancha, habrían necesitado una mayor potencia de procesado que la que tenían los equipos de la primera fase. La forma de onda genérica de banda estrecha que soporta la primer fase incluía los siguientes métodos de modulación: modulación en amplitud con salto y sin salto desde 50 Hz hasta 20 KHz (DSB, USB, LSB), modulación en amplitud sin salto (ASK, CW), modulación en frecuencia (FM, FSK con 2-8 tonos), modulación en fase (MPSK, DPSK con salto o sin salto y QDPSK, OQPSK), y QAM de 4, 16, 64 y 256. La tasa máxima de datos que soporta es de 20 kbps.

La primera demostración de la primera fase del sistema fue en Agosto de 1994 en la que operó con HAVE QUICK, módem HF, establecimiento automático de link y SINCGARS (*Single Channel Ground to Air Radio System*). La transmisión simultánea en salto de frecuencia en HAVE QUICK y SINCGARS así como el puenteo entre diferentes redes que usan estas formas de onda también se demostró. Modificando una forma de onda en dos unidades también se probó la programabilidad. La demostración de la interoperabilidad del sistema en el aire se hizo en el JWID-95 (*Joint Warrior Interoperability Demonstration*) en 1995. El módem y el software de la primera fase se comportaron bien, pero carecían de facilidad de manejo lo que se mostró como un inconveniente importante.

SPEAKeasyPhaseII.

El objetivo más importante de SPEAKeasyPhase II era extender el espectro operacional del módem hacia una arquitectura abierta, modular y reconfigurable para todo el sistema radio. Se seleccionaron componentes con estándares comerciales y COTS³ con el fin de disminuir los costes. Las capacidades iban a incluir supuestamente un sistema de seguridad reprogramable, un módem de banda ancha y una cobertura de RF continua hasta los 2 GHz.

Motorola, empresa a la que se le concedió el contrato principal de la segunda fase (*Phase II*), diseñó un transceptor de banda ancha de RF, que reducía la distorsión generada por el procesamiento de la IF mediante un diseño homodino. El hardware de procesado de señal consistía en DSP's C40 soportados por FPGA's. Como interfaz de usuario se usó una PDA comercial con un sistema operativo Windows 95.

El subsistema RF de la arquitectura de la segunda fase podía transmitir y recibir múltiples canales de manera simultánea y en el subsistema de módem los parámetros se podían cambiar y los canales podían ser realojados sin interrumpir el enlace y la operación de los canales ya establecidos.

La arquitectura software definía los módulos, como por ejemplo: el RF Control, Módem Control, Procesado de Forma de Onda, etc. Y esta era una distinción importante con respecto a la arquitectura de la primera fase, que se basaba en flujos funcionales y carecía de verdadera división en módulos. Los módulos se comunican a través del bus usando un protocolo estratificado de manera asíncrona sin un sistema operativo centralizado. Las unidades de implementación usan el bus PCI. El bus conforma la capa más baja del paquete de protocolo, esta es la capa física. Había tres capas de software: la capa de enlace, la capa de comunicaciones y la capa de aplicación. La capa de comunicación usaba las capas inferiores para el paso de mensajes, así mismo la capa de comunicación detecta por sí misma los recursos instalados, los enlaces establecidos así como el comportamiento en el buffer y en la cola de los datos. La capa de aplicación contenía el software de forma de onda que usaba las API's de la capa subyacente.

³ COTS (*commercial of the shelf*) es un elemento no-desarrollativo de suministro, que es a la vez comercial y se vende en grandes cantidades en el mercado comercial, y que puede ser adquirido o utilizado bajo contrato gubernamental de la misma forma exacta a como está disponible al público en general.

La segunda fase se planeó para ser un proyecto de cuatro años con versiones de desarrollo de modelo anuales. Las unidades mejoradas de los modelos del primer año se pusieron a prueba en el experimento TX-XX-AWE del Ejército de EE.UU. en 1997. Se pudo establecer un puente de comunicaciones entre un HAVE QUICK UHF de aeronaves con la radio SINCGARS VHF del ejército y una LMR (*Land Mobile Radio*) portátil. La forma de onda para la compatibilidad del LMR se desarrolló en menos de 14 días y se descargó en las unidades de SPEAKeasy durante dicha prueba desde un laboratorio alejado de la zona.

El modelo del primer año tuvo tanto éxito que se pasó a producción y la Phase II no tuvo opción de continuar con más investigación. A pesar de aquel éxito, parte de los objetivos se quedaron en el aire. Las unidades del modelo del primer año no incluían la compatibilidad con todo el rango RF, ni las formas de onda de banda ancha, ni las puertas de datos ni el trabajo en red. Además, las unidades de producción fueron limitadas entre 20 y 400 MHz y sólo se implementaron unas pocas formas de onda.

JTRS (*Joint Tactical Radio System*).

El *Joint Tactical Radio System* (JTRS) [9] es una familia de radios software militares. Son sistemas en red radio modular, multibanda y multimodo. Algunos ejemplos de implementaciones del JTRS con diferentes cometidos son la *Navy Digital Modular Radio* (NDMR), el WITS de Motorola y el SDR-3000 de Spectrum Signal Processing Inc., así como el NRL Software Radio, que es una evolución del JCIT. Existen grupos de dominios específicos, como pueden ser el dominio de sistemas portátiles, el dominio fijo de sistemas marítimos, etc. cada uno de ellos con diferentes necesidades. Sin embargo, la arquitectura JTRS asegura la interoperatividad entre los diseños radio para los diferentes dominios.

El programa JTRS es un proceso que consiste en tres pasos que tienden a definir, estandarizar e implementar una arquitectura para las radios definidas por software. El resultado del primer paso fue la definición de la arquitectura base. En el segundo paso se definió la línea base de la arquitectura hacia el SCA⁴, que será el fundamento para las futuras radios militares. La SCA también se ha usado como punto de partida para los procesos de estandarización de las SDR's comerciales.



Figura 2-1 Logotipo del JTRS.

El equipo del PMCS (*Programmable Modular Communications System*) sugirió por la necesidad del Departamento de Defensa de los EE.UU. de reemplazar los antiguos sistemas radio discretos por una única familia SDR. El programa de investigación PMCS fue el sucesor del programa SPEAKeasy. Usando el conocimiento y la tecnología adquiridos sobre la base del SPEAKeasy, el programa PMCS

⁴ *Software Communications Architecturees* una arquitectura abierta definida por el JTRS y la Oficina del Programa Conjunto (JointProgram Office, JPO), basada en módulos y capas.

desarrolló un modelo de referencia. La JTRS JPO (*Joint Program Office*) es la sucesora del PMCS. El ya mencionado modelo de referencia del PMCS también fue adoptado por el SDRForum.

El MRSC (Modular Software Defined Radio Consortium) compuesto por Raytheon, BAE Systems, ITT Industries y Rockwell-Collins, se contrató en 1999 para desarrollar el JTRS SCA. El contrato MRSC integró los procesos de validación y desarrollo de la arquitectura. Otros siete contratos se dieron a otras compañías con el fin de tener la validación de una tercera parte y, por tanto, para reducir riesgos. Cada uno de los miembros del MRSC proporcionó un prototipo de validación. Como ejemplo, el prototipo de Raytheon fue una radio de cuatro canales que contenía un receptor RF de 2MHz a 2GHz y una implementación del SCA. Se proporcionaron un conjunto de formas de onda que eran VHF-AM, VHF-FM, VHF-ATC (*Air Traffic Control*), UHF DAMA/DASA y HF-ALE (*Automatic Link Establishment*) proveniente de un prototipo de Rockwell.

El JTRS se ha enfocado hacia un software de infraestructura común, como es el middleware, en lugar de una arquitectura detallada. Existían dos razones principales para tomar esta decisión: en primer lugar, en las radios SPEAKEasy el código de infraestructura suponía un tercio de todo el software, y en segundo lugar, la industria apuntó que la portabilidad de los componentes requiere de interfaces radio entre las entidades radio y la plataforma. La arquitectura tuvo que ser definida de una manera clara al tiempo que se mantenía flexible, con el fin de proporcionar extensibilidad hacia nuevas formas de onda y hardware mediante la inserción rápida de nueva tecnología. Así pues, el SCA es el núcleo de la arquitectura JTRS.

El diseño modular tanto del software como del hardware permite introducir mejoras y reemplazar los componentes de una manera sencilla. Las formas de onda heredadas y las nuevas formas de onda, son implementadas en software. El software de la forma de onda debe ser común para todas las implementaciones con el fin de asegurar la interoperabilidad. Los últimos documentos de los requerimientos operacionales incluyen treinta y tres formas de ondas que debe soportar cada implementación de JTRS. Las capacidades de JTRS son evolutivas en el sentido en que se pueden incrementar al tiempo que lo hacen los avances tecnológicos o los fondos destinados a ellos.

WITS (*Wireless Information Transfer System*).

El WITS [8][10] es la radio de Motorola compatible con JTRS basada en la arquitectura del SDR Forum. La arquitectura de WITS se ha construido sobre la extensa experiencia de Motorola en SDR, desde los programas SPEAKEasy, los programas DMR y JTRS y su involucración en el SDR Forum. Los sistemas basados en WITS son usados por la US Navy y la línea de productos también se ha extendido al mercado civil. Los productos disponibles desde 2002 son radios de dos y cuatro canales que podían enlazar entre sí para formar un sistema de 128 canales independientes.

La arquitectura es una instancia de JTRS. La arquitectura software es una arquitectura SCA por lo que la capa más baja está relacionada con los módulos hardware. Las entidades físicas están mapeadas en módulos hardware y definidas por la arquitectura, con la excepción de la antena y los amplificadores, que se especifican como dispositivos externos. La implementación del hardware está compuesta en su mayoría por LRU's (*Line Replaceable Units*) que están conectadas a través de un conjunto de buses Compact PCI (cPCI). Las LRU's actuales incluyen transceptores, módems, unidades de trabajo en red y módulos INFOSEC.

SDR-3000.

La plataforma transceptora de radio definida por software SDR-3000 una familia de productos diseñados para implementar SDR's dinámicamente reconfigurables, de alto rendimiento y basadas en cPCI. Este tipo de plataforma soporta cientos de canales de transmisión y recepción simultáneos con interfaces aéreos independientes. El Departamento de Defensa de EE.UU. eligió la plataforma de

desarrollo SDR-3000, incluyendo la versión 2.2 del SCA CF desarrollado por Harris Corporation, como un conjunto de hardware representativo de JTRS comercialmente disponible para el desarrollo de la forma de onda.

Otros proyectos SDR.

En los siguientes epígrafes se van a describir otros proyectos de este tipo de sistemas radio como pueden ser el JCIT que es otro SDR militar, mientras que CHARIOT y el SpectrumWare son proyectos académicos aunque subvencionados por DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*). También se verán algunos proyectos Europeos así como el GNURadio el cual se estudiará en una sección aparte dada la importancia de este proyecto particular por sus características diferenciadoras del resto.

JCIT (*Joint Combat Information Terminal*).

El JCIT [11] es una SDR multibanda y multimodo desarrollada por el US NRL (Navy Research Laboratory). El JCIT fue diseñado como un producto desplegable para los sistemas aviónicos del ejército, operando en las bandas de frecuencias desde HF hasta 2.5GHz. El diseño estaba enfocado en la capacidad hardware, es decir, el uso extensivo de los FPGA y los DSP. Este conjunto radio incluye un gran número de elementos de procesado. Soporta una gran variedad de formatos de modulación y estándares. El programa JCIT ha hecho también una contribución a la arquitectura del SDR Forum, como por ejemplo el administrador de dominio, que carga los objetos de formas de onda en los recursos del sistema.

CHARIOT.

El CHARIOT (*Changeable Advanced Radio for Inter-Operable Telecommunications*) fue diseñado en Virginia Tech durante los programas DARPA GloMo (Global Mobile). La contribución de VirginiaTech al programa englobaba varias tecnologías de tipo inalámbrico. El CHARIOT está más íntimamente relacionado con el dominio móvil y portátil. Este tipo de dominio supone un reto especial desde el punto de vista de la capacidad de procesado de señales, cuando son necesarias unas tasas altas de datos. La aproximación del CHARIOT a este aspecto consiste en una estructura formalizada de implementación de una SDR usando hardware reconfigurable. Esto constituyó un capítulo lleno de dificultades ya que el tiempo de reconfiguración de las FPGA's es largo y la implementación usando única y exclusivamente DSP's sería muy larga y cara. Además, el consumo de energía es un factor importante en el dominio de lo móvil. De este modo y como solución aparecieron tres nuevas ideas en este proyecto: las máquinas configurables de computación, la paginación hardware y el proceso basado en corrientes. Estas técnicas permitieron que pequeños dispositivos móviles pudiesen mantener la capacidad de reconfiguración mientras proporcionaban suficiente capacidad de proceso para tasas altas de datos.

El enfoque estaba en la arquitectura formalizada que permitía el uso de hardware reconfigurable dinámicamente en SDR's. Esta arquitectura se diseñó para ser escalable y flexible mediante el uso de un modelo de capas. Esta arquitectura radio basada en capas para interfaces resultó en tres capas: la SRI (*Soft Radio Interface*), la capa de configuración y la capa de proceso. La capa SRI proporciona los interfaces externos así como el control de la capa de configuración. También decide qué forma de onda debe usarse en cada momento. La capa de configuración proporciona los valores de programación de datos y de los flujos de los algoritmos de programación, y proporciona información sobre el estado de los datos a la capa superior. Esta capa también manda mensajes de comando a la capa de proceso. La capa de proceso realiza la verdadera tarea de computación basándose en los comandos recibidos.

El procesamiento basado en corrientes se usa para la comunicación entre capas y en la capa de proceso. Las corrientes de datos y de información de la programación consisten en paquetes repartidos a través de los mismos caminos e interfaces. Esta arquitectura se proporciona a sí misma una red de tuberías de información. Los algoritmos se dividen en módulos, que deben ser diseñados de manera que se puedan realizar sus operaciones independientemente. Usando esta aproximación de procesos basados en corrientes, los nuevos módulos pueden ser añadidos de un forma sencilla y, por tanto, el sistema es escalable. De esta manera también se simplifica el diseño del interfaz.

SPECTRUM WARE.

El proyecto SpectrumWare del MIT utilizó el constante avance del rendimiento de los procesadores de propósito general. Una ventaja de esta plataforma de proceso es que el subsistema radio y las aplicaciones usan el mismo hardware y sistema operativo lo que simplifica la programación. El entorno de desarrollo, que es un sistema operativo tipo UNIX, es ampliamente conocido y maduro. El núcleo del sistema consiste en los algoritmos de la radio implementados en una estación de trabajo. El módulo I/O entre un sintonizador externo de ancho de banda y la estación de trabajo fue un problema que tenía que ser resuelto.

El SPECTRA (*Signal Processing Environment for Continuous Real-Time Applications*) se implementó para permitir un desarrollo rápido de la radio software reutilizable en tiempo real. El SPECTRA consiste en una biblioteca de módulos de procesamiento de señal, un conjunto de módulos de interfaz y un lenguaje de scripts para la definición de las SDR's. Esto soporta diversos métodos de adaptación basados en las necesidades del usuario y del entorno. Una de las innovaciones fue la de hacer un sistema demanda que datos del flujo de procesamiento en lugar de hacer que éste vaya proporcionándolos, esto hace más fácil el procesamiento multi-tasa y disminuye el procesamiento redundante.

Se construyó un sistema experimental que implementó una estación base GSM. En 1998 el equipo de proyecto lo dejó para crear Vanu Inc. Vanu ha construido varias implementaciones software de formas de onda como son los estándares celulares. El software de procesamiento de señal está escrito mayoritariamente usando un lenguaje de alto nivel.

Los SDR's fueron recientemente reconocidos por el FCC (*Federal Communications Commission*) como una nueva categoría de radios. La Vanu Software Radio GSM Base Station de Vanu Inc. fue el primer dispositivo SDR que completó el proceso de certificación de FCC. Esto significó un hecho muy positivo para el futuro del concepto SDR ya que los aspectos regulatorios se han visto como uno de los retos clave.

PERSPECTIVA EUROPEA: PROYECTOS ACTS E IST.

En el contexto del programa ACTS (*Advanced Communications Technologies and Services*), la Unión Europea [3] ha financiado varios proyectos de I+D relacionados con SDR. La **Figura 2-2** muestra la cobertura y el enfoque de los proyectos. Existen áreas donde la cobertura ha sido mínima dentro del programa ACTS, como son los aspectos de red y espectro así como los modelos de negocio.

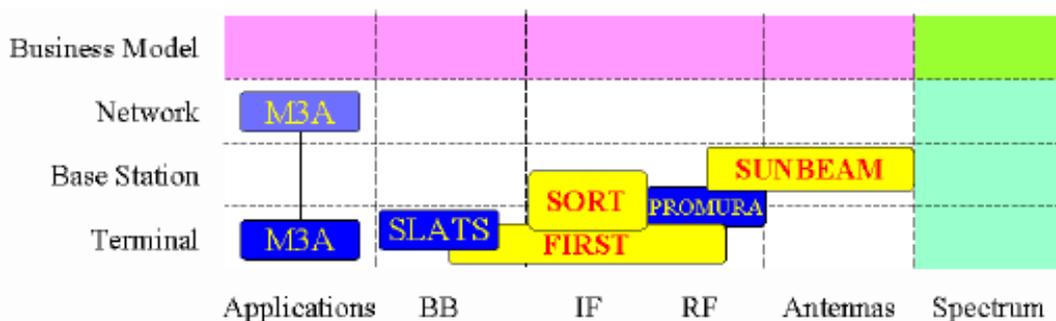


Figura 2-2 Proyectos ACTS

Actualmente el trabajo continúa por el camino del programa IST (*Information Society Technologies*) dentro del *Sixth Framework Programme* de la UE. El proyecto TRUST adoptó una perspectiva centrada en el usuario mediante el control de los requerimientos de dicho usuario con el fin de identificar qué es lo que se necesita para soportar las radios reconfigurables. El proyecto SCOUT está continuando la investigación iniciada por el TRUST en las arquitecturas de terminales y redes reconfigurables. Las áreas de investigación del SCOUT incluyen muchos aspectos técnicos, regulatorios y de negocio.

Por último, [12] daremos algunos datos para conocer un poco más en detalle la evolución que está siguiendo esta tecnología. En el 2004, la mayoría de las aplicaciones de SDR eran de tipo militar considerando los altos costos en su implementación, de hecho, el 76,5% de todas las aplicaciones correspondían a servicios militares, el 7,1% a infraestructura inalámbrica comercial, y el 16,4% a otro tipo de aplicaciones, pero los avances en microelectrónica y en plataformas de desarrollo de software para SDR, han reducido los costos en su implementación y aumenten el volumen de aplicaciones comerciales en el futuro cercano. Se estima que el mercado de SDR en el 2012 sobrepasó los 5,3 billones de dólares de los cuales 335 millones correspondieron a ventas de procesadores de banda base para SDR. Los principales actores de este mercado son: las demandas de los clientes por flexibilidad y actualización, demandas por interoperabilidad, crecimiento en necesidades, cambios en los costos de desarrollo y producción, y las características de los ciclos de vida de los productos.

Teniendo en cuenta lo anterior, la cadena comercial inicialmente planteada para SDR está compuesta básicamente por tres entes principales: los vendedores de dispositivos y componentes base para SDR, los vendedores de infraestructura y equipos basados en SDR, y los usuarios (**Tabla 2-1**). No obstante, teniendo en cuenta que la mayoría de las tecnologías modernas están orientadas a datos y multimedia, tanto los desarrolladores de software base y de aplicaciones como los desarrolladores de contenido y operadores jugarán un papel importante como integrantes de dicha cadena comercial y en especial de los modelos de negocio que se formarán alrededor de SDR y sus evoluciones, para soportar servicios y características, coexistencia e interoperabilidad entre tecnologías/estándares.

Elemento	Porcentaje
Fabricante de equipos	34%
Fabricante de componentes	24%
Desarrollador de aplicaciones	18%
Proveedor de servicios	18%
Gobierno /Elemento regulador	6%

Tabla 2-1 Porcentaje de representacion de cada uno de los entes del comercio de SDR.

2.2.2 SDR de bajo coste.

Dado que el desarrollo de este trabajo estará centrado en un receptor SDR de bajo coste, a continuación se presentará el estado del arte de este tipo de receptores en su versión económica[14].

Desarrollo de los equipos de SDR.

Comenzaremos el estudio de estos equipos con el transceptor **SDR-1000**. Este transceptor fue desarrollado en los primeros años de la década de los 2000. La parte física de este equipo consta de tres placas de circuito impreso apiladas una encima de las otras. Este equipo es capaz de cubrir en recepción desde 12 KHz a 65 MHz, en cobertura continua, y en transmisión sólo dentro de todas las bandas de radioaficionados de 160 a 6 metros, todo ello en sus primeras versiones.

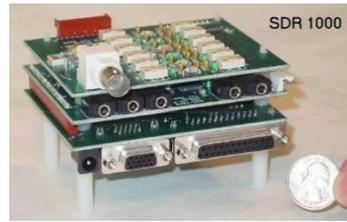


Figura 2-3 SDR-1000.

Un *mezclador bidireccional* maneja las señales I y Q (en posteriores epígrafes se explicarán estas señales), tanto para la recepción como para la transmisión. Y en el caso de la recepción, las señales I y Q pasan por un circuito de control automático de ganancia (AGC) cuya función es prevenir que la recepción de una señal fuerte pueda saturarla entrada del conversor A/D. Las funciones de modulación y demodulación en AM, FM, SSB, PSK (y otros modos que se deseen implementar), filtrado DSP y supresión de ruidos, AGC, control de frecuencia, etc., están implementadas en el software SRD cargado en el ordenador.

Para evitar los inconvenientes de la conversión de las señales de entrada de antena directamente a banda base de RF (nivel de ruido mayor en frecuencias próximas a 0 Hz, típico de las conversiones directas), el receptor SDR no hace una conversión de frecuencia directa a banda base de 0 Hz, sino que hace una conversión a una frecuencia intermedia de 11,025 KHz. Es decir, la frecuencia del oscilador local ha de estar desplazada en 11025 Hz respecto a la señal sintonizada. Ello ayuda a reducir el efecto de los ruidos de fase de la señal generada por el oscilador-generador de frecuencias, y los ruidos próximos a 0 Hz. Una vez que la señal en banda base de 11025 Hz es digitalizada, es fácil usando el software adecuado pasarla a banda base de 0 Hz, antes de continuar con el resto de procesos de tratamiento digital de la señal (filtrados de ruidos, demodulación, etc.).

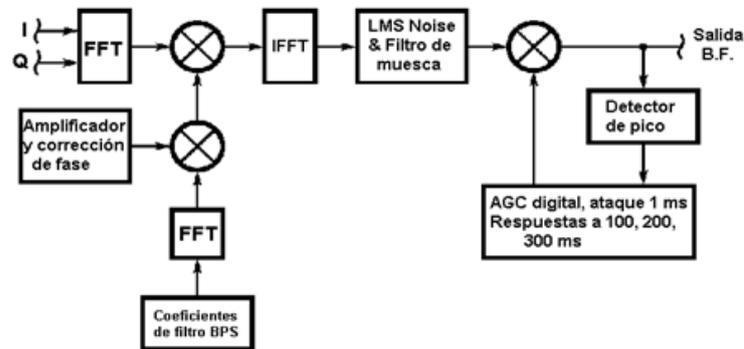


Figura 2-4 Arquitectura software del receptor SDR-1000.

La arquitectura software básica del receptor consiste en lo siguiente: Las señales I y Q son muestreadas, digitalizadas y sometidas a un procesado mediante una FFT (Transformada Rápida de Fourier) de 4096 puntos, por lo que son convertidas al dominio de la frecuencia. Un generador calcula unos coeficientes de filtro pasobanda (BPS) y mediante otro proceso FFT son convertidos también al dominio de la frecuencia. Ambas señales, en el dominio de la frecuencia (señal útil y señal de filtrado) son multiplicadas digitalmente (mediante una función de mezcla digital) para proporcionar el ancho de banda del filtrado máximo de la señal útil y procesarla adecuadamente, por ejemplo para demodularla. La señal filtrada es procesada a continuación por una transformada rápida inversa de Fourier IFFT para convertirla de nuevo al dominio del tiempo. Y ya en este dominio, la señal es sometida a procesos de filtrado adaptativo de ruido (*LMS noise*), filtro de banda eliminada (*Notchfilter*), y control automático de ganancia (AGC) basado en la detección de los valores de pico de la señal. La señal resultante de

todos estos procesos es la señal ya demodulada y filtrada, que llevada al convertor D/A , es convertida a señal analógica para su amplificación y salida al altavoz.

Los requisitos mínimos de ordenador que requiere este equipo son un PC de 600 MHz o más rápido, dotado de tarjeta de sonido, y con sistema operativo Windows 95 o superior. Este equipo goza de muy buena selectividad, y una sensibilidad de recepción buena, aunque al principio no era equiparable a la de un receptor de alta gama (podía ser necesario añadir un preamplificador de antena para mejorar este aspecto). Sin embargo, actualmente utilizando un buen convertidor A/D estos equipos definidos por software ya tienen prestaciones que no envidian a los transceptores de radio convencionales de alta gama.

Tras la aparición de los primeros equipos de radio SDR, como el SDR-1000, comenzaron a aparecer nuevos equipos SDR y softwares SDR cada vez más potentes.

Hay equipos SDR que funcionan empleando la tarjeta de sonido del ordenador como elemento de conversión A/D, y equipos SDR que incorporan una tarjeta DSP especialmente diseñada y que por tanto no requieren de la tarjeta de sonido del ordenador, utilizando éste sólo para controlar funciones básicas del equipo SDR (selección de frecuencia, selección de modos, filtros, etc.). Incluso hay dispositivos DSP con elevadas frecuencias de muestreo, de varios megahercios, lo que permite que el receptor DSP pueda cubrir un ancho de banda amplio, e incluso ser empleado como analizador de espectros.

Hay pequeños kits SDR que utilizan una frecuencia de conversión fija controlada por un cristal de cuarzo, y que conjuntamente con la tarjeta de sonido del ordenador, permite cubrir un pequeño segmento de alguna banda de HF, como es el caso de los kits del grupo SoftRock Radio. Son receptores SDR monobanda de bajo ancho de banda (ya que queda limitada por la resolución de la tarjeta de sonido empleada), sólo unas decenas de Kilohercios, pero que para más de un radioaficionado es suficiente si se dedica principalmente, por ejemplo, a la telegrafía o a otras modalidades cuya asignación en el espectro es de unos pocos kilohercios en las distintas bandas.

Los equipos SDR más potentes disponen de un oscilador local DSS (de síntesis directa), cuya frecuencia de oscilación (y por tanto, la sintonía del equipo) es controlada desde el ordenador a través del software SDR. La conexión para control del equipo SDR desde el ordenador es normalmente a través de conexión USB.

Como ejemplos de radios SDR de grandes prestaciones disponibles desde 2007-2008, y que muestra la potencialidad de lo que se puede lograr con las radios SDR, se pueden citar el transceptor **FLEX-5000A** de FlexRadioSystem, y el receptor **Perseus SDR**.

El transceptor FLEX-5000 es un novedoso transceptor de la firma FlexRadioSystem, que permite la operación en las bandas de HF y de 6 metros, con una potencia de transmisión de hasta 100 vatios en el modelo FLEX-5000A, o 300 vatios en el modelo FLEX-5000D. Incluye su propia unidad DSP, lo que evita tener que funcionar a través de la tarjeta de sonido del ordenador, y la conexión a éste es a través de un interface de alta velocidad Firewire (IEEE-1394). Dispone también de una CPU Intel Core A con sistema operativo Windows XP, lo que significa que tiene integrado un ordenador, e incorporan conexión para ratón y teclado inalámbrico, e incluso en los modelos de la serie D, incorporan una pantalla táctil integrada. Dispone de varias tomas de antenas, tomas de micrófono, altavoz y manipulador telegráfico, y todo ello dentro de una única caja.

Pero este equipo, como la mayoría de los equipos SDR del momento, se controla desde un ordenador externo en el cual funciona el programa SDR que lo maneja. A través de la conexión

través de la conexión USB al ordenador (conexión que admite como máximo unos 480 kbits/s), lo que permite que se envíe un flujo de bits al ordenador de unos 100 Kbits/s, permitiendo enviar señales I y Q digitalizadas de 24 bits a través de la conexión USB con destino a la tarjeta de sonido. Este procedimiento mejora mucho el rango dinámico del receptor.

El uso de mejores chips DSP con mayores velocidades de muestreo y mayores resoluciones puede llevar a la construcción de receptores SDR capaces de explorar simultáneamente muy elevados márgenes de frecuencia y con un buen margen dinámico, pero serían chips DSP muy caros y seguramente para aplicaciones militares, al menos cuando surgió este modelo de receptor SDR.

El receptor está montado en una placa única, en el que hay 9 filtros pasobanda que se seleccionan mediante pequeños relés (controlados a través del enlace USB por el software SDR del ordenador), el circuito de muestreo y digitalización de elevada velocidad, y de comunicación a través del enlace USB 2.0. En el panel frontal dispone de algunos leds indicadores y pulsadores que controlan atenuadores de señal y si han de actuar o no los preselectores de banda. En el panel trasero están la conexión de antena, de alimentación (+5 V), y un conector USB estándar.

2.2.3 Equipos SDR avanzados.

Entre los dispositivos SDR más avanzados tecnológicamente hablando, encontramos los fabricados por la empresa rusa ExpertElectronics [16]. La empresa fabrica diversos tipos de dispositivos. La gama SunSDR es la más novedosa, en especial destacan el SunSDR-MB1 (figura 2-7) y su versión mejorada el SunSDR2. El primero se trata de una mejora de los anteriores SunSDR y es un SDR con el aspecto de emisora convencional obteniendo unos resultados bastante atractivos, teniendo en cuenta que cuenta con diversas características. Es un SDR completo con HF/6M/VHF y 125 W de potencia en HF y 30 en VHF. En su interior lleva un ordenador completo IntelCore i5 y Windows 7 o Linux. Aparte de su función como equipo, al ser un PC, vale para navegar por internet como con un ordenador normal o incluso ver la TV con un dispositivo USB. Como SDR usa su propio software llamado EXPERTSDR2. Posee además un conmutador de antenas, opción de receptor GPS, pantalla de 7 pulgadas y un panel frontal totalmente reprogramable. Conector HDMI para conectarle una gran pantalla. Cubre de 0 a 160 MHz y tiene un precio que ronda los 1.500 Euros.



Figura 2-7 SunSDR-MB1.

En cuanto al SunSDR2, se trata del transmisor más novedoso de la familia SunSDR. Incorpora la capacidad de transmisión de datos vía Ethernet (LAN) o WiFi. Contiene las mismas capacidades que sus predecesores, incorporando la posibilidad de trabajar en modo Duplex o semiduplex. Además está protegido por un blindaje que protege al equipo de interferencias electromagnéticas del PC. Su precio ronda los 1.500 euros en configuración básica y 3.000 con el modelo



Figura 2-8 SunSDR2.

En cuanto a los receptores de la familia ExpertElectronics encontramos el Colibri DDC. Se trata de un pequeño receptor destinado a la recepción de señales en HF (entre 0.09 a 55 MHz). Fabricado con una arquitectura que permite deshacerse del ruido adicional creando un ambiente libre de ruidos. Tiene diferentes modos de trabajo como LSB/USB/DSB/CW/AM/SAM/NFM/WFM. Su interfaz local permite usarse de forma remota o de lo contrario la compartición del dispositivo entre varios PCs para atender peticiones de diferentes equipos. Posee dos canales de entrada para recepción con frecuencias de muestreo superiores a 312 KHz. Permite la grabación de las recepciones con un ancho de banda de 312KHz y su posterior reproducción. Para su conexión al PC se requiere Windows XP/7/8 o Linux, además de un procesador Intel Core2. **Su precio ronda los 625 Euros.**

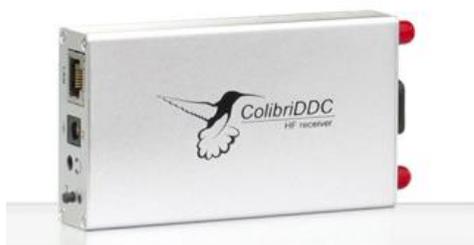


Figura 2-9 Receptor SDR Colibri DDC.

Para finalizar daremos algunos nombres de otros modernos receptores SDR que se encuentran en el mercado[15].

SDR DUAL: FDM-DUO

Aunque no se trata de un receptor simplemente, desde Italia llega este SDR dual, hay versión RX (FDM-s1) y TX (RTX, 5W). Es un SDR con diseño innovador y preparado para funcionar sin PC o bien conectado a un ordenador y aprovechar las ventajas del software.

Precio: 1000 euros.

CR-1 SDR MINI PORTABLE

Se presentó a finales de 2012 y está disponible en USA. Recibe en HF, VHF y UHF de 500 MHz a 30 MHz, 64 a 225 MHz, 87.7 a 107.9 WFM, 118 a 137 Banda aérea y 137 a 225 MHz, 438 a 468 MHz.

Precio: 470 euros.



Figura 2-10 Receptor SDR MINI PORTABLE

RECEPTOR SDR DX PATROL

Este receptor SDR tiene una amplia cobertura de 100KHz a 2Ghz. Posee entradas de antena independientes (HF y V-UHF) con conexión a PC por mini USB. Tiene unos filtros de banda eficientes lo que le permite una recepción muy clara. Además está diseñado con Conectores SMS y un oscilador local de 40MHz para conversión HF.

Precio: 79 euros.



Figura 2-11 Receptor SDR DX PATROL.

Además, las aplicaciones para smartphones (Android) y tabletas en SDR están evolucionando masivamente. “Pocket HAM transceiver” o “Pocket Android AM/CW//SSB Receiver for WebSDR” son dos ejemplos de aplicaciones en fase de pruebas con un futuro bastante interesante.

Como se puede ver con estos ejemplos, los dispositivos SDR son una alternativa muy seria a los equipos de radiocomunicaciones de formato clásico, y más baratos, ya que gran parte de la circuitería es sustituida por el software SDR que los hace funcionar, y con las ventajas añadidas de que las prestaciones de las radios SDR dependen principalmente del software SDR: Añadir nuevos modos de modulación/demodulación, modos digitales actuales y futuros, etc. Se consigue a través del software SDR, mejorando y ampliando éste, mientras que en una radio de formato convencional puede ser necesario añadir circuiterías extras. El tratamiento mediante DSP de las señales mejora los filtros de señales, muy por encima de los filtros analógicos (frecuencias intermedias, filtros de audio, etc.) de las radios convencionales.

Sin embargo hay ciertos problemas relacionados con la implementación actual de estas tecnologías. El volumen de software descargado para los dispositivos reconfigurables, es cada vez mayor y exige complejidad en los componentes, y como primera consecuencia los tiempos de descarga

aumentan considerablemente. Por otro lado, el tiempo de configuración de los dispositivos hardware también aumenta con la complejidad, y aunque interesante, el proceso de iniciación para la implementación de diferentes métodos de gestión para varias unidades SDR en un mismo terminal, y terminales de múltiples antenas ajustadas, va bastante retrasado. Aun así como se propondrá posteriormente se establecerán diferentes soluciones Web, en un entorno informático que va a satisfacer este tipo de necesidades, dando cobertura a un buen número de servidores, con un receptor común.

Si seguimos de manera detallada la evolución de este tipo de receptores, podría afirmarse que los procesos de estandarización van a un ritmo sensiblemente más lento que los procesos de investigación y desarrollo. Es un hecho que al tratarse de un sistema radio que basa su funcionamiento en software aumenta la vulnerabilidad de los sistemas frente a virus y otras amenazas.

Finalmente, gran parte del futuro que tiene SDR depende de los avances que se den en otros campos como la microelectrónica, especialmente en términos de miniaturización, incremento en la capacidad, reducción en consumo de potencia, y modularidad de componentes, así como de factores regulatorios y comerciales que normalmente difieren de un país a otro y afectan de manera distinta a cada segmento del mercado.

3 ESTRUCTURA DE UN RECEPTOR SDR

3.1 Principio de funcionamiento de un receptor SDR.

3.1.1 Introducción.

Para entender el proyecto que se ha llevado a cabo, es necesario mirar un poco más a fondo. El objetivo de este epígrafe no es otro que adentrarnos en el esqueleto que forma un receptor SDR. Para ello hay que establecer en un primer momento las bases teóricas sobre los que nos vamos a apoyar posteriormente.

3.1.2 Funcionamiento.

Primeramente encontramos [14] una **etapa frontal** de radiofrecuencia (RF) cuya función no es otra que convertir la señal de radio recibida, trasladándola a frecuencias muy inferiores. Esta etapa es un conversor denominado de **conversión directa** (es decir, de frecuencia intermedia cero o muy baja), a la cual se le ha añadido unos filtros de banda seleccionables en el paso de antena. Es lo que se conoce como sintonizador o *tuner*. El dispositivo sintoniza unas determinadas bandas que deben coincidir con las de la antena instalada.

Con esta etapa inicial, la señal RF es trasladada al rango de las frecuencias de audio, pero sigue siendo una señal sin demodular. El siguiente paso es demodular la señal, y para ello se hace uso de un receptor SDR y el programa adecuado. Esto es lo que se muestra en el diagrama de la **Figura 3-1**. Esto que se acaba de explicar (conversión directa), no debe confundirse con el proceso de demodulación que permite extraer la señal de voz (moduladora) o datos de la señal de RF, pues ello es lo que se hace en el ordenador con el software adecuado. Dicha señal todavía sin demodular, ocupa un margen de frecuencias que entra dentro del margen que acepta el ordenador. El receptor SDR incluye unos conversores analógico-digital (A/D) que digitalizan las señales presentes en las entradas de la tarjeta, generando un flujo continuo de bits (bus) que representan digitalmente las señales analógicas de entrada. A este respecto, se puede decir que el conversor A/D está conectado casi directamente a la antena. Por otro lado, el receptor proporciona todas las funcionalidades DSP (procesamiento digital de señales) que van a ser necesarias para manejar la señal entrante ya digitalizada.

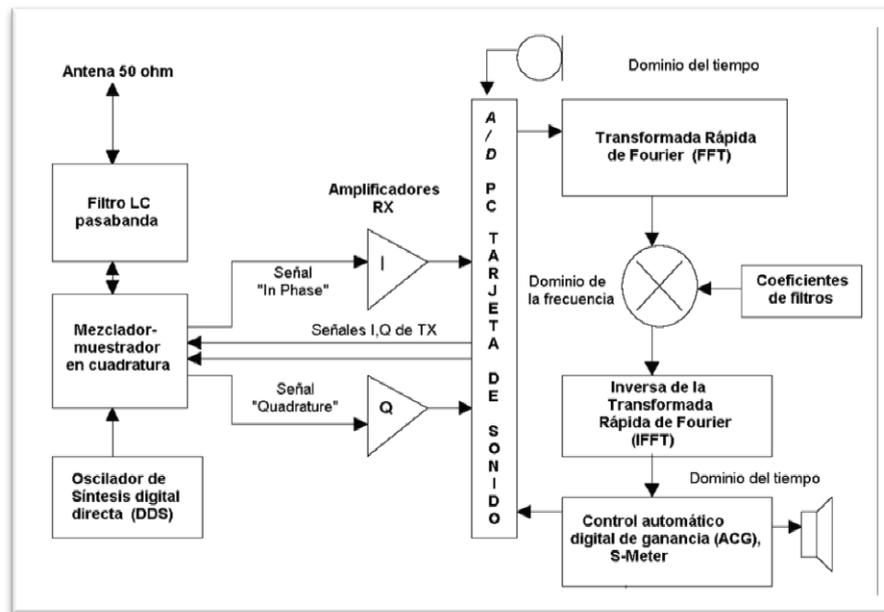


Figura 3-1 Diagrama de un receptor SDR 1000

A la hora de digitalizar las señales de entrada, se transforman las señales analógicas, que son "continuas en el tiempo" (y con un número de valores de amplitud teóricamente infinitos), en una secuencia de señales "discretas en el tiempo", esto es, que se presentan a intervalos de tiempo determinados, y que se denominan "muestras" (es decir estamos discretizando una serie valores continuos en el tiempo en una serie de valores que nuestro ordenador va a ser capaz de interpretar). Una vez digitalizadas estas muestras (transformando cada muestra en un número fijo de bits), las señales eléctricas que las componen (los bits) tendrán un número de valores posibles de amplitud fijo y determinado.

El proceso por el que las señales analógicas de entrada se transforman en señales discretas en el tiempo se denomina "muestreo". A este respecto, en 1933 Harry Nyquist estableció lo siguiente: Cuando se digitalizan señales analógicas, para que posteriormente se pueda recuperar la señal analógica original mediante el proceso inverso (Conversión Digital-Analógica), la señal analógica debe ser muestreada a una velocidad como mínimo igual al doble de la frecuencia más alta presente en la señal analógica. La frecuencia máxima de la señal analógica de entrada es recomendable que sea limitada mediante el empleo de un filtro de pasobanda, denominado "filtro antialiasing". Ello evita el efecto de "aliasing"⁵, por el cual, al recuperar por el proceso inverso la señal analógica original, ésta puede aparecer distorsionada.

Para entenderlo mejor vamos a poner un ejemplo: el oído humano puede llegar a percibir frecuencias en el rango de 20 Hz a 20 KHz (en el mejor de los casos), y por ello la digitalización de las señales de audio de alta fidelidad requiere que sean muestreadas al menos a 40 KHz (40.000 muestras por segundo). De hecho, en el caso de los CD's de audio el muestreo empleado es de 44,100 KHz (lo cual previene también el aliasing). Esta velocidad de muestreo la soporta actualmente también cualquier tarjeta de sonido para sus conversores A/D. Además, muchos receptores incluyen un filtro antialiasing interno con una frecuencia de corte próxima a los 20 KHz.

⁵El aliasing aparece cuando en el proceso de digitalización, la señal analógica de entrada tiene componentes cuyas frecuencias son superiores a la mitad del valor de la frecuencia de muestreo, y no son suprimidas antes de realizar el muestreo.

Tras muestrear y digitalizar la señal, podemos procesarla como queramos, por ejemplo demodulándola: en modulación de amplitud (AM) se haría detectando la amplitud de la envolvente de la señal, en modulación de frecuencia (FM) habría que seguir las variaciones de frecuencia de la señal, etc. Todos estos procesos se realizan mediante cálculos matemáticos adecuados por software. Los resultados numéricos de estos tratamientos matemáticos son también representados por señales digitales, las cuales se llevan internamente a unos conversores Digital-analógicos (D/A), para convertirlas a señales de audio equivalentes, que son amplificadas y conducidas a las salidas de los altavoces (caso de las modulaciones de fonía), o que son procesadas para mostrar la información en la pantalla del ordenador (caso de los modos digitales); de estas últimas ya hablaremos más adelante.

Uno de los posibles procesos de la señal de audio digitalizada es su demodulación, y éste es un proceso que incluye procesos de filtrado, desplazamiento de nivel y algunas otras operaciones que se pueden realizar por software. Cualquier proceso al que queramos someter la señal de audio digitalizada se puede hacer por software, usando el programa adecuado en el ordenador.

Los receptores SDR son capaces de operar con señales de audio analógico de hasta unos 20 KHz como mínimo (hasta 48 KHz y más, si son de calidad), y lo queremos emplear para procesar señales de RF de varios MHz de frecuencia, recibidas en la antena. Dado que no pueden manejar frecuencias tan elevadas, es necesario convertir las señales de RF a señales de frecuencias muy inferiores, en el rango de frecuencias que puedan aceptar (es decir, en el rango de las bajas frecuencias), manteniendo éstas el mismo esquema de modulación de las señales de RF recibidas.

El sistema más habitual para convertir una señal de una banda de frecuencias a otra es mediante el uso de un mezclador, el cual combina dos señales, la que recibimos en antena, con la procedente de un oscilador local, la cual será una señal pura sin modular, y muy estable en frecuencia. Esto es típico en los receptores superheterodinos para convertir la señal recibida a frecuencia intermedia.

En la salida del mezclador tendremos señales cuyas frecuencias serán la suma y la diferencia de las frecuencias aplicadas en ambas entradas del mezclador, la de la señal de antena, f_a , y la generada en el oscilador local, f_o . Además siempre aparece algo de estas dos señales a la salida del mezclador como vemos en la **Figura 3-2**.

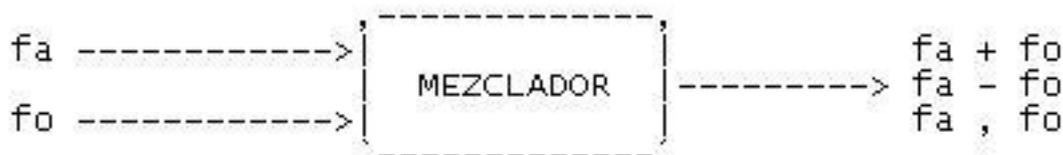


Figura 3-2 Secuencia de trabajo de las señales al pasar por un mezclador.

Si, por ejemplo, recibimos una señal modulada en una portadora de 28 MHz (no importa cuál sea el tipo de modulación) y la mezclamos con una señal pura de 20 MHz (suministrada por un oscilador local), en la salida del mezclador obtendremos varias versiones de la señal recibida, una centrada en 8 MHz ($28-20$), y otra en 48 MHz ($28+20$).

En un receptor que opera por conversión de frecuencias, se debe introducir un filtrado adicional a la salida del mezclador, para dejar pasar la señal que nos interese (por ejemplo, la de 8 MHz), y elimine las demás (las de 48, 28 y 20 MHz en el ejemplo). Eliminar por filtrado las señales no deseadas es fácil, pero supone una pérdida de energía respecto a la señal original, lo que perjudica el rendimiento del receptor en cuanto a la relación señal/ruido (eso es así porque la potencia de la señal

de entrada útil, la de antena en este caso, se distribuye entre sus dos “versiones”⁶ cambiadas de frecuencia, además que el mezclador introducirá pérdidas adicionales en el proceso de conversión de frecuencia).

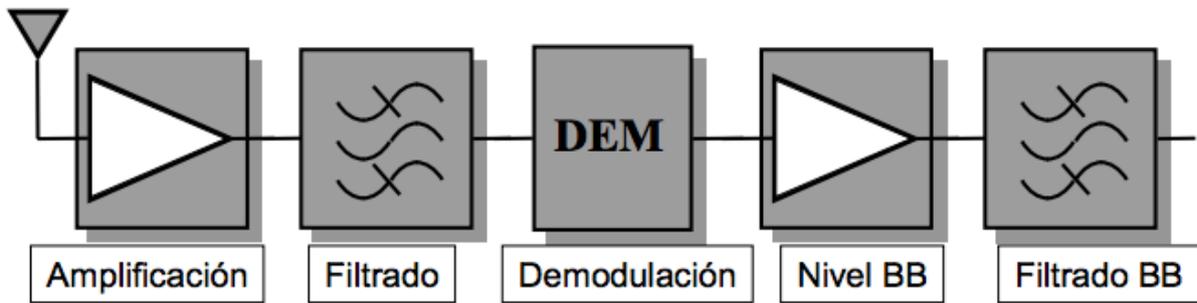


Figura 3-3 Receptor homodino

Los modernos receptores de radio, como son los receptores superheterodinos, operan con este procedimiento: la señal recibida en antena es convertida a una "Frecuencia Intermedia" (FI) de un valor fijo dado mediante el uso de un oscilador local y un mezclador, y la FI obtenida a la salida del mezclador es filtrada y amplificada en una etapa de varios pasos sintonizados a la frecuencia de la FI, de manera que sólo ésta, y no las otras señales que se obtienen a la salida del mezclador, es suficientemente filtrada y amplificada antes de entregarla al demodulador. Dependiendo de la calidad de los pasos sintonizados a la FI, la selectividad del receptor será mejor o peor, esto es, tendrá mejor o peor rechazo a frecuencias adyacentes a la sintonizada. Valores típicos de FI en los receptores superheterodinos ordinarios son 455 KHz (receptores de frecuencias bajas: Onda Media, Onda Larga y también Onda Corta) y 10,7 MHz (para frecuencias más altas, como es la banda de radiodifusión en FM y los buenos receptores de Onda Corta).

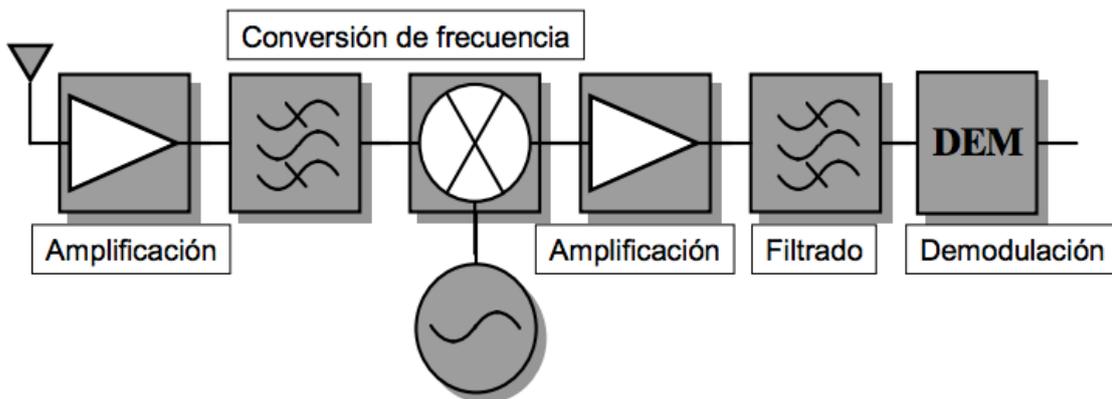


Figura 3-4 Receptor superheterodino.

Pero los receptores superheterodinos tienen un problema: si la frecuencia del oscilador local es f_0 , y la frecuencia intermedia que emplea es FI, el receptor recibirá la frecuencia f_0+FI , pero también recibirá la frecuencia f_0-FI , ya que en ambos casos ambas dan lugar en el mezclador al valor de la

⁶Cuando decimos que estas señales resultantes de la mezcla son "versiones" de la original significa que mantienen la misma modulación que la señal original (la de 28 MHz), solamente difiere la frecuencia, que es diferente a la de la señal original (ha habido un cambio de frecuencia, sin modificar el esquema de modulación).

frecuencia intermedia FI. Si se considera que la frecuencia útil que se quiere recibir es, por ejemplo, f_0+FI , la otra frecuencia que puede recibir, f_0-FI , es una frecuencia perturbadora, que se conoce como Frecuencia Imagen. La frecuencia útil y la frecuencia imagen están distanciadas en un valor de frecuencias de dos veces el valor de la FI.

Normalmente, con un buen filtro sintonizado en la etapa de entrada del receptor se puede rechazar la frecuencia imagen y realzar la frecuencia útil. Así, en un receptor de Onda Media (530-1600 KHz), que usa una FI típicamente de 455 KHz, la frecuencia imagen estará a 910 KHz de la frecuencia sintonizada, y usando un circuito sintonizado en la entrada del receptor a la frecuencia útil, suele ser suficiente para rechazar suficientemente las señales que puedan haber en la frecuencia imagen. Pero a frecuencias más altas, la selectividad del paso de entrada del receptor es claramente insuficiente para rechazar las frecuencias imágenes, y por ello los receptores de Onda Corta de calidad media captan claramente las señales de frecuencia imagen junto con la señal sintonizada.

Para evitar estos inconvenientes, se usan valores de frecuencia intermedia más altos, y esta gran diferencia de frecuencias ya permite atenuar suficientemente la frecuencia imagen con el circuito de sintonía de la señal de antena del receptor.

Sin embargo hay un tipo de receptores que usan un mezclador de señales, pero no emplean ninguna FI; al contrario, convierten la señal directamente a audio, y son los llamados Receptores de conversión Directa. Estos permiten la demodulación de señales de CW (telegrafía) y de SSB por simple conversión de frecuencias. En efecto, supongamos que se tiene una señal de CW en 15.001 KHz y se emplea un oscilador local oscilando a 15.000 KHz. Si ambas señales se combinan en un mezclador, en la salida del mezclador se tendrá, entre otras señales, una señal de CW en audio, con una frecuencia de 1 KHz, señal que corresponde a la diferencia entre la señal procedente de la antena (15.001 KHz) y la del oscilador local (15.000 KHz). Y dado que la CW se transmite como impulsos de portadora, a la salida del mezclador se tendrán impulsos de 1 KHz, que al ser audibles (tras la correspondiente amplificación de audio) corresponderán a la señal telegráfica demodulada.

Pero en este tipo de receptores hay un gran problema: si hubiera otra señal transmitiéndose en 13.999 KHz, demasiado cercana en frecuencia a la de 14.001 KHz como para poderla rechazar eficazmente mediante filtrado en el paso de antena del receptor, esta señal también daría lugar a la salida del mezclador a una señal de audio de 1 KHz, e interferiría a la señal de CW de 1 KHz correspondiente a la señal transmitida en 14.001 KHz. Es por tanto una frecuencia imagen de la frecuencia que realmente nos interesa. Es más, incluso aunque no hubiesen señales en la frecuencia imagen de 13.999 KHz, el ruido de fondo en dicha frecuencia aparecería en la salida del receptor, empeorando la calidad de la señal útil de CW recibida.

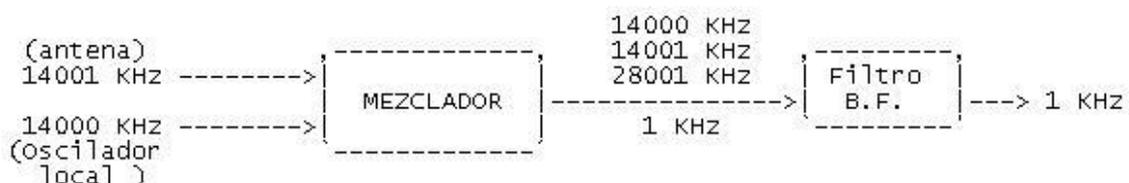


Figura 3-5 Esquema de funcionamiento mezclador y posterior filtrado.

La conversión directa también adolece de otros inconvenientes: El nivel de ruido en la señal demodulada tiende a aumentar por diversos factores a medida que la frecuencia de dicha señal se

aproxima a los 0 Hz, empeorando la calidad de ésta. Contribuyen a ello ruidos de diversos orígenes: ruidos de zumbido de red eléctrica (50 o 60 Hz) inducidos, ruidos mecánicos microfónicos, el propio ruido generado por los semiconductores (que depende de $1/f$), e incluso el propio ruido de fase.

3.1.3 La conversión de frecuencias en un receptor SDR.

El simple procedimiento de conversión de frecuencia en un receptor de conversión directa no es el adecuado para un receptor SDR por los problemas anteriormente mencionados. Sin embargo el tipo de conversión que se utiliza en estos receptores, elimina estos problemas, y se basa en el procedimiento que en los primeros días de la SSB se utilizó para conseguir la modulación de Banda Lateral Unica (BLU), eliminando en el proceso de modulación, la banda lateral que no interesaba, sin el uso de los filtros a cristal de pasobanda estrecho (2,5 - 3 KHz) que se usan hoy en día para dejar pasar la banda lateral que interesa y eliminar la otra.

Dicho método, conocido como "Método de Fase" consistía en usar un doble mezclador balanceado al cual se aplicaban dos versiones de la frecuencia del oscilador local, una en fase y la otra desfasada 90 grados, y dos versiones de la señal recibida en antena, una en fase y otra desfasada 90 grados. Si ésta última estaba desfasada exactamente +90 grados respecto a la otra, a la salida del mezclador se obtenía la banda lateral superior, cancelando la banda lateral inferior, mientras que si estaba desfasada -90 grados, la que se cancelaba era la banda lateral superior, obteniéndose la banda lateral inferior como se muestra en la **Figura 3-6**. Este procedimiento puede aplicarse a un receptor de conversión directa, teniendo como ventajas que no habría problemas de frecuencia imagen, aunque ésta estuviera muy próxima a la frecuencia sintonizada (en los moduladores de BLU según el procedimiento del método de fase, cada banda lateral única es frecuencia imagen de la otra). En el ejemplo anteriormente mencionado, si el oscilador oscila a 15.000 KHz, podría recibir limpiamente una señal de frecuencia 15.001 KHz como un tono de 1 KHz (diferencia entre frecuencias) sin que fuera perturbada por la presencia de señales en 14.999 KHz. Si se cambiara el desfase de +90 grados de la señal recibida en antena (y que es desfasada) por -90 grados, se recibirían las señales de 13.999 KHz sin que fueran perturbadas por señales presentes en 14.001 KHz.

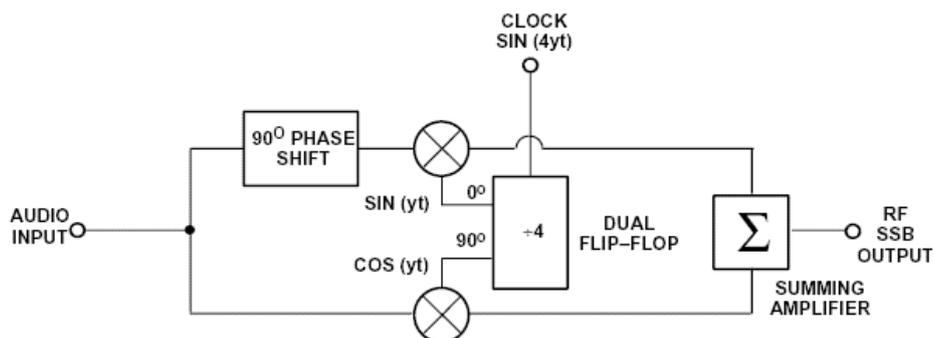


Figura 3-6 Principio del método de fase para generar señales SSB.

Este procedimiento, empleado tanto para la modulación como para la demodulación, se denomina Mezcla en cuadratura, Detección de SSB por giro de fase, o Mezcla con rechazo de imagen. El doble mezclador empleado se denomina Mezclador de cuadratura o Mezclador IQ. Esta última denominación se debe a que la señal convertida correspondiente a la original no desfasada se denomina Señal en Fase o Señal I (*In-phase Signal*), mientras que la señal convertida correspondiente a la señal original desfasada +90 (o -90) grados se denomina Señal en Cuadratura o Señal Q (*Quadrature Signal*).

A la salida de los dos mezcladores se obtienen las señales I y Q, que están en Cuadratura de Fase. Ambas señales son exactamente iguales, pero desfasadas 90 grados (en el caso ideal). Llevando estas señales a un circuito sumador adecuado⁷, se obtendría a la salida de éste la señal deseada, libre de la frecuencia imagen.

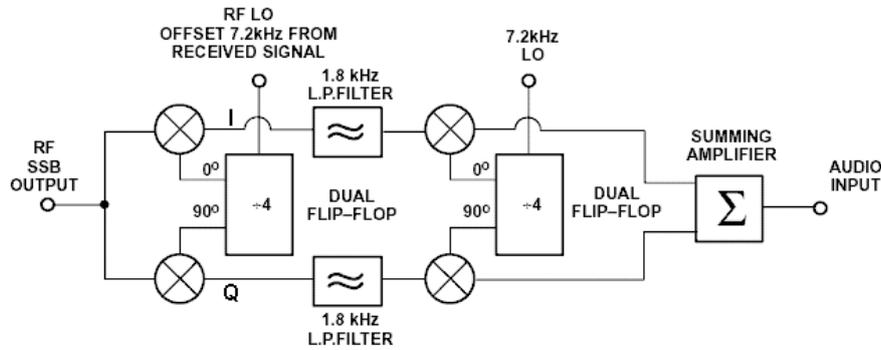


Figura 3-7 Principio del método de cuadratura IQ para señales de SSB.

Este procedimiento, como se ha dicho, ha sido empleado con cierto éxito en multitud de equipos de SSB en los primeros años de este nuevo modo de modulación que supliría a la AM, hasta la aparición de los equipos de SSB con filtros de banda de cristal a principios de los años 60. Pero el problema de este sistema era que para que fuera realmente efectivo, las dos señales I y Q debían estar bien balanceadas en amplitud y fase, ya que incluso mínimas inexactitudes en el desfase de 90 grados de la señal Q, o en la igualdad de amplitud de las dos señales I y Q, puede dar lugar a que no desaparezca totalmente la banda lateral (frecuencia imagen) que debía suprimirse, perjudicando el rendimiento del equipo. Es fácil pensar que el hecho de conseguir implementar mediante circuitos analógicos (por aquel entonces no existían circuitos digitales), un desplazador de fase de +90 grados, que fuera preciso y uniforme en amplitud y en desplazamiento de fase en todo el ancho de banda de las señales de audio moduladoras (300 a 3400 Hz), era tremendamente difícil; por ello nunca se conseguía una supresión elevada de la banda lateral no deseada. No obstante, de poderse conseguir desfases precisos de 90 grados, la modulación y demodulación eficaz de la SSB (y del resto de modulaciones) se volvería fácil, y más fácil aún si se digitalizan las señales I y Q. De hecho, actualmente muchos circuitos integrados de RF emplean exclusivamente las señales I y Q para realizar diversos procesos.

Los equipos SDR se basan en este principio, como se ve en **Figura 3-8** que muestra el principio de funcionamiento de un mezclador en cuadratura: la señal de RF de frecuencia f_c es llevada a dos mezcladores idénticos en paralelo. El oscilador local genera la frecuencia de mezcla, f_{LO} , que es inyectada directamente al mezclador inferior (señal "seno") para obtener la señal I a la salida del mezclador. Una parte de la señal f_{LO} pasa por un desfasador de 90 grados para obtener una señal del oscilador local desfasada 90 grados (señal "coseno") que es llevada al mezclador superior, obteniéndose a su salida la señal en cuadratura Q. Las señales I y Q pasan por sendos filtros de banda (LPF) para eliminar las frecuencias no deseadas que aparecen en los procesos de mezclado de las señales, filtrando la señal deseada, y a continuación, son muestreadas a la frecuencia de muestreo (f_s) y digitalizadas individualmente en sendos conversores analógico-digitales (A/D) para obtener las señales I y Q digitalizadas $I(t)$, $Q(t)$, discontinuas en el tiempo. En un receptor SDR, las señales de antena se

⁷En el circuito sumador (**Figura 3-7**) dependiendo de la fase de la señal Q respecto a la señal I, se suprime como frecuencia imagen las frecuencias recibidas que estén por encima o por debajo de la frecuencia del oscilador local, reforzándose la otra.

someten a desfases de 90 grados precisos para obtener señales de la misma amplitud y desfasadas 90 grados exactamente.

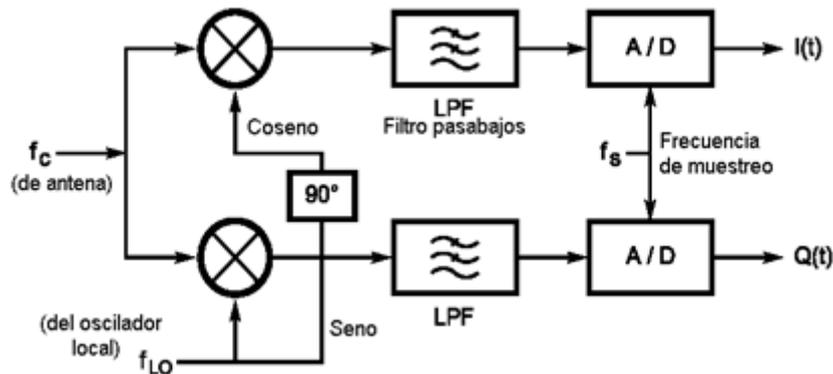


Figura 3-8 Esquema del funcionamiento de un mezclador por cuadratura o mezclador IQ.

Además, si se emplean mezcladores idénticos, la supresión de las frecuencias imagen sería total. En la práctica, en un buen receptor SDR de conversión directa, se llegan a obtener supresiones de frecuencias imagen de hasta 40 dB y más.

En epígrafes posteriores se analizarán en detalle las características de los elementos que se han utilizado para el desarrollo del proyecto, sin embargo es importante mencionar que construir un receptor SDR para ser usado con el ordenador, aunque "relativamente sencillo" no es trivial: hay que realizar una "etapa frontal" que incluya el paso de antena y el mezclador de conversión directa en cuadratura, capaz de entregar en sus dos salidas las señales I y Q (señales idénticas pero desfasadas 90 grados) a nivel de bajas frecuencias, y entregar ambas señales al conversor A/D que permite muestrear y digitalizar ambas señales. Una vez realizado esto, el software SDR cargado en el ordenador se encargará de todo lo demás, obteniéndose el resultado del procesado de las señales en los altavoces..

3.1.4 La demodulación en SDR.

Hasta ahora se ha descrito cómo se traslada la señal de RF a baja frecuencia (es decir, a Banda base), y la generación de las componentes I y Q; falta todavía filtrar y demodular las señales. Este proceso es realizado digitalmente, por lo que hay que digitalizar las señales I y Q y luego procesarlas digitalmente.

Sin emplear más que los programas adecuados, casi todos los receptores SDR pueden ser programados para actuar como un CAG⁸, demodular una señal, eliminar señales no deseadas, reducir el ruido (NB), silenciar (*sqelch*),... absolutamente todo lo que puedan hacer los equipos de radio, además de algunas cosas de las que estos últimos son incapaces; y todo ello en el ordenador. Cuando tenemos una señal modulada en amplitud (AM), lo único importante de la señal es la amplitud de la envolvente de la señal de RF (no la amplitud instantánea de la onda, sólo la de pico o cresta de cada semiciclo de la onda). Un detector de AM a diodo simplemente responde a la amplitud de la envolvente, que es la señal moduladora de BF que interesa obtener.

⁸ CAG (controlador automático de ganancia). Tiene como función mantener relativamente constante el nivel de la señal de salida independientemente de las variaciones en la amplitud de entrada.

En un receptor que maneje señales I y Q, al estar ambas desfasadas 90 grados entre sí, si se representan vectorialmente sus amplitudes y fases en un gráfico de ejes de abscisas y ordenadas (x, y), la representación será del siguiente tipo:

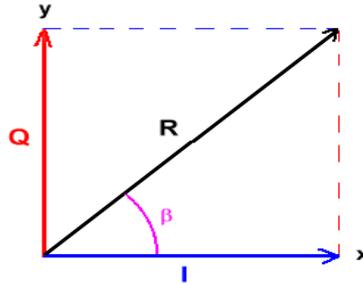


Figura 3-9 Representación vectorial de las señales I-Q desfasadas 90°.

La longitud de los vectores I y Q representan las amplitudes de dichas señales. En este tipo de diagramas vectoriales, los ángulos de fase se giran en sentido anti horario.

Con este tipo de diagramas, el conjunto de las dos componentes I y Q se puede representar por un único vector resultante R, con un ángulo de fase β . Dado que las componentes I y Q de este diagrama son ortonormales, el valor de la amplitud instantánea del vector R se calcula fácilmente por el teorema de Pitágoras, ya que R es la hipotenusa del triángulo recto formado por I y Q como lados catetos:

$$Q^2 + I^2 = R^2 \quad \text{Ec. 1}$$

Las señales I y Q representan a la envolvente de la señal de antena, por lo que el conocimiento del valor de la amplitud de cualquiera de ellas a lo largo del tiempo indica cómo es la forma de la envolvente y por tanto de la señal moduladora, con lo que conseguimos demodular la señal en amplitud. Como la señal Q sigue las mismas variaciones de amplitud que la señal I, basta con conocer cómo varía el valor de amplitud del vector R a lo largo del tiempo para conocer la forma de la envolvente de la señal de RF de antena, y por tanto demodular en amplitud ésta. Por otro lado la demodulación se haría con una cierta ganancia pues el valor de amplitud del vector R será siempre igual o mayor al del vector I.

Sin embargo, en las modulaciones de fase, como son la FM (modulación de frecuencia) o la PM (modulación de fase), el ángulo de fase de la portadora varía con la amplitud de la señal moduladora y por ello la demodulación depende de las variaciones de la fase instantánea de la señal de RF. Esto a nivel de las señales I y Q, implica que las amplitudes de estas dos componentes no se ven variadas de la misma forma en cada instante, y por tanto el ángulo de fase β del vector R variará con el tiempo. De cómo varía este ángulo de fase dependerá la forma de la señal moduladora, y por tanto, el conocimiento del valor de este ángulo de fase con el tiempo permite la demodulación en fase o en frecuencia. Si conocemos las amplitudes instantáneas de las componentes I y Q, el ángulo de fase β se puede deducir mediante la siguiente expresión:

$$\beta = \text{Arctan}(Q/I) \quad \text{Ec. 2}$$

Las señales I y Q son entregadas a un conversor A/D en forma analógica, el cual en un primer paso las muestrea y posteriormente las digitaliza. Al digitalizar las señales I y Q, se obtienen una sucesión de conjuntos de valores discretos en el tiempo, que codifican numéricamente el valor de amplitud de ambas señales. Es decir, la digitalización de las señales I y Q da lugar a una sucesión de números binarios que indican las amplitudes instantáneas de ambas señales a intervalos regulares en el tiempo. Una vez realizada la digitalización de las señales pueden ser interpretadas como lo que son: números manejados matemáticamente, por lo que ya se pueden aplicar las fórmulas anteriores para conocer los valores del vector R y de su ángulo de fase β , que permitirán conocer los valores de amplitud de la envolvente, en el caso de las modulaciones de AM, y de los desplazamientos de fase y frecuencia de la señal recibida, en el caso de las modulaciones FM y PM. Es decir, el cálculo numérico permite la demodulación de las señales de RF moduladas en AM, FM y PM. Los resultados de estos procesos matemáticos son también valores binarios, que al ser aplicados a un conversor digital-analógico, permite obtener la señal moduladora ya a nivel analógico, la cual una vez amplificada es llevada al altavoz conectado a la tarjeta de sonido.

Para el caso de las modulaciones de banda lateral única (SSB), el proceso es algo más complicado, ya que el cálculo numérico sobre los valores digitales de las componentes I y Q requiere de más pasos de cálculo que para la AM y la FM, pero conociendo las expresiones matemáticas que se han de aplicar para determinar la forma de la señal moduladora a partir de los valores de amplitud de R y del ángulo de fase β , tampoco es mucho problema realizar la demodulación de SSB. Y lo mismo se puede decir para cualquier otro tipo de modulación que se haya aplicado a la señal recibida en antena para poder demodularla.

Por ello, dado que en los receptores SDR hay muy poco procesado analógico de la señal, el método de conversión de frecuencia y detección empleado, y la posibilidad de gobernar muchos parámetros, es de esperar que un equipo de estas características superará las prestaciones de los mejores transceptores disponibles hoy en día.

4 ESPECTRO DE HF

4.1 Espectro de HF.

Las investigaciones en el campo de la HF [17], (3-30 MHz) fueron prácticamente inexistentes durante las décadas de los 60 y 70. Durante estos años, la comunidad científica apostó por los sistemas basados en los satélites ya que éstos eran más eficaces y el canal de comunicaciones proporcionaba un rendimiento muy superior que el de la RF. Al comienzo de la década de los 80, los avances logrados en el campo de otros sistemas diferentes al satélite, convencen a expertos militares de que una acción enemiga podría poner fuera de servicio con relativa facilidad y rapidez los enlaces vía satélite. Si bien ya en 1902 Kennelly y Heaviside postularon el hecho de que la capa superior de la atmósfera era conductora, no fue hasta 1925 cuando se tuvieron pruebas evidentes de ello. En ese año, se compararon los niveles de desvanecimiento de las señales que se recibían de forma simultánea en un arrollamiento y en una antena vertical, probando la presencia de ondas indirectas procedentes de la atmósfera. Se llegó a la conclusión, por tanto, la existencia de más de una capa. Puesto que se presumía que estas capas estaban compuestas de partículas cargadas eléctricamente, conocidas como iones, la región atmosférica en cuestión se denominó ionosfera.

En 1926 Breit y Tune comprobaron que un pulso de pequeña duración enviado por un transmisor producía en el receptor, alejado unos pocos kilómetros, dos (algunas veces más) impulsos en vez de uno como era de esperar. La conclusión era obvia: el impulso que llegaba primero era originado por la onda directa que viajaba paralela a la superficie terrestre; las señales posteriores se debían a ondas indirectas o ecos reflejados en la ionosfera (ver **Figura 4-1**).

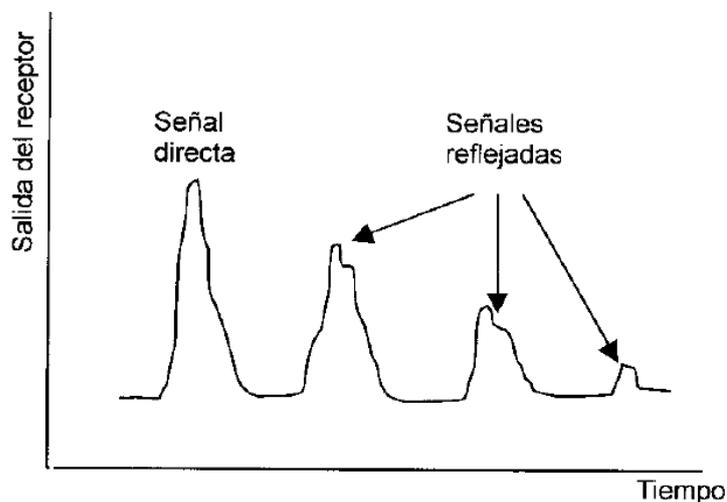


Figura 4-1 Respuesta del receptor a una señal de HF.

Diez años antes de estos experimentos Marconi comenzó a ensayar con transmisiones en onda corta, en la franja de 2-30 MHz, hoy conocida como la banda de alta frecuencia (HF). Encontró que podía mantener desde Inglaterra contacto con Australia a 9.8 MHz. A partir de aquí, en sucesivos experimentos demostró que a cualquier hora del día o de la noche podía comunicar con cualquier parte del mundo, siempre y cuando se seleccionara la frecuencia adecuada. Así, en 1924, Marconi tenía desarrollado su sistema de comunicaciones. Había nacido la era de la HF.

Antes de la Segunda Guerra Mundial las comunicaciones con aviones se hacían casi en exclusiva en la banda de HF mediante el uso de código Morse, aunque ya en 1928 se había conseguido en EEUU establecer comunicaciones de voz aire-tierra. La Segunda Guerra Mundial vio la introducción y el desarrollo de la UHF (300-3000 MHz) y la VHF (30-300 MHz) para comunicaciones aéreas. Sin embargo, como estas bandas sólo eran útiles para propagaciones en la línea del campo de visión, cualquier comunicación fuera de ella requería el uso de frecuencias en la banda de HF.

La situación descrita se mantuvo hasta la década de los 60. Al comienzo de la década de los 70 las comunicaciones vía satélite emergen como una alternativa a la HF. Los investigadores, cansados ya de la gran variabilidad de las capas ionosféricas según la hora del día, las estaciones del año y la actividad solar (manchas solares), rápidamente optaron por las ventajas del satélite. De repente la HF pareció algo obsoleto: este tipo de transmisión podía ser sustituida por un sistema fiable y no sujeto a los caprichos de la naturaleza. La mayoría de los ejércitos de los países más avanzados situaron al satélite como su sistema de comunicaciones primario, relegando a labores de segundo plano o de reserva a sus viejos equipos de HF. Al comienzo de los 80, el avance experimentado por sistemas diferentes al satélite, convenció a los expertos que un posible enemigo podría poner fuera de servicio con relativa facilidad y rapidez los enlaces vía satélite, y lo que es peor, esto podría ocurrir casi inmediatamente después de comenzar las hostilidades. Se demostró que la vulnerabilidad de los satélites podría venir dada por muchos caminos, por ejemplo por su destrucción mediante un misil, lo cual estaría a la actualidad al alcance de muy pocos países, o por métodos menos selectivos pero igualmente eficaces: provocando interferencias electrónicas o dañando al satélite o sus antenas mediante la emisión de pulsos electromagnéticos.

Las comunicaciones por satélite son todavía demasiado caras para su uso generalizado en conflictos bélicos, más aún en las denominadas misiones de paz en las que de forma continua se ven envueltos los ejércitos OTAN, y muy especialmente el nuestro en los últimos tiempos. Los enlaces tradicionales VHF/UHF son incapaces de hacer frente a necesidades de comunicaciones más allá de enlaces en la línea del campo de visión, esto es, donde no hay dificultades del terreno (montañas, curvatura de la tierra, etc.), que impiden que las antenas receptoras y emisoras se vean. La única forma de solventar esta contingencia es mediante el uso de repetidores, lo cual, por su vulnerabilidad, es absolutamente inoperante en caso de conflicto bélico dentro de nuestras fronteras. Fuera de ellas es una forma de comunicación inútil. Para todos los propósitos prácticos la UHF está limitada al campo del contacto visual. Respecto de la VHF, aunque supera a la UHF en este aspecto, sufre de problemas de ocultamiento por obstáculos físicos y de atenuación por fenómenos meteorológicos: nieve, lluvia y niebla, lo cual limita mucho su campo de acción. En consecuencia, el único medio fiable de comunicación que es capaz de salvar grandes distancias con poca potencia y que además es en gran medida independiente de la orografía del terreno y de la curvatura de la tierra, es el que hace uso de ondas de radio que se reflejan en las capas ionizadas de la atmósfera de nuestro planeta (también puede ser usado en distancias cortas aumentando el ángulo de salida desde el emisor. Esto está especialmente indicado para solventar necesidades de comunicación en junglas o bosques espesos, o en terrenos muy accidentados, donde el VHF puede tener problemas). Tales comunicaciones se consiguen empleando la parte baja del espectro de HF, entre los 3 y los 15 MHz.

A partir de la década de los 80 y sobre todo en los 90, gracias a los avances en las técnicas de integración (desarrollo de microprocesadores y procesadores digitales de señal) y a las debilidades que en ciertos aspectos han mostrado las comunicaciones vía satélite, el uso de la HF ha visto un nuevo

resurgir que le augura la plena vigencia como sistema de comunicación en los próximos años.

4.1.1 Establecimiento de enlace en HF. Factores a tener en cuenta.

Para establecer la comunicación en [18] HF es necesario seleccionar las frecuencias operativas, es decir, frecuencias que seamos capaces de recibir con cierta claridad. Dichas frecuencias, deben cumplir con dos condiciones fundamentales: deben estar por debajo de la máxima frecuencia utilizable (MUF) y proporcionar una relación señal a ruido (SNR) superior a un determinado valor que dependerá del modo de trabajo. De entre todas las frecuencias operativas, la que proporcione una SNR más alta será la frecuencia óptima de trabajo (FOT), posibilitando los enlaces de mayor calidad en ausencia de interferencias. Tanto la MUF como la SNR sufrirán importantes variaciones a lo largo del día, por lo que habrán de tenerse muy en cuenta las franjas horarias en las que se vaya a desarrollar el enlace radio.

En un enlace en HF entre dos puntos se busca que exista reflexión de las ondas de radio en la ionosfera, normalmente en la capa F, de forma que la comunicación se establezca mediante una o varias reflexiones entre la ionosfera y la superficie terrestre. Sin embargo, la propagación de las ondas está afectada por las variaciones que se producen en la ionosfera, y por tanto factores como la hora del día, la estación, la actividad de manchas solares, y otras condiciones que afectan a esta capa de la atmósfera. Esta reflexión ionosférica solamente es posible si la frecuencia de trabajo está por debajo de un valor denominado máxima frecuencia utilizable (MUF, *Maximum Usable Frequency*), que depende fundamentalmente de dos parámetros: el grado de ionización del punto en el que se produce la reflexión ionosférica y la geometría del enlace. Es decir, la MUF cambia si también lo hace la ubicación de las estaciones (geometría), o si las condiciones ionosféricas varían, íntimamente relacionadas con la actividad solar que a su vez cambia especialmente con la hora del día y con el momento en el que nos encontremos dentro de cada ciclo solar de 11 años, entre otros factores. Hay que tener en cuenta que, en cada una de las reflexiones ionosféricas, la MUF puede ser distinta, por lo que la MUF de un enlace con varios saltos será la mínima de todas ellas.

Si los puntos en los que se ubican las estaciones cambian o si varía la hora del día, algunas (o todas) las frecuencias operativas pueden dejar de ser válidas.

Por otro lado, no todas las frecuencias por debajo de la MUF serán válidas. Las ondas de radio de HF siempre atraviesan la capa D de la ionosfera, en la que se producen fenómenos de absorción que atenúan las señales, especialmente en las frecuencias más bajas. Si la atenuación es elevada, puede que no consigamos una relación señal a ruido suficiente para establecer los enlaces. En la práctica, esto se traduce en que para cada pareja de puntos y para cada hora del día también existirá una mínima frecuencia utilizable (LUF, *Less Usable Frequency*), por debajo de la cual no se puede trabajar.

También hay que tener en cuenta que, en una malla formada por varias estaciones en emplazamientos distintos, es muy probable que las mejores frecuencias para enlazar cada pareja de estaciones sean diferentes o que incluso una frecuencia que permite el enlace entre una pareja de estaciones sea completamente inválida para enlazar entre otras dos estaciones de la misma malla. En estas circunstancias, muy probablemente será necesario seleccionar frecuencias que ofrezcan menos relación señal a ruido pero que permitan el establecimiento de enlaces de todos con todos o, en su defecto, tratar de establecer enlaces utilizando estaciones que hagan de relé.

Por este motivo, normalmente se apoyará en la utilización de programas de predicción.

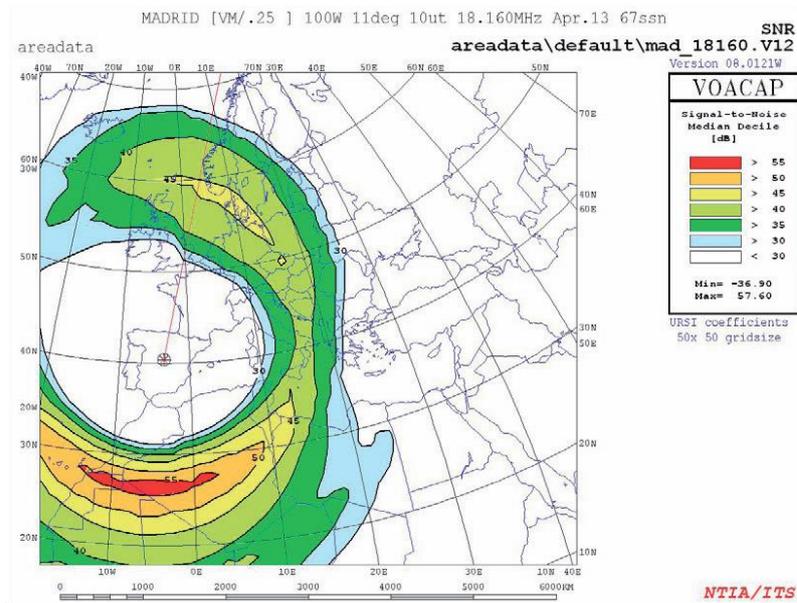


Figura 4-2 Ejemplo de cálculo de enlaces radio en HF utilizando VOACAP.

Actualmente existe un gran abanico de programas de cálculo de enlaces de HF, que normalmente se basan en modelos estadísticos de observaciones de propagación radioeléctrica. Algunos de estos programas son gratuitos, como W6ELProp y VOACAP, este último integrado en el programa gestor de frecuencias de las Fuerzas Armadas (GESFFAS).

La banda de HF, como cualquier otra parte del espectro radioeléctrico, está sujeta a regulaciones nacionales e internacionales que tienen como objetivo establecer una coordinación entre usuarios y evitar interferencias entre servicios, en la medida de lo posible. Cada servicio que se presta en la banda tiene una atribución de segmentos de frecuencias específicos que ha de respetarse.

Esto implica que, en muchas ocasiones, la frecuencia óptima de trabajo real para enlazar dos puntos no estará dentro de alguno de nuestros segmentos de frecuencias atribuidos, por lo que será necesario utilizar otra frecuencia o frecuencias que sí tengamos atribuidas pero que proporcionen una relación señal a ruido más baja. Podría darse incluso la circunstancia de no disponer de frecuencias atribuidas que permitan un enlace, al no estar en el rango comprendido entre la LUF y la MUF. Por este motivo, resulta de sumo interés llevar a cabo estudios previos que permitan determinar cuáles serán las necesidades de frecuencias futuras en función de las necesidades de comunicación y realizar las peticiones de reserva de las mismas ante los organismos reguladores competentes.

En definitiva, interesa identificar todos los segmentos de frecuencias que tenemos atribuidos oficialmente para trabajar en la banda de HF, ya que en ningún caso deberemos trabajar fuera de los mismos.

4.2 Interés militar y civil. Aplicaciones.

Las comunicaciones militares en la banda de HF están viviendo un nuevo auge principalmente por dos motivos: la posibilidad de establecer enlaces tácticos y estratégicos sin depender de costosas y en ocasiones vulnerables infraestructuras terrestres o de satélite y la aparición de nuevos modos de trabajo en sus diferentes variantes, que facilitan el trabajo de los operadores de radio, de forma que ya no es necesario tener unos conocimientos avanzados de HF para poder establecer comunicaciones en esta banda. Aunque el operador solamente necesita conocer el funcionamiento de la radio, el planificador de las mallas sigue teniendo la responsabilidad de determinar cuál es el plan de frecuencias más

a nivel nacional y tenía por objeto el intercambio de correo electrónico con ficheros adjuntos en modo cifrado entre operadores de terminal del sistema, servidores de correo y clientes de las LAN de cada nodo.

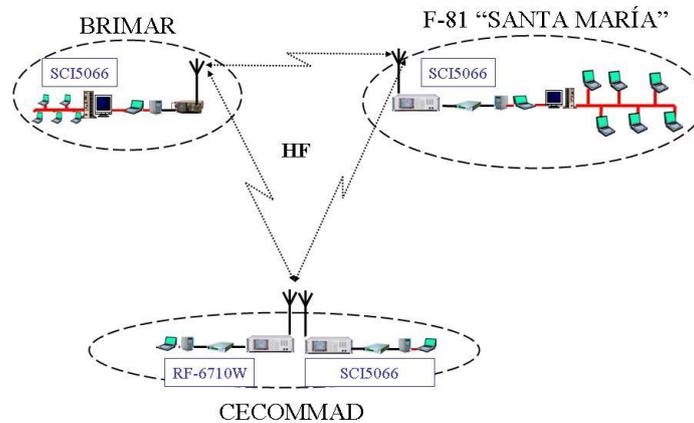


Figura 4-4 Arquitectura de la prueba de implementación del BFEM a nivel nacional.

Se trata de un sistema con gran capacidad y futuro, que favorece la economía de medios y con una alta fiabilidad. Es de fácil instalación y empleo, además de reducir el impacto y la necesidad del empleo SATCOM. Por último, recordar que se trata de un desarrollo nacional y con protocolo y gran difusión en entorno OTAN.

En cuanto a comunicaciones tácticas submarinas citaremos los circuitos de comunicaciones de acuerdo con el ACP-176:

-550 / SUBMARINE OPERATIONS AND DISTRESS HF: Es el circuito de seguridad de los submarinos, es utilizada por las Autoridades, buques y submarinos para todo lo relativo con la seguridad del submarino.

-551 / SUBMARINE COORDINATION HF: Utilizada por los submarinos para coordinación con otros submarinos, normalmente en fonía cifrado con KYV-5.

Los documentos anteriores tienen clasificación de seguridad de nivel CONFIDENCIAL.

4.2.2 Aplicaciones civiles.

En cuanto a las aplicaciones civiles que pueda ofrecernos la onda corta se encuentran en su mayor parte, los servicios de estaciones utilitarias por ejemplo, recepción de faxes meteorológicos de uso público para navegantes, señal de estaciones de bases de tiempo atómico y frecuencias patrón (para ajuste de equipos), servicios de modulación digitales entre embajadas, servicios de prensa, emisión de imágenes de barrido lento SSTV, servicios de balizas para control de la propagación en cualquiera de las bandas. Por otro lado se encuentran servicios como el control de tráfico de aeronaves ATC, así como canal de enlace por usuarios en caso de emergencias, en muchos casos como única vía de comunicación posible.

Además de frecuencias reservadas a las fuerzas y cuerpos de seguridad del Estado, existen otras menos conocidas. Por ejemplo, algunas frecuencias han sido reservadas para los aviones de línea como frecuencias secundarias cuando atraviesan los océanos; otras han sido reservadas para teléfonos inalámbricos, e incluso dispositivos de control remoto.

5 SISTEMA DE RX PROPUESTO

A continuación se describirán los diferentes elementos que conforman la estación SDR diseñada según **Figura 5-1**.

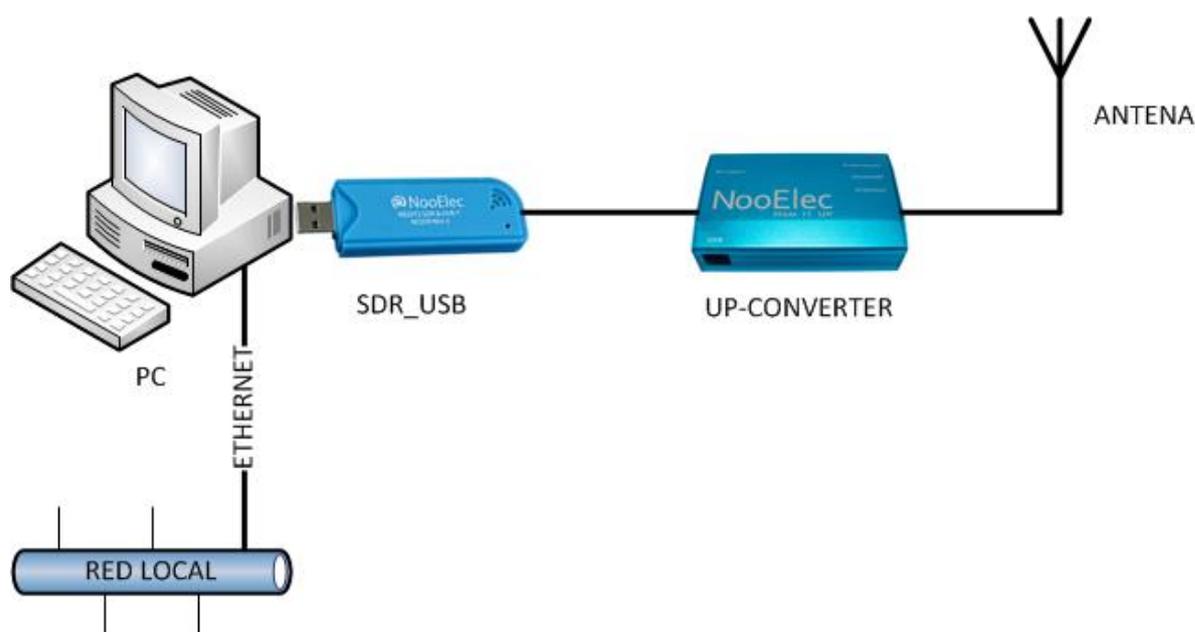


Figura 5-1 Esquema general de la instalación.

5.1 Selección de antena. Características. Diagrama de Radiación.

En este proyecto se han seleccionado dos antenas sencillas que cubren la banda de HF y en las que ha primado en su elección el criterio del coste, siendo ambas de un coste muy reducido.

CARACTERIZACION DE LAS ANTENAS:

Resulta imprescindible disponer de los diagramas de radiación teóricos, ya que nos permitirán orientar la antena correctamente y conocer el valor de la ganancia en una dirección determinada. Téngase en cuenta que, para antenas de banda ancha, normalmente los diagramas de radiación serán diferentes en función de la frecuencia de trabajo. Por otro lado, en el mundo real dichos diagramas se verán afectados por el terreno y los obstáculos que puedan existir en torno a la estación, por lo que

puede resultar conveniente utilizar valores ligeramente peores a los teóricos. Por este motivo, los cálculos han de considerarse como una aproximación teórica. Como ya se ha indicado anteriormente, las condiciones de propagación ionosférica están íntimamente ligadas a la actividad solar. En épocas de actividad solar alta, en la ionosfera se alcanzan grados mayores de ionización que normalmente permiten la utilización de frecuencias más altas, mientras que en épocas de actividad solar baja sucede lo contrario.

Para la caracterización de la antena se han utilizado los siguientes métodos:

DE FORMA TEORICA: con ayuda de un software: 4nec2

DE FORMA EMPÍRICA: con la ayuda de un analizador de redes E5061A (Agilent Technologies) que permite estudiar diferentes parámetros desde los 300 KHz a 1,5 GHz. Dicho instrumento fue proporcionado por el CEMEDM (Centro de Medidas Electromagnéticas de la Armada) en la ENM y permitiendo una caracterización completa de esta antena. Los resultados de la caracterización de la ANT2 se encuentran en el Anexo 9.4.

A continuación se detallan las características de cada una de las antenas:

5.1.1 SIGMA LW-20. (ANTENA 1)

La antena SIGMA LW-20 es de una antena de hilo de acero de una longitud de onda. Las antenas de hilo largo presentan una impedancia muy elevada, por lo que para su operación siempre se requiere la utilización de un acoplador de antena e incluso, adicionalmente, de un UNUN. Por regla general, cuanto mayor sea la longitud de la antena de hilo, menor será su impedancia de entrada, permitiendo la utilización de acopladores de antena de gamas más bajas. En este caso, nuestra antena incorpora un UNUN (unbalanced-unbalanced line) 9:1 en el extremo donde se conecta al resto del circuito (extremo de alimentación), lo que permite que pueda adaptar impedancias con relación de 9 a 1 entre elementos asimétricos.

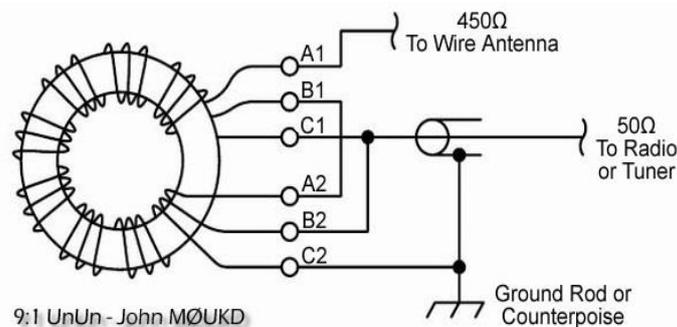


Figura 5-2 Ejemplo de UNUN 9:1.

En nuestro caso, permite que la antena sea alimentada directamente con un cable coaxial de 50 ohmios por lo que el UNUN realiza una conversión de impedancias de 450 a 50 ohmios. Además, dicho UNUN elimina el ruido ambiente, también elimina el ruido estático y proporciona una ruta de la CC a tierra.

La LW-20 tiene una longitud física de 20.28m, o lo que es lo mismo, una longitud eléctrica equivalente de λ (una longitud de onda) para una frecuencia central de trabajo de 15 MHz, no obstante,

trabaja bien en todas las bandas comprendidas entre los 80 y los 6m a través de un **acoplador de antena o ATU**⁹(*AntennaTuner*).Sin embargo, hay que tener en cuenta que debido a la impedancia variable que se encuentra en cualquier antena de cable largo, no será capaz de hacer frente a todas las bandas. Para la cobertura de banda completa se necesita un ATU externo y además posiblemente algún tipo de sistema de carga capacitiva. Además, la altura de instalación de la antena influye notablemente en el modo de trabajo de este tipo de antenas.La LW-20 viene completamente montada y lista para funcionar. Algunas especificaciones de nuestra antena son las siguientes:

Tipo de antena: Antena de hilo, alimentada en un extremo.

Frecuencias de trabajo: 3.5 - 52 MHz

Bandas de trabajo: 80-6m

Potencia: 400W

Impedancia: 50 Ohms

Tipo de conector: SO-239

Longitud: 20.28 metros

Precio: 62.42 euros

En el Anexo 9.5 se adjunta fotografía de la instalación completa de la antena.

DIAGRAMA DE RADIACIÓN:

Este tipo de antenas presenta una impedancia elevada y los diagramas de radiación se ven muy afectados por el tipo de terreno sobre el que se instale la antena, por lo que resulta de interés realizar un estudio que permita determinar bajo qué circunstancias se pueden conseguir características radioeléctricas óptimas. Para garantizar el correcto funcionamiento de nuestra antena, se debería haber instalado otro hilo en el extremo abierto o en su defecto una contraantena; sin embargo, esto no ha sido posible.

Para la simulación se han introducido una gran cantidad de parámetros que intentan reproducir las condiciones de trabajo de nuestra antena. Por ejemplo: el tamaño (20m), la frecuencia de trabajo (15MHz), impedancia de entrada (50 ohmios), el voltaje suministrado, el tipo de suelo, así como su constante dieléctrica y conductividad. La simulación se llevará a cabo teniendo en cuenta la altura sobre la cual se encuentra la antena (12m).

A continuación se detallan los resultados obtenidos, junto con el diagrama de radiación.

⁹ Un acoplador de antena o *Unidad de Sintonía de Antena* (en inglés *antennatuner* o *ATU*) es un aparato que se encarga de adaptar la impedancia real de la antena a los 50 con los que debe trabajar en transceptor o cuando se desea alimentar una antena que está ligeramente fuera de su frecuencia de diseño. Por lo tanto va intercalado entre el transceptor y la antena.

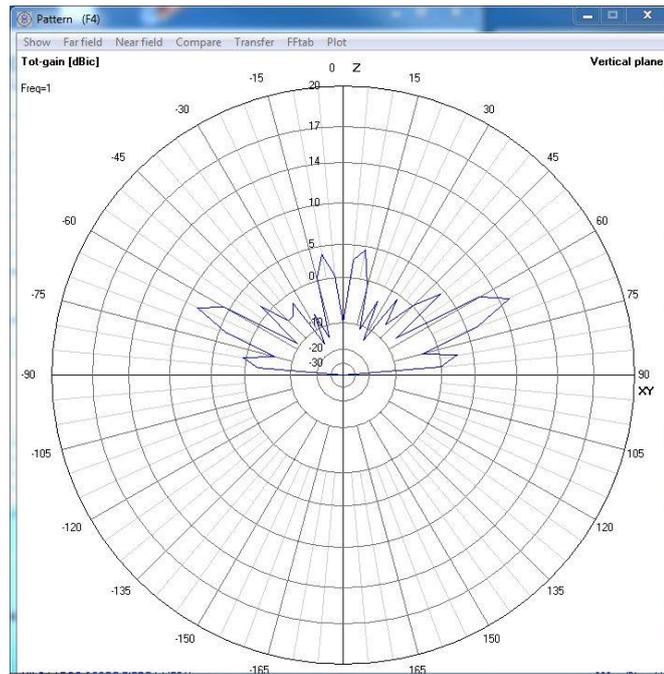


Figura 5-3 Diagrama de radiación de la antena LW-20 en 4nec2.

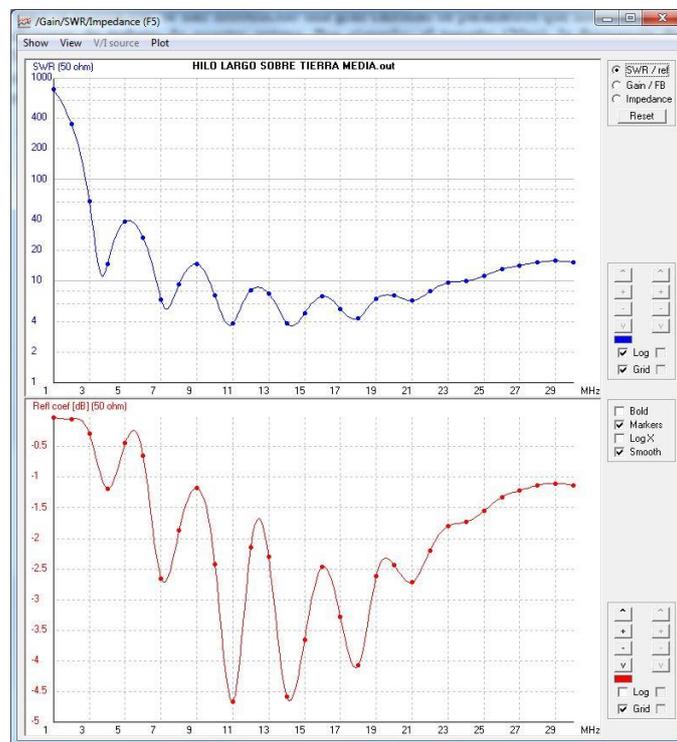


Figura 5-4 SWR y coeficiente reflexión.

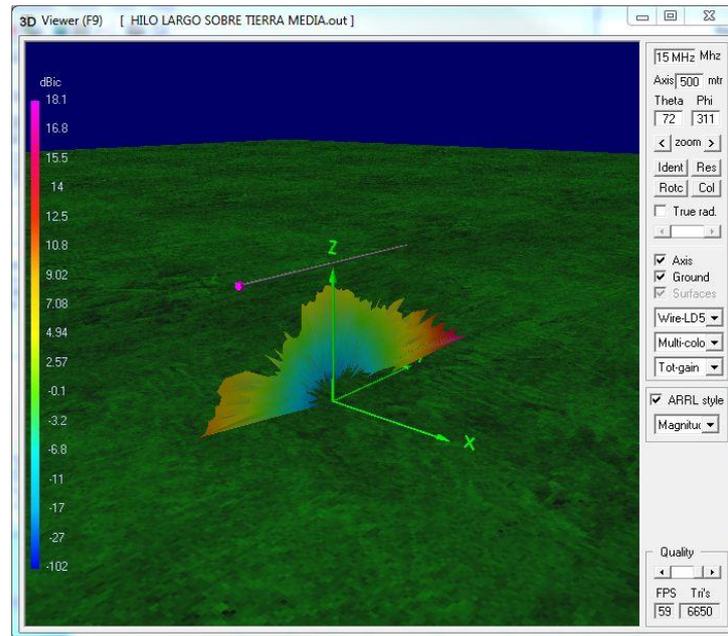


Figura 5-5 Diagrama de radiación 3-D.

5.1.2 A99 SOLARCON. (ANTENA 2)

La siguiente antena, se instalará en un futuro dado que durante la ejecución de este trabajo fin de grado, no se ha podido encontrar una correcta ubicación para la misma. A pesar de esto, y por ser una de las opciones que se contemplaron en un principio, la antena A99 SOLARCOM ha sido caracterizada y queda pendiente de ubicación.

Se trata de una antena de alta calidad fabricada por SOLARCOM completamente construida en fibra de vidrio. Se ha seleccionado este material debido a la especial situación de la Escuela Naval Militar de Marín por encontrarse ésta en un ambiente marino y muy pegado a la costa, donde la salinidad y condiciones meteorológicas son muy demandantes, se exige que sea una antena de una alta flexibilidad y gran resistencia al viento. Se trata de una antena fácil de instalar y con un diseño simple siendo una de los más vendidos a nivel mundial.

La A99 SOLARCON es una antena de media longitud de onda, más un cuarto de onda variable, con carga en la base y transformador de alta impedancia (por la característica de este tipo de antena polarizadas en este punto extremo de la media onda). Además tiene un primario o toma en un punto de esta bobina buscando los 50 ohm para adaptar a los equipos.

Según las hojas técnicas que proporciona el fabricante, la ganancia de la antena está en torno a unos 9,9 dBi aproximadamente. Sin embargo dicha estimación es difícil de creer pues dichas ganancias son reservadas para antenas directivas y otras con más elementos o características.

Posee una frecuencia de trabajo comprendida entre los 26 y los 33 MHz y tiene una longitud de 535 cm. Está diseñada en tres secciones de fibra de vidrio que se atornillan en conjunto, pesando un total de 2,27 kg. Dentro de los tubos de fibra de vidrio, el elemento real de radiación de la antena es un cable de 16 AWG¹⁰. Se trata de una buena antena receptora consiguiendo buenos niveles de recepción

¹⁰ El **calibre de alambre estadounidense** (*american wire gauge* o *AWG*) es una referencia de clasificación de diámetros. Cuanto más alto es este número, más delgado es el alambre. El alambre de mayor grosor es menos susceptible a la interferencia, posee menos resistencia interna y, por lo tanto, soporta mayores corrientes a distancias más grandes.

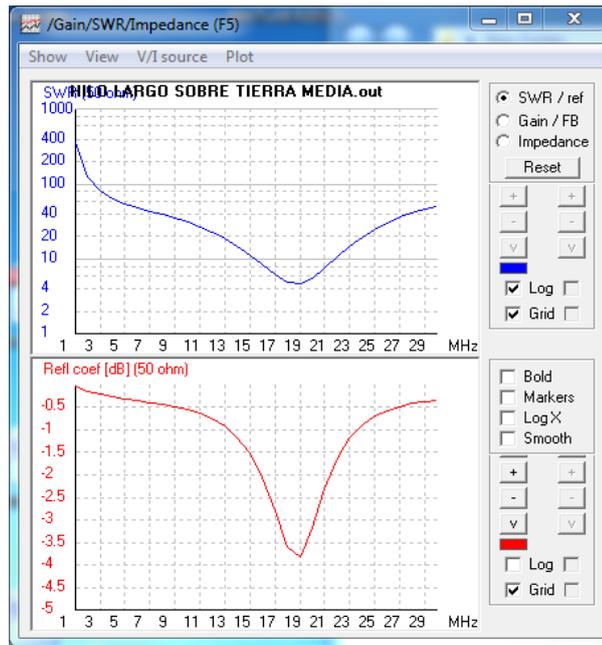


Figura 5-7 SWR, coeficiente reflexión y diagrama de radiación 3-D.

5.2 Selección de equipo SDR. Características.

NooElec NESDR Mini+ 0.5PPM TCXO USB RTL-SDR Receiver (RTL2832+R820T).

El receptor USB de SRD que se ha adquirido para el trabajo es el Nooelec USB RTL-SDR (RTL2832+R820T). Está compuesto por el microchip RTL2832U cuya función es actuar como demodulador de la señal recibida, muestreador e interfaz USB para conexión al ordenador. Además todo RTL2832 viene acompañado de un tuner o sintonizador, el R820T de Rafael Micro, selecciona la frecuencia de trabajo del receptor entre 24 hasta 1766 MHz, y que por tanto ofrece un amplio rango de frecuencias para trabajar.

Existen en el mercado diferentes tuners con un rango de frecuencias diferentes, entre los que destacan los siguientes:

TUNER	RANGO DE FRECUENCIAS
Elonics E400	52-2200 MHz (con una parada entre 1100 y 1250 MHz)
Fitipower FC0013	22-1100 MHz
Fitipower FC0012	22-948.6 MHz
FCI FC2580	146-308 MHz y 438-924 MHz (con una parada entre 308 y 438 MHz)

Tabla 5-1 Tabla TUNER-RANGO DE FRECUENCIAS.

El tipo de conector que incorpora es un MCX hembra, que permite conectar mediante un cable, dicho USB con el Up-converter. Viene protegido por una carcasa de aluminio de alta calidad que actúa como protector del USB de las influencias electromagnéticas que se generan alrededor del PC, garantizando por tanto una mejor sensibilidad a la hora de trabajar con aplicaciones SDR. Los resultados de la calibración del receptor se detallan en el Anexo 9.3.



Figura 5-8 NooElec NESDR USB RTL-SDR con su envuelta de aluminio.

5.3 Selección de UP-converter. Características.

HAM IT UP V1.2- RF UP CONVERTER.

El up-converter (o convertidor de frecuencias ascendente) que se ha seleccionado nos va a permitir incrementar la banda cubierta por el receptor SDR. Este dispositivo, convierte la señal de RF, (como se explicará posteriormente), elevándola a un margen de frecuencias de trabajo aceptado por el receptor SDR, permitiendo de ese modo la recepción de señales de HF, con el receptor anteriormente expuesto. Dicho de otro modo, asegura la transmisión de datos recibidos entre la antena HF y el receptor USB. Como se puede ver en la **Figura 5-9** posee una entrada de RF que irá conectada la antena, y una salida que irá al receptor SDR. El Up-converter puede trabajar en dos modos de funcionamiento. En el primero de ellos, denominado ‘modo passthrough’ el Up-converter no tendría ninguna función dejando pasar la señal RF (con unas pérdidas que en el peor de los casos no superarían los 15 dB para 50MHz). En el segundo modo, denominado IF (OUTPUT) el dispositivo actuaría en su modo de trabajo natural, y convertiría la señal RF.

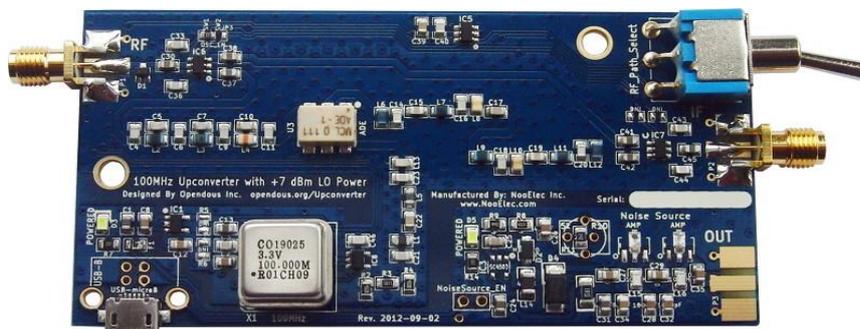


Figura 5-9 Placa base del Up converter

Utilizando el siguiente esquema sabremos qué es lo que tiene lugar dentro del dispositivo:

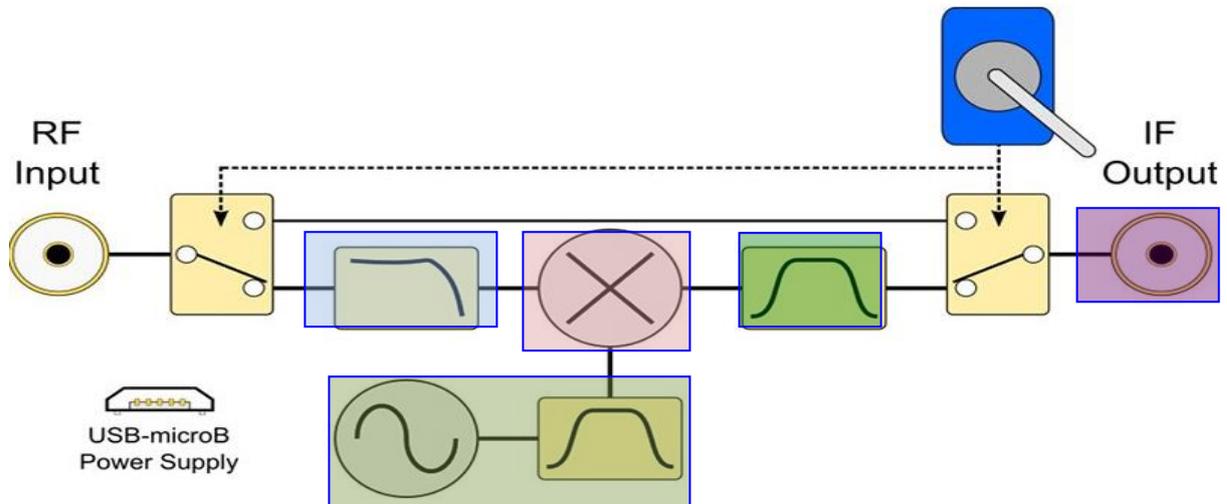


Figura 5-10 Esquema de funcionamiento de un Up converter.

1. FILTRADO PASO BAJO A LA SALIDA DE RF
2. OSCILADOR A 125 MHZ Y POSTERIOR FILTRADO
3. MEZCLADOR
4. FILTRADO PASO BANDA
5. SALIDA DE IF



Como vemos, en un primer momento, lo que se encuentra la señal de RF es un filtro paso bajo, tanto en la entrada de RF y en la salida del oscilador que nos van a permitir mejorar el efecto de la mezcla y reducir los armónicos.

Posteriormente la señal entraría en el circuito denominado como ADE, cuya función no es otra que ser un mezclador balanceado de señales. Dicho mini-circuito está compuesto de una entrada de RF proveniente de la antena (como ya se ha dicho), y una señal procedente de un oscilador local. La mezcla la efectúa con un puente de diodos, y la entrada y salida balanceada con unos transformadores o *baluns* equilibradores.

El funcionamiento se basa en la mezcla de dos señales para producir una salida modulada por las dos señales, tanto la suma como la resta. Dicho procedimiento ya se explicó en el epígrafe 3, cuando se habló de la Arquitectura de este tipo de receptores.

En él se mezclaría la señal de RF y la frecuencia de 125 MHz, produciendo una FI como resultado de la suma y la diferencia de dichas frecuencias. Posteriormente encontraríamos un filtro paso banda para centrarnos la frecuencia recibida y eliminar posibles interferencias en torno a ésta. El esquema completo de este dispositivo se detalla en el Anexo 9.1

Aquí tenemos un ejemplo de un convertidor de frecuencias de 100 MHz:

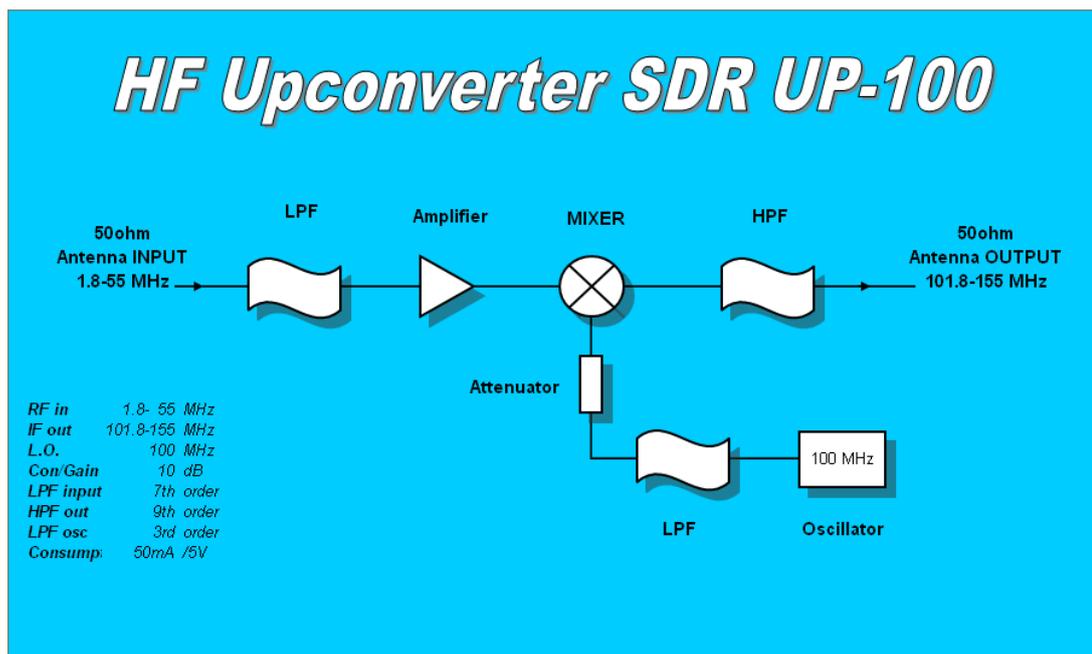


Figura 5-11 Convertidor de frecuencias a 100 MHz.

El motivo de que se haya elegido un Up- Converter de 125 MHz es que dada la frecuencia de oscilación a la que trabaja, se elimina la posibilidad de que nuestra recepción (tras la salida del mezclador) quede en el ancho de banda ocupado por FM comercial (88-108 MHz). Además posee un conmutador que proporciona la opción de usar el dispositivo en modo PASSTROUGH (“PASO DIRECTO”) o en su modo natural como convertidor de frecuencias

El convertidor viene protegido por una carcasa de aluminio de alta calidad al igual que el USB que actúa como protector frente a golpes, caídas y demás influencias externas. En cuanto a la alimentación del dispositivo se lleva a cabo por medio de un conector estándar para USB. Tiene una potencia de 7dB que pasada a mW corresponde a 5 mW, suficiente para el proyecto.

Por último, una de las recomendaciones antes de empezar a trabajar con el SDR es que una vez que conocemos el funcionamiento del programa que va a controlar nuestro receptor (en nuestro caso SDRSharp yGNURadio) es aconsejable y bueno, para evitar averías, abrir el dispositivo y comprobar si lleva instalado el diodo de protección (BAV99) en la entrada de antena.

El lugar del diodo está marcado como U7, justo debajo de la conexión del vivo de la entrada de antena. En el caso de la imagen vemos que el diodo está instalado. Al estar instalado, no corremos el riesgo de que el sintonizador se averíe al conectarlo a una antena exterior, debido a que la carga de electricidad estática que acumula la antena le provoque daños irreparables y deje de funcionar.

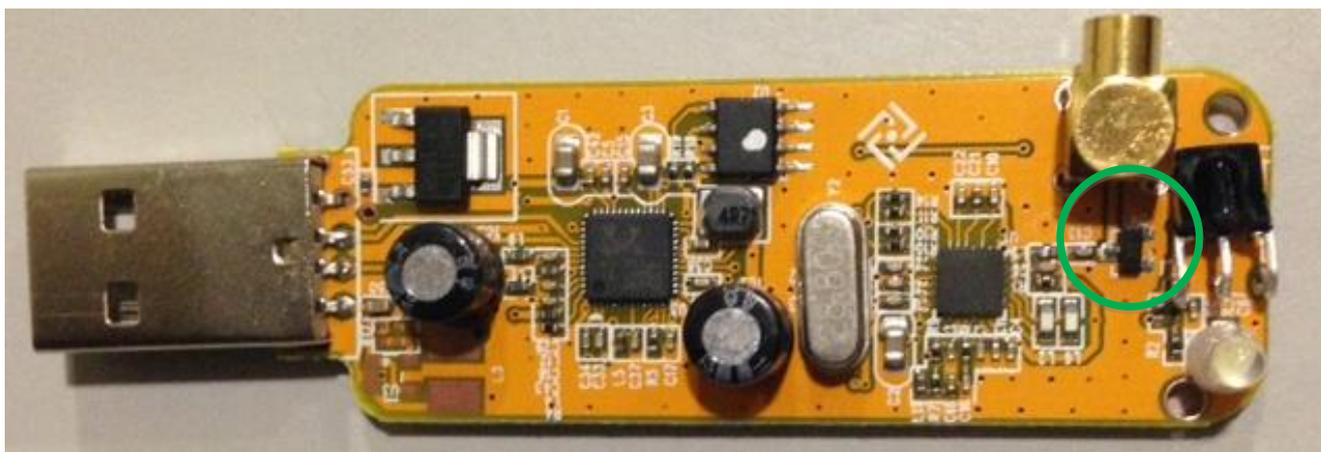


Figura 5-12 Dongle TV-FM. RTL2832-R820T con el diodo de protección BAV99

Es preciso comentar que dadas las características del receptor SDR seleccionado, sería posible recibir señales de HF sin necesidad de introducir más que unos pequeños cambios en la estructura de nuestro software y sin necesidad de utilizar un convertidor externo (Up-converter) podríamos hacer funcionar el SDR en la parte baja de HF. Sin embargo, esta modificación no es tan buena como en el caso de usar un convertidor de banda, o realizar muestreo directo en una de las entradas del chip RTL-2832U. Por contra, nos permite experimentar con recepción directa desde 1 a 14 MHz, o incluso un poco más cambiando únicamente el fichero ejecutable SDRSharp_config.

5.4 Accesorios hardware.

CABLE RG174MCX macho –SMA macho.

Se trata de un cable de 50 ohmios con pequeñas pérdidas que permite conectar el Up-converter a nuestro receptor SDR USB. Resulta ideal para este tipo de conexiones.



Figura 5-13 Cable RG174.

ADAPTADOR SMA macho- BNC hembra.

Adaptador de que permite la conexión Up converter al cable de la antena. Posee dos entradas: una al cable (BNC hembra) y otra al Up-converter (SMA macho).



Figura 5-14 Adaptador SMA-BNC

El kit de HF completo de NooElec incluye:

ARTICULO

NooElec NESDR Mini SDR & DVB-T USB(RTL2832+R820T2))
con antena y mando a distancia

Ham It Up v1.2- RF Up converter

Cable RG174 MCX macho- SMA macho

Carcasade aluminio para el SDR USB (color plata)

Carcasade aluminio para el HamIt Up converter (color plata)

Adaptador SMA macho- BNC hembra

Tabla5-2 Kit NooElec HF.

CABLE RG213.

El cable RG213 es un cable coaxial que por sus bajas pérdidas es apropiado para estaciones de radioaficionados e instalaciones profesionales. Tiene una impedancia de 50 ohmios y unas pérdidas por atenuación de 2 dB/100m a 10 MHz. Teniendo en cuenta que nuestro cable tiene una longitud de aproximadamente 5m, éstas pérdidas no superarían los 0,2 dB en ningún caso. Además es aconsejado para uso dentro del rango de 0. MHz hasta 2,4 GHz, por lo que es apropiado para el trabajo en cuestión. Los dos extremos del cable tienen conectores BNC macho (extremo que va conectado al Up converter) y PLC macho (extremo que va conectado a la antena).

PRECIO: 2 euros/metro.

5.5 Software SDR evaluado.

A continuación se presentarán los dos software evaluados en la realización del presente trabajo exponiéndose las diversas aplicaciones y posibilidades que ofrecen cada uno de ellos. Los ejemplos que se utilizarán para ello son ejemplos de medidas obtenidas durante la experimentación de los mismos en la banda de HF.

5.5.1 SDRSharp.

El SDRSharp es un software libre de la empresa SDR#. El software está diseñado en un entorno Windows. Se trata de un programa fácil de usar e intuitivo y con una interfaz que permite al usuario la recepción de todo tipo de radioseñales. El aspecto del programa es el siguiente:

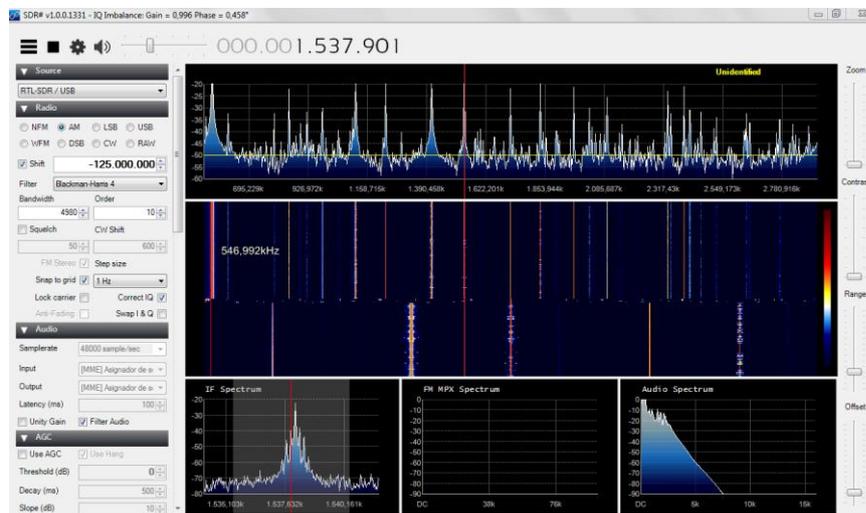


Figura 5-15 Interfaz SDRSharp#

A la hora de poner en marcha el programa, es necesaria la instalación del programa ZADIG, que instalará los drivers necesarios para que funcione correctamente en el ordenador en Windows. El SDRSharp proporciona, entre otras cosas, un entorno en el que el usuario puede realizar recepciones de radioseñales en prácticamente todo el espectro electromagnético.

Entre los diferentes submenús que podemos encontrarnos en el programa, se encuentran los siguientes: RADIO, AUDIO, AUTOTUNER, AGC, FFTDISPLAY etc. Aunque existen versiones más actualizadas del programa que incluyen diferentes *plugins* nos centraremos en éstas por ser las más interesantes para el trabajo.

En el borde derecho de la Figura 5-15 podemos observar las opciones Zoom y Range acompañadas de unos *sliders* que permiten tener una visión más detallada del ancho de banda de espectro que queramos recibir. En nuestro caso, hemos usado figuras de diferentes recepciones en la banda de HF. Una vez seleccionada la fuente del programa (SOURCE) nuestro receptor USB ponemos en marcha nuestro receptor.

OPCION RADIO.

La opción radio nos da la posibilidad de elegir entre las diferentes modulaciones AM, NFM (FM estrecha), WFM (FM ancha para sintonizar la FM comercial), USB, LSB, DSB, o CW. La opción **MOVER** (*SHIFT*) nos permite aumentar la banda y trasladarla a una banda de frecuencias en las que nuestro receptor SDR pueda trabajar correctamente. Dado que el Up-Converter que se ha elegido eleva la frecuencia de trabajo a 125 MHz, esa será la cantidad que se use en el software para recibir señales de HF con claridad. Si esa opción no estuviera seleccionada, o si la cantidad no fuese la adecuada, la sincronización entre el programa y los demás elementos del sistema no sería posible. Igualmente podemos fijar la frecuencia central del espectro a sintonizar que aproximadamente tiene un ancho de banda de 5MHz.

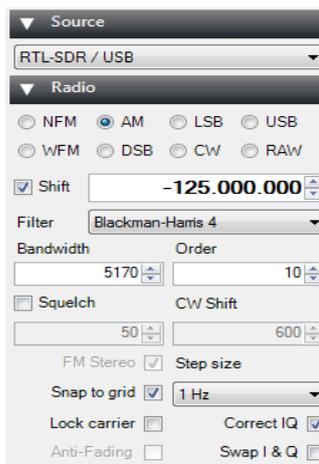


Figura 5-16 Diferentes posibilidades en OPCION RADIO.

Para obtener una mejor recepción podemos seleccionar entre las diferentes opciones “**Snap to grid**”, “**Correct IQ**” o “**Swap I & Q**”. Incluso podemos cambiar el filtrado pasobanda de la señal en **FILTER** (FilterBandwidth o Filterorder).

OPCION AUDIO

La opción AUDIO nos permite de una manera sencilla controlar el volumen de sonido del receptor de forma independiente al volumen fijado en nuestro ordenador con el botón deslizante AF Gain. Igualmente podemos fijar o no el filtro de audio (Filter Audio).

AGC

La opción AGC (AutomaticGain Control, o control automático de la ganancia) permite que el software establezca la ganancia adecuada para cada caso, ayudando de esa manera a una mejor recepción de las señales.

AUTO TUNER

Esta opción nos permite, si está marcada, cambiar la frecuencia de forma automática a la señal más fuerte que se recibe en un momento determinado. En este caso, con las flechas de la opción Peak Level podemos fijar el nivel de las señales a las que debe de cambiar nuestro sintonizador.



Figura 5-17 Diferentes posibilidades en AUTO TUNER.

FFT DISPLAY

El submenú FFT Display nos va a permitir cambiar la visión del espectro de señales recibidas. Esto lo controlamos con la opción View que nos brinda tres posibilidades: espectro de frecuencias, espectrograma o Waterfall o ambos a la vez.

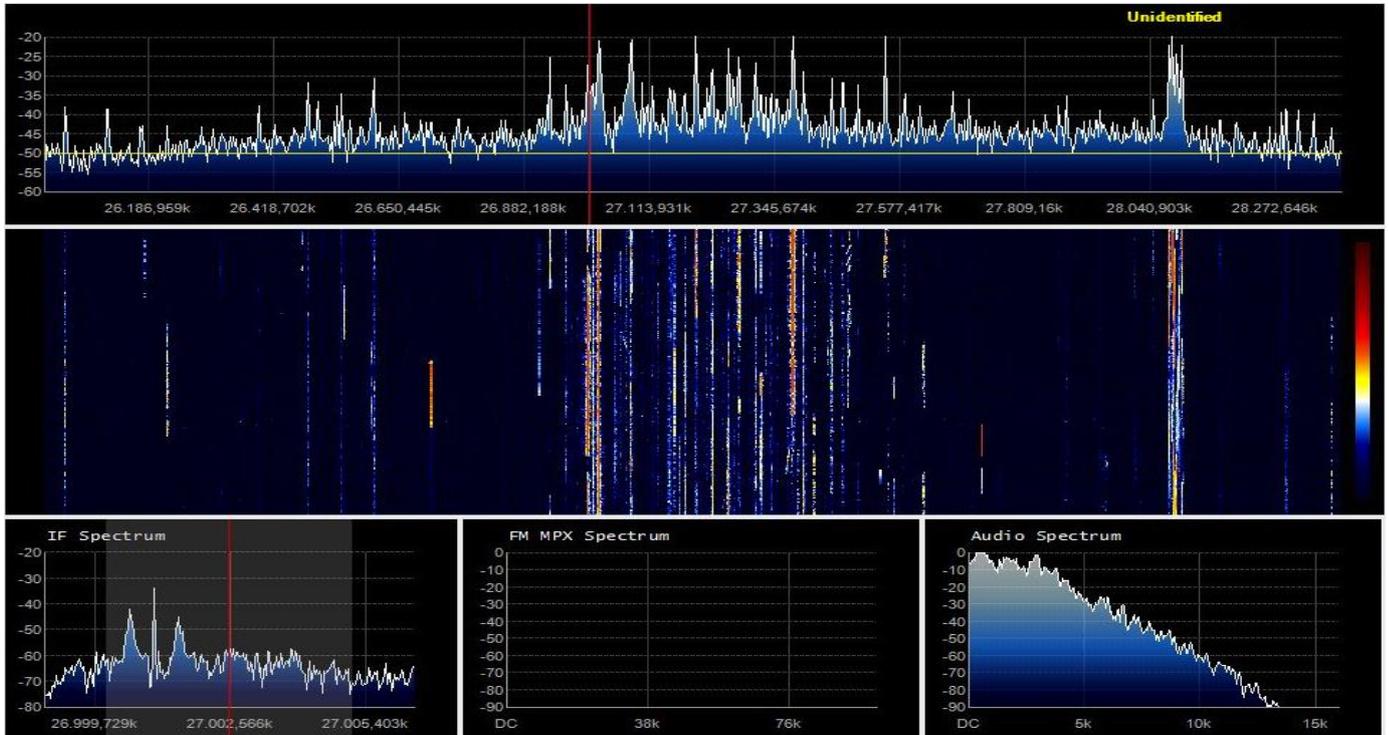


Figura 5-18 FFT Display.

Podemos seleccionar la frecuencia de trabajo que queramos, haciendo clic en el espectro de frecuencias directamente o bien pinchando sobre la zona que marcan las frecuencias encima del mismo, tanto en el espectro de frecuencias como en el Waterfall o espectrograma.

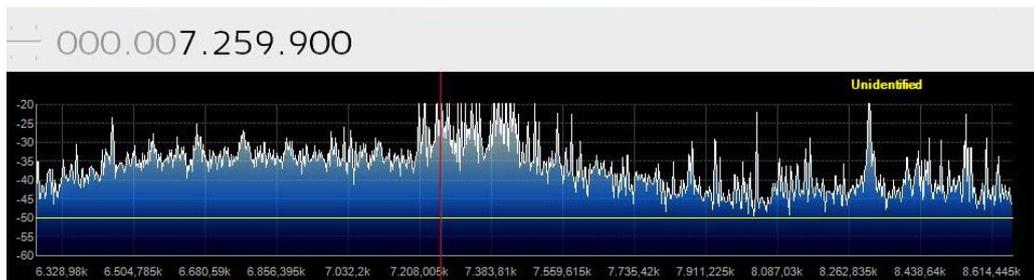


Figura 5-19 Espectrograma de frecuencias en la banda de 7 MHz.

Como resumen, el SDRSharp es un software potente, destinado a la recepción de radioseñales, que cumple con las ampliamente con todas las expectativas. Los diversos *plugins* que se le pueden añadir (algunos para localización de satélites, recepción de TDT, etc.) así como la facilidad en el interfaz maquina-usuario, sumado al hecho de que se trata de una aplicación totalmente gratuita, hacen que sea una opción a tener en cuenta para posteriores trabajos.

5.5.2 GNURadio.

GnuRadio[19] es un proyecto opensource¹¹ que tiene como objetivo proporcionar las librerías necesarias para desarrollar aplicaciones de Radio Definida por Software (SDR). Puede utilizarse con hardware de RF de bajo costo para crear sistemas de radios definidas por software, o sin hardware en un ambiente de simulación y es utilizada en su mayor parte por ambientes académicos, aficionados y comerciales para dar soporte a la investigación en comunicaciones inalámbricas y en sistemas de radio en el mundo real. EricBlossom es el creador del proyecto GnuRadio y uno de los más importantes componentes del proyecto.

GnuRadio corre bajo Linux pero hay posibilidad de instalarlo en plataformas Windows y Macintosh. En paralelo con el desarrollo software hay un desarrollo hardware para crear un frontend optimizado para aplicaciones SDR desarrollados con GnuRadio. El componente hardware es el sistema SDR planteado anteriormente y también sigue la misma filosofía del código abierto ya que sus esquemas están disponibles para quien quiera aventurarse y construir su propio frontend. Su uso no es obligatorio pero ahorra al diseñador del sistema los problemas que la integración de un nuevo componente hardware pueda conllevar.

CONCEPTO DE BLOQUE

La filosofía GnuRadio se basa en la teoría de los grafos donde los vértices son bloques de procesamiento de datos y las uniones entre ellos representan el flujo de información entre los mismos.

Los bloques de procesamiento de señales vienen implementados en el lenguaje C++, la llamada a los bloques se realiza en Python. Python es un lenguaje de programación interpretado que no necesita compilación, esto agiliza el desarrollo ya que no se preocupa de la implementación de los bloques, simplemente enlaza un bloque con otro encaminando el flujo de datos hasta la salida lo que pasa dentro del bloque es transparente para él. Conceptualmente los bloques pueden procesar una cantidad infinita de datos que fluye del puerto de entrada al puerto de salida y así de bloque en bloque.

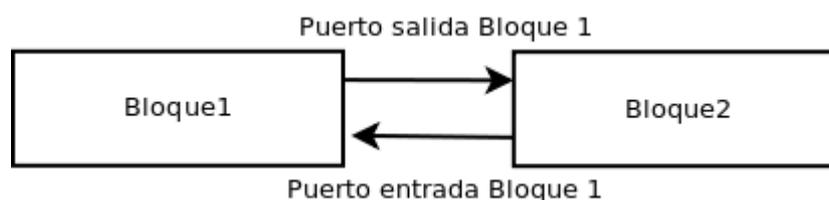


Figura 5-20 Esquema de bloques utilizado por GNURadio.

Los atributos que definen un bloque son número de puerto de entrada, número de puerto de salida y el tipo de datos de entrada y salida que manejan. No todos los bloques tienen porque tener definidos todos los atributos. Hay bloques de solo entrada o solo salida.

GNURadio incluye más de 100 bloques predefinidos en su librería. También existen numerosas aportaciones por la comunidad del opensource o de aficionados que no están incluidos en el paquete estándar. El diseño e implementación de un bloque nuevo aunque conlleva ciertos conocimientos de programación no es una tarea difícil. Los bloques son clases que realizan operaciones matemáticas,

¹¹Opensource o proyectos de código abierto, son proyectos software donde el código fuente está disponible para que cualquier usuario pueda estudiar el proyecto mejorarlo aportar nuevas ideas o simplemente reutilizar el código para sus propios proyectos.

acceso a la memoria, control de entrada y salida de datos,...en otras palabras realizan funciones críticas y deben interactuar de una forma más directa con el sistema operativo.

En nuestro trabajo se proponen dos sistemas SDR con diferentes características: El primero de ellos es un sistema receptor de señales utilizando modulación en amplitud (AM) y el segundo es un receptor de señales moduladas en frecuencia (FM). Para la experimentación y la comprobación de ambos circuitos se utilizó la ANT1 y el resto de componentes hardware

La **Figura 5-21** es una captura de pantalla del programa GNURadio. Se trata de una interfaz básica, en donde el programa muestra por defecto la capacidad de nombrar y atribuir valores a una Variable además de un segundo bloque con una serie de opciones. En la parte derecha, encontramos una lista de todos los posibles bloques que el programa pone a disposición del usuario para la creación de diferentes circuitos SDR.

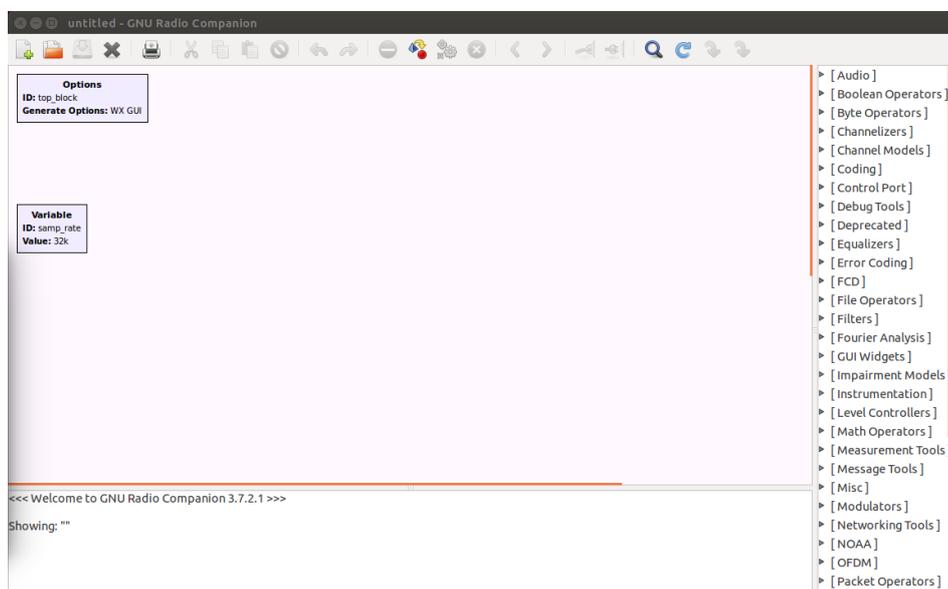


Figura 5-21 Interfaz del programa GNURadio.

A continuación se mostrarán los dos circuitos llevados a cabo para la recepción de señales en AM y FM.

AM_RECEIVER:

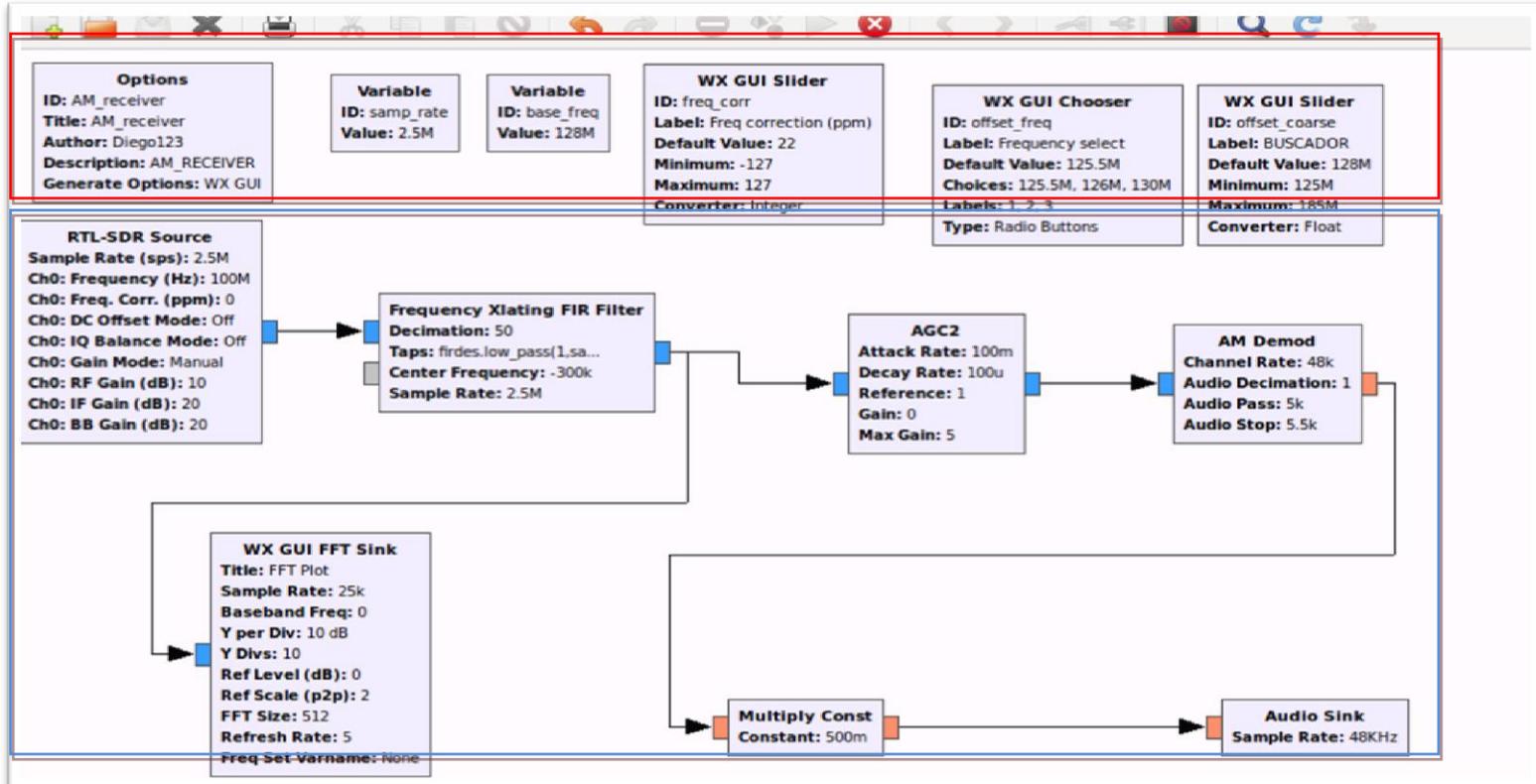


Figura 5-22 Esquema del receptor AM implementado en GNURadio.

Los bloques de la parte superior (en rojo) corresponden a diferentes opciones (sliders y selectores de frecuencia) introducidos para hacer más interactiva la interfaz con el usuario. Los sliders tienen una capacidad de selección de frecuencias de 125 a 155 MHz, que es lo correspondiente a la banda de HF + 125 MHz del Upconverter. El bloque FrequencyXlating FIR Filter es un filtro complejo que desplaza la frecuencia de la señal, la filtra pasabajo y la diezma mediante un determinado factor. A la salida del filtro encontramos el bloque que permite visualizar la transformada de Fourier en tiempo real de la señal filtrada (FFT Sink) y posteriormente un controlador automático. Tras este bloque acoplamos el demodulador en AM, un multiplicador para aumentar la amplitud de la señal recibida e inyectamos la señal demodulada en la tarjeta de sonido del ordenador para escuchar el resultado.

Los resultados de este circuito se detallarán en posteriores epígrafes.

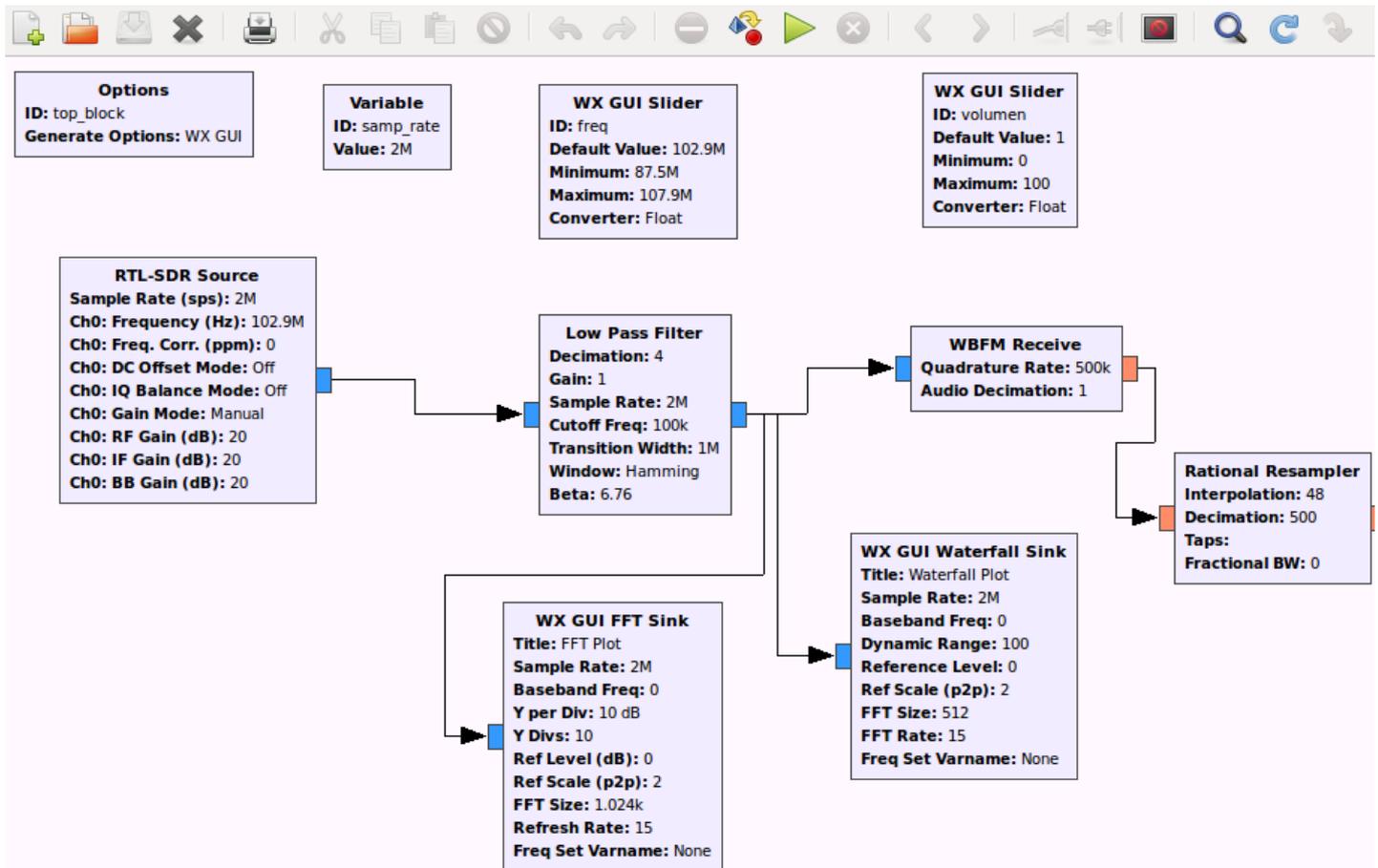
FM_RECEIVER:

Figura 5-23 Esquema del receptor FM implementado en GNURadio.

El receptor que se muestra en la **Figura 5-23** es similar al de AM con algunas variantes.

En primer lugar, mencionaremos que con el circuito de FM, no se llevó a cabo una experimentación en la banda de HF, sino que lo que se pretendió fue examinar la viabilidad del software como receptor de señales FM. Para ello se utilizó la antena de VHF que venía incorporada con el receptor SDR

En segundo lugar, variamos la frecuencia de muestreo a 2 MHz e introducimos dos sliders (uno para elegir la frecuencia y otro para el volumen). Por otro lado, establecemos una frecuencia central de 102.9MHz en el bloque fuente y añadimos un filtrado paso bajo. Posteriormente generamos un bloque que permite visualizar las transformadas de Fourier en tiempo real de la señal mediante un gráfico sencillo y también en forma de. Acoplamos a un demodulador FM y a un bloque Interpolador/ Diezmador cuya función es disminuir la tasa de muestras en una cantidad 10 veces menor, y a su vez al sumidero de audio o Audio Sink.

5.5.3 WebSDR

WebSDR es un sistema de Radio Definida por Software conectado a Internet y creado por la Universidad de Twente, que permite a diferentes oyentes escuchar y sintonizar diferentes emisiones simultáneamente. Gracias a la tecnología SDR es posible la sintonización de diferentes señales y por parte de diferentes usuarios; al contrario de los clásicos receptores que se encuentran disponibles en internet.

Para llevar a cabo el Trabajo se ha utilizado WebSDR en un PC del Laboratorio de Electrónica corriendo en Linux y se instalaron las librerías y demás software WebSDR necesario que previamente se había solicitado a la Universidad de Twente. Además, se usaron ANT1 y ANT2 además del receptor SDR y el Up-converter para comprobar el sistema en dicho software de manera conjunta.

En cuanto al software se siguieron las instrucciones de instalación planteadas, posibilitando la recepción de las señales (físicamente mediante ANT1o ANT2, receptor SDR-Up converter) y la manipulación de las mismas para llevarlas a un entorno web en un mismo equipo. Para ello la solución aportada ha sido la siguiente:

Gracias a la aplicación rtl_tcpde la librería de software libre OsmocomSDR (previa compilación y creación de diferentes carpetas), hemos creado un servidor que permite compartir los canales I/Q del receptor SDR. La aplicación rtl_tcp nos permite crear un socket que para el intercambio del flujo de datos que contiene las señales I/Q de manera fiable y ordenada. Además es rtl_tcp quien se encarga del muestreo de la señal que se pondrá posteriormente a disposición de la red.

La aplicación WebSDR se conecta al servidor rtl_tcp utilizando en este caso el dispositivo de red virtual *loopback* (dirección 127.0.0.1) y el puerto 1234 para obtener los datos radio.

```
jnunez@websdr:~$ ifconfig
eth0      Link encap:Ethernet  direcciónHW 70:71:bc:4f:92:7c
          Direc. inet:192.168.1.45  Difus.:192.168.1.255  Másc:255.255.255.0
          Dirección inet6: fe80::7271:bcff:fe4f:927c/64 Alcance:Enlace
          ACTIVO DIFUSIÓN FUNCIONANDO MULTICAST MTU:1500 Métrica:1
          Paquetes RX:21478 errores:0 perdidos:259 overruns:0 frame:0
          Paquetes TX:7074 errores:0 perdidos:0 overruns:0 carrier:1
          colisiones:0 long.colatX:1000
          Bytes RX:6678595 (6.6 MB)  TX bytes:1220644 (1.2 MB)

lo        Link encap:Bucle local
          Direc. inet:127.0.0.1  Másc:255.0.0.0
          Dirección inet6: ::1/128 Alcance:Anfitrión
          ACTIVO BUCLE FUNCIONANDO MTU:65536 Métrica:1
          Paquetes RX:15327 errores:0 perdidos:0 overruns:0 frame:0
          Paquetes TX:15327 errores:0 perdidos:0 overruns:0 carrier:0
          colisiones:0 long.colatX:0
          Bytes RX:3419674 (3.4 MB)  TX bytes:3419674 (3.4 MB)
```

Figura 5-24 Terminal con comando ifconfig para conocer dirección local.

Una vez establecida la conexión entre WebSDR y el hardware, el servidor WebSDR servirá las peticiones de los clientes en el puerto 80.

Por otra parte, se ha modificado el archivo de configuración del servidor WebSDR para limitar el ancho de banda a repartir entre los diferentes usuarios del sistema. En nuestro caso se ha limitado a un número máximo de 20 usuarios con una tasa de 100 kbits/s cada uno.

Por tanto, el sistema es capaz de servir a los usuarios que se encuentren en la misma subred (en nuestro caso la 192.168.1.X). Para poder servir a clientes que se encuentren fuera de ese ámbito, incluso a cualquier cliente de internet, los servicios informáticos del CUD redirigieron el puerto 8015 del servidor público XXX al puerto 80 de la máquina que corre el WebSDR.

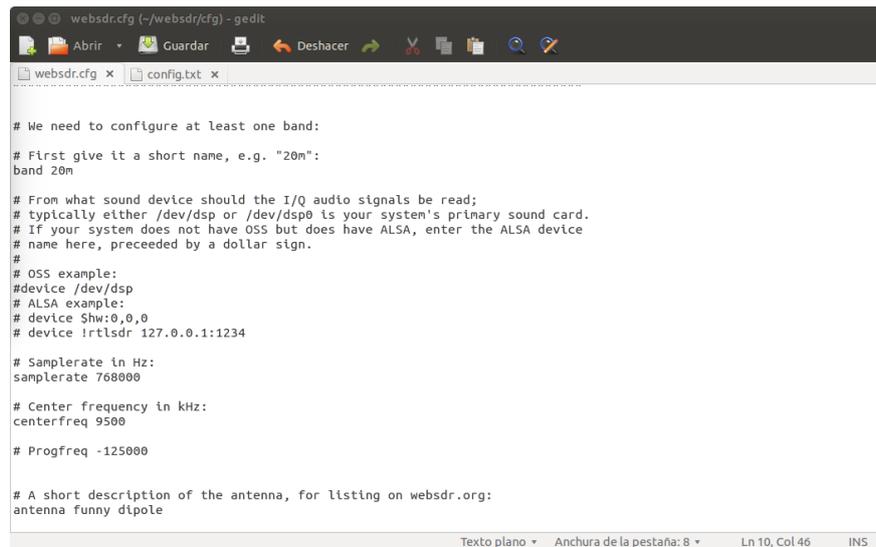
Toda esta configuración permite que diferentes usuarios se puedan conectar concurrentemente y utilizar la misma banda de frecuencia de forma independiente. Incluso, podríamos conectar diferentes receptores SDR para operar con diferentes bandas de frecuencia o aumentar el número de conexiones posibles en una de ellas.

Finalmente, es posible configurar muchos otros parámetros del servidor WebSDR a través del fichero de configuración, como por ejemplo los siguientes:

Frecuencia de muestreo. Este parámetro afectará en mayor o menor medida al grado de rapidez a la hora de refrescar las recepciones de nuestro sistema y mostrarlas como FFT (Transformadas Rápidas de Fourier). Las frecuencias más aconsejables para receptores SDR son las siguientes: 256000, 512000, **768000** (seleccionada), 1024000, 1536000, 2048000 y 2880000 Hz.

Seleccionar la frecuencia central. Tras las pruebas realizadas (se comentarán más adelante) y a la vista de los resultados obtenidos, se establece la frecuencia de 9500 KHz como frecuencia central del sistema por ser ésta una zona rica en emisiones en HF.

Selección de la *progfreq* (frecuencia programable): Se trata de un valor en KHz que debemos de introducir si estamos trabajando con Up/down converters. 125000.



```

# We need to configure at least one band:
# First give it a short name, e.g. "20m":
band 20m

# From what sound device should the I/Q audio signals be read;
# typically either /dev/dsp or /dev/dsp0 is your system's primary sound card.
# If your system does not have OSS but does have ALSA, enter the ALSA device
# name here, preceded by a dollar sign.
#
# OSS example:
# device /dev/dsp
# ALSA example:
# device $hw:0,0,0
# device !rtlsdr 127.0.0.1:1234

# Samplerate in Hz:
samplerate 768000

# Center frequency in kHz:
centerfreq 9500

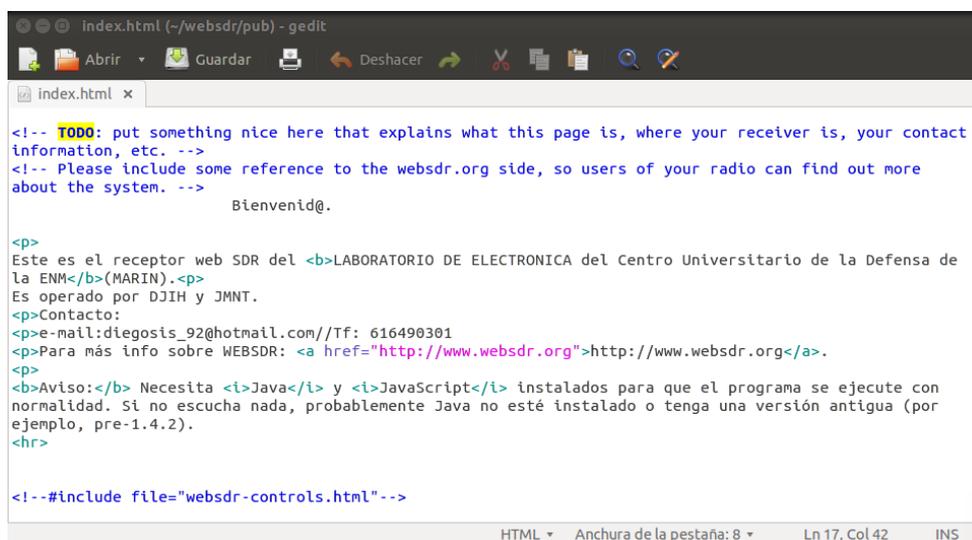
# Progfreq -125000

# A short description of the antenna, for listing on websdr.org:
antenna funny dipole

```

Figura 5-25 Fichero de configuración de WebSDR.

Una vez seguidas las instrucciones pertinentes y realizados los cambios adecuados en el fichero de configuración, accedimos a los ficheros .html para transformar la ‘aparición’ de nuestra aplicación web. Entre otras ventajas, destacamos la implementación de un modo tal que pueda ser utilizado por dispositivos como smartphones o tablets, siempre y cuando requieran de las últimas versiones de Java o Javascript, así como el establecimiento de un chat libre entre los diferentes usuarios conectados a la web y la posibilidad de realizar grabaciones en tiempo real de las emisiones para su posterior uso por parte del usuario.



```

<!-- TODO: put something nice here that explains what this page is, where your receiver is, your contact
information, etc. -->
<!-- Please include some reference to the websdr.org side, so users of your radio can find out more
about the system. -->
    Bienvenid@.

<p>
Este es el receptor web SDR del <b>LABORATORIO DE ELECTRONICA del Centro Universitario de la Defensa de
la ENM</b>(MARIN).<p>
Es operado por DJIH y JMNT.
<p>Contacto:
<p>e-mail:diegosis_92@hotmail.com//Tf: 616490301
<p>Para más info sobre WEBSDR: <a href="http://www.websdr.org">http://www.websdr.org</a>.
<p>
<b>Aviso:</b> Necesita <i>Java</i> y <i>JavaScript</i> instalados para que el programa se ejecute con
normalidad. Si no escucha nada, probablemente Java no esté instalado o tenga una versión antigua (por
ejemplo, pre-1.4.2).
<hr>

<!--#include file="websdr-controls.html"-->

```

Figura 5-26 Fichero .html de la aplicación desarrollada.

6 RESULTADOS / VALIDACIÓN / PRUEBA

6.1 Resultados.

El objetivo de este epígrafe es evaluar los resultados obtenidos durante la realización del presente trabajo.

6.1.1 Montaje de todos los equipos HW.

Se llevó a cabo el montaje de los diferentes accesorios hardware (incluidos antenas y up converter) y la circuitería necesaria, quedando la estación perfectamente instalada en el laboratorio de electrónica del CUD, en el edificio Isaac Peral. La antena A99 Solarcom queda pendiente de instalación y posterior utilización.

6.1.2 Instalación de SDRSharp#.

Tras el montaje de todos los elementos hardware, se instalaron en los drivers necesarios para el correcto funcionamiento del receptor USB. Primero en Windows donde fue necesaria la implementación del driver Zadig, para posteriormente ejecutar la instalación del software SDRSharp#. La instalación de este software fue otro de los objetivos alcanzados.

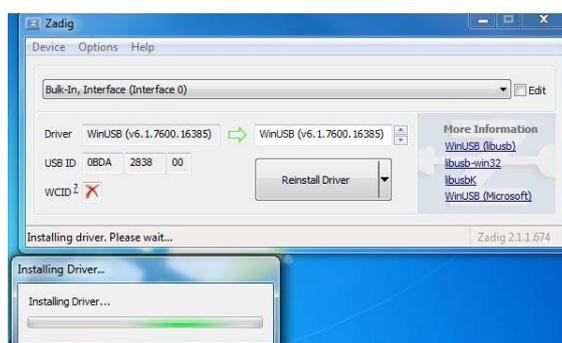


Figura 6-1 Instalación SDRSharp#.

Resultados de recepciones en HF.

Antes de empezar a describir los resultados de las diferentes pruebas del sistema, es necesario tener en cuenta algunas consideraciones. Para empezar, se investigaron las emisiones en HF que pudieran estar dentro del alcance de nuestras antenas y cumplieran lo anteriormente mencionado. Posteriormente, se llevó a cabo una relación de dichas emisiones a las que llamamos ‘EMISIONES INTERESANTES’ y que se detallan en la siguiente tabla.

CÓDIGO DEL PAÍS	SITIO WEB	Información adicional
BGR	Radio Bulgaria International	6.000, 9.400, 11.700, 11,800
BLR	Radio Belarus	7.255, 11.730, 7.390
CAN	Reloj Atómico de Canadá	10.000
CHN	Radio Internacional de China	7.250
ESP	Radio Exterior de España	15.585, 7275, 21.610
ESP	Radio Nacional de España	En la noche (KHz): 567, 576, 588, 585, 738, 774, 855, 1044
FRA	Radio France International	16.564
SRB	Radio Serbia	6.100, 9.635
TUR	Voice of Turkey	9.770, 9.870, 11.930, 27.047
USA	VoiceOfAmerica (VOA)	7.340, 9.415, 11.625
VEN	Reloj Atómico de Venezuela	10.000

Tabla 6-1Relación de ‘EMISIONES INTERESANTES’.

Posteriormente, se realizaron las pruebas de radiorecepción en las que se evaluaron diferentes parámetros utilizando para ello, parte del código RST. Dicho código, es usado para describir la calidad de las transmisiones de radio, especialmente en informes de recepción escritos por oyentes de onda corta. Cada letra del código representa un factor específico de la señal, y cada factor tiene diferentes escalas.

(R) Calidad de la recepción: Este apartado evaluará la calidad de la recepción y el grado de claridad de la información recibida, así como la facilidad para poder distinguir dicha emisión de otras. Comprende 5 posibilidades:

	1	2	3	4	5
R	Ilegible	Apenas Legible	Legible con dificultad	Legible	Perfectamente Legible

(S)Intensidad de la señal: En este factor se tendrá en cuenta la intensidad de la señal recibida. Se tendrá en cuenta la hora de la recepción y los factores atmosféricos que pudieran influir en la misma.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S	Apenas Perceptible	Muy débil	Débil	Aceptable	Regularmente Buena	Buena	Moderadamente fuerte	Fuerte	Extremadamente Fuerte

Para todas las pruebas realizadas, se establece una ganancia de 25,4 dB por ser un valor que permite recibir emisiones con buenos resultados. Además se introduce en el software el resultado obtenido en la calibración del receptor SDR (según Anexo 9.3. *Calibración del Receptor*). En concreto un valor de 24 ppm de error para nuestro dispositivo. A partir de ese momento, se empiezan a recibir y clasificar las diferentes emisiones según el código RST.

Prueba de recepción.

La realización de la prueba de recepción se lleva a cabo el día 27 de Febrero, entre las 1630H y las 2015H. Se ponen en marcha ambas antenas, con el objetivo de comparar las diferentes recepciones en todo el espectro de HF. El software empleado en toda la prueba es el SDRSharp. Para ello se eligen una serie de frecuencias en dos bandas concretas (se detallan a continuación) y se chequean las calidades de las recepciones para ambas antenas.

ANTENA	PARAMETROS	VOA (17.888MHz)	RNF (16.564 MHz)	RADIO ROMANIA INTERNATIONAL (17.833 MHz)	RADIOAFICIONADO EN EL CENTRO DE NUEVA YORK (28.397 MHz)	VOICE OF TURKEY (27.047 MHz)	CONVERSACION RADIOAFICIONADOS GALLEGOS (27. 148 MHz)
ANTENA 1	CALIDAD	R4	R4	R4	R3	R3	R2
	INTENSIDAD	S9+6 (-32dbm)	S9+3 (-57 dbm)	S9+6 (-50 dbm)	S8 (-58 dbm)	S7 (-97 dbm)	S7 (-85 dbm)
ANTENA 2	CALIDAD	R5	R4	R5	R4	R5	R5
	INTENSIDAD	S9+3 (-28 dbm)	S9+6 (-41 dbm)	S9+3 (-22 dbm)	S9+3 (-55 dbm)	S9+3 (-22 dbm)	S9+6(-32dbm)

Emisiones cercanas a la banda de 20m .

Emisiones cercanas a la banda de 10m.

Tabla 6-2 RESULTADOS OBTENIDOS EN PRUEBA DE RECEPCIÓN.

En un primer momento, ambas antenas reciben señales de FM en la parte baja de HF (desde 100 KHz hasta 1,2 MHz aproximadamente). En este sentido, se producen una serie de alteraciones en dicha zona (acumulación de ruido, repeticiones de emisoras de FM a lo largo de la banda de 25m etc.) que impiden determinar la buena calidad del sistema en dicha zona. De entre todos los resultados obtenidos, destacaremos los siguientes:

VOA (Voice of America). Con una calidad de R4 y R5 para ANT1y ANT2 respectivamente, esta emisora ha sido claramente audible durante todas la prueba. Esto es debido a que la MUF es diferente a lo largo de la jornada, por lo que no es extraño recibirla en diferentes frecuencias.

La parte alta de HF (desde 20 a 30 MHz) es la zona ocupada por los radioaficionados para llevar a cabo sus radioenlaces. Fue en esta parte donde se capturaron, durante la realización de la primera prueba algunas emisiones de radiaficionados tanto de origen nacional como del extranjero. Destacaremos el radioenlace realizado en cooperación con la Unión de Radioaficioandos de Ourense (URO) en 27 MHz. Se pudo comprobar que las diferencias entre ambas antenas en esta región son francamente notables.

En una primera aproximación podemos decir que ANT1 Y ANT2 se comportan prácticamente igual en cuanto a calidad e intensidad de las recepciones en bandas cercanas a los 20m. No era de extrañar, pues a la hora de realizar la caracterización, se pudo observar que dicha antena (ANT2) presenta un buen coeficiente de reflexión en esa zona (en torno a -22db). La situación varía radicalmente al trasladarnos a bandas cercanas a los 10m. Es ahí donde ANT1 muestra sus carencias y ANT 2 se comporta de una mejor forma. De hecho, es otra de las zonas donde a priori se podía intuir que iba a trabajar de una forma más eficiente. Como se puede apreciar en los resultados obtenidos de su caracterización, la ANT2 resuena realmente bien en la banda de 20 MHz. Esto es posible que sea pura coincidencia de resonancia eléctrica o resultado del propio adaptador interno en esa banda. Recordemos que casi todas las antenas verticales menos algunos tipos de antenas bobinadas con carga en base, resuenan en más de una frecuencia. Por tanto, teniendo en cuenta su frecuencia de resonancia (27 MHz) y estudiando las curvas de ROE y S11 se puede comprobar fácilmente que presenta una roe muy pequeña en zonas próximas a los 27 MHz (del orden de 1.2)¹², y un coeficiente de reflexión muy asequible también para recepción (-17 dB).

A la vista de los resultados y las pruebas realizadas con ambas antenas, podemos añadir que ANT2 se comporta razonablemente bien en todo el espectro de HF, con sus limitaciones en bandas bajas. Dicha antena, trabaja adecuadamente hasta los 10 MHz -30m- en recepción ya que es en esa zona donde tiene su resonancia eléctrica natural además de su transformador de impedancia correspondiente ANT1 al ser una antena de hilo largo, y teniendo en cuenta la forma en la que se ha instalado (sin una tierra física conectada a su lado de masa en el UNUN 1:9) y pegada a la fachada del edificio Isaac Peral, es bastante ruidosa en la recepción. Además, con 20 m esta antena tiene una cierta directividad en bandas altas. Preferiblemente y para mejorar las características radioeléctricas de la antena, deberíamos haber utilizado otro hilo a modo de contraantena. Si quisiéramos trabajar con enlaces de HF a larga distancia, es decir, con ángulos de despegue bajos, se pueden aprovechar las características de los lóbulos de radiación principales de ANT1. Hay que tener en cuenta que la altura de instalación sobre el suelo ha influido enormemente en la orientación espacial de dichos lóbulos, por lo que en este caso será necesario aplicar correcciones en la orientación horizontal de la antena.

Por otra parte, aunque a priori pensábamos que el receptor RTL2832U obtendría unos resultados muy buenos, y nada envidiables a los receptores más avanzados, no se han obtenido los resultados esperados, en parte por los problemas encontrados en la colocación de las antenas. La conversión directa también es buena, incluso para escuchar todo el ruido armónico generado de las emisoras comerciales y el ruido ambiental electromagnético (el que se produce en zonas cercanas al 0). Las señales a recibir deben ser preferiblemente presintonizadas o preseleccionadas con un filtro para evitar los armónicos y batidos de las emisoras de FM y AM comercial. En este sentido, si quisiéramos recibir en bandas bajas de HF con menor ruido, deberíamos filtrar por ejemplo con un filtro de supresión de banda ‘notch’ que atenúe los 500-11600 KHz y 88-108 MHz de forma general y con más calidad con filtros de banda estrecha pasobanda, por ejemplo de 2 a 10 MHz para que rechace o atenúe las señales potentes adyacentes. Además, las señales inyectadas por el convertidor, también crean portadoras múltiples de su frecuencia de trabajo que deben ser eliminadas con un filtro pasobanda de la generada por él mismo (en concreto 125 MHz).

6.1.3 Instalación de GNURadio. Ejemplos de AM y FM.

La instalación y posterior implementación de los drivers necesarios en Linux, fue el resultado que permitió la posterior ejecución de todo el soporte GNURadio. Además se realizaron los circuitos explicados en el epígrafe anterior, obteniendo los siguientes resultados:

¹² Recordemos que en recepción ese valor es prácticamente desechable.

Resultados de los circuitos de GNURadio.

Para la realización de pruebas de los circuitos llevados a cabo con GNURadio, se utilizó la ANT2 como receptora en el caso del circuito de AM. Cabe destacar que para ambos circuitos no se obtuvieron grandes resultados, pues los circuitos realizados no eran lo suficientemente sofisticados como para ello. Sin embargo el objetivo de establecer otro tipo de software y comprobar su funcionamiento así como posible uso como material docente para años posteriores quedó superado. A continuación se detallan los resultados obtenidos en GNURadio para ambos circuitos:

El primero en evaluación será el circuito de AM:

Como vemos en la figura 6-2, y se ha mencionado anteriormente, los resultados obtenidos no fueron del todo satisfactorios. Sin embargo podemos que la interfaz con el usuario es práctica y le permite trasladarse hasta una posición máxima (la mostrada en pantalla) de 155MHz. El usuario durante la realización de la prueba se encontraba a una frecuencia de 30MHz y vemos como hay una ligera señal en torno a la frecuencia central, y aunque su intensidad era bastante pobre (S3) su calidad no era del todo mala (R4) y se trataba de una central aeronáutica dando coordenadas para líneas aéreas.

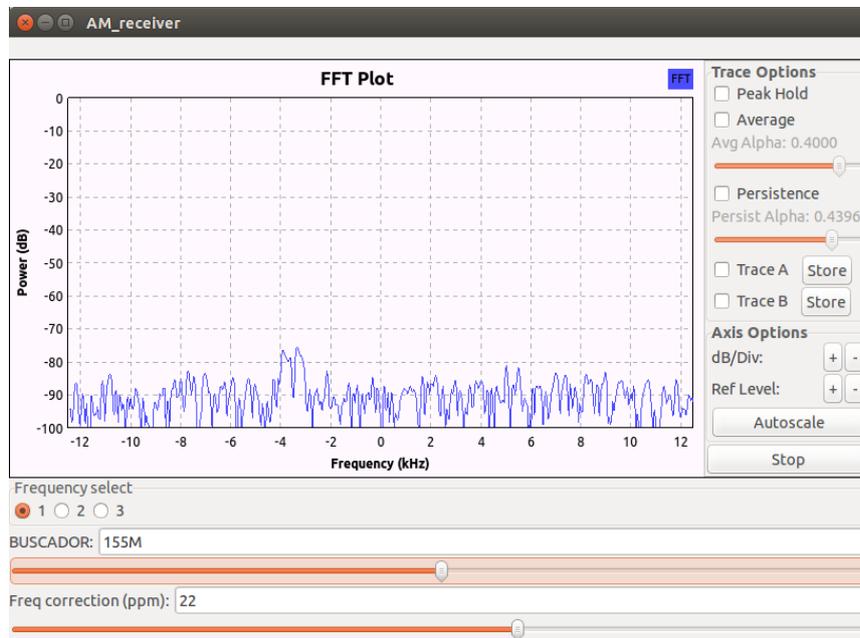


Figura 6-2 Resultados prueba receptor AM.

Aunque como ya se ha mencionado, el objetivo del receptor de FM es bien distinto, los resultados para este circuito fueron más satisfactorios pues se llegaron a recibir bastantes de las emisoras de FM

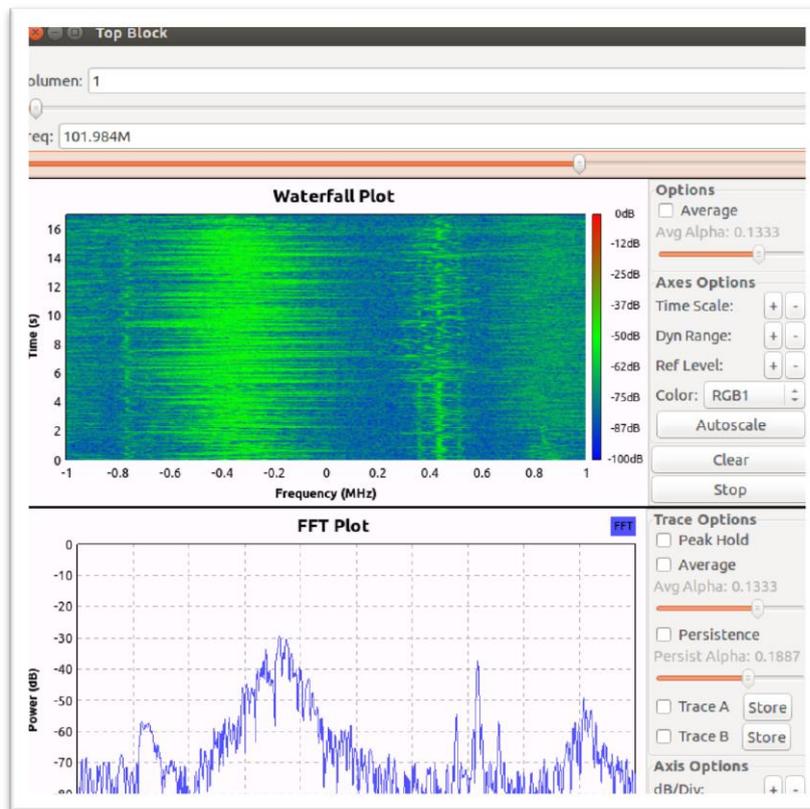


Figura 6-3 Resultados prueba receptor FM.

comercial cercanas al laboratorio. Como ya se ha mencionado la antena que se utilizó fue una antena de VHF asociada al receptor SDR. Se incorporó como novedad un espectrograma que facilitara al usuario la búsqueda de emisoras con alta potencia de emisión.

6.1.4 Instalación de WebSDR.

Por último se puso en marcha la instalación de WEBSDR-CUDENM. Gracias a la aplicación `rtl_tcp` encontrada en la librería del software libre OsmocomSDR y siguiendo los patrones de instalación necesarios, se puso en marcha esta aplicación que, como se ha dicho, permitirá a los usuarios que lo deseen el acceso a las señales recibidas por la estación.

Resultados de la aplicación WebSDR.

Para finalizar con el epígrafe es necesario presentar los resultados de la aplicación Web llevada a cabo. Como vemos en la figura 6-4, la aplicación desarrollada permita al usuario escoger una banda de frecuencias de 1 MHz alrededor de la frecuencia central que se seleccione. Además, el usuario puede seleccionar el tipo de modulación, la velocidad y el tamaño del espectrograma, así como grabar diferentes emisiones recibidas o incluso conocer la potencia de cada una de las señales. El servidor es accesible desde la intranet del CUD y desde internet a través de la URL <http://www.websdrcudmarin.no-ip.info>

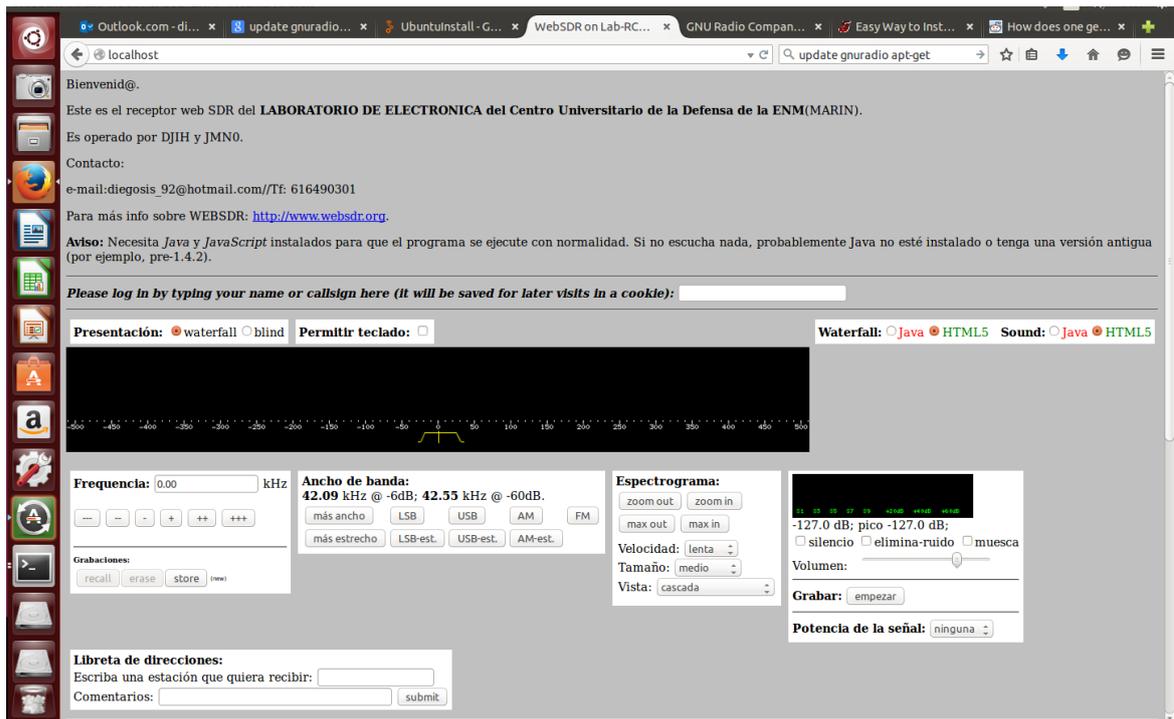


Figura 6-4 WEBSDR-CUDENM (I).

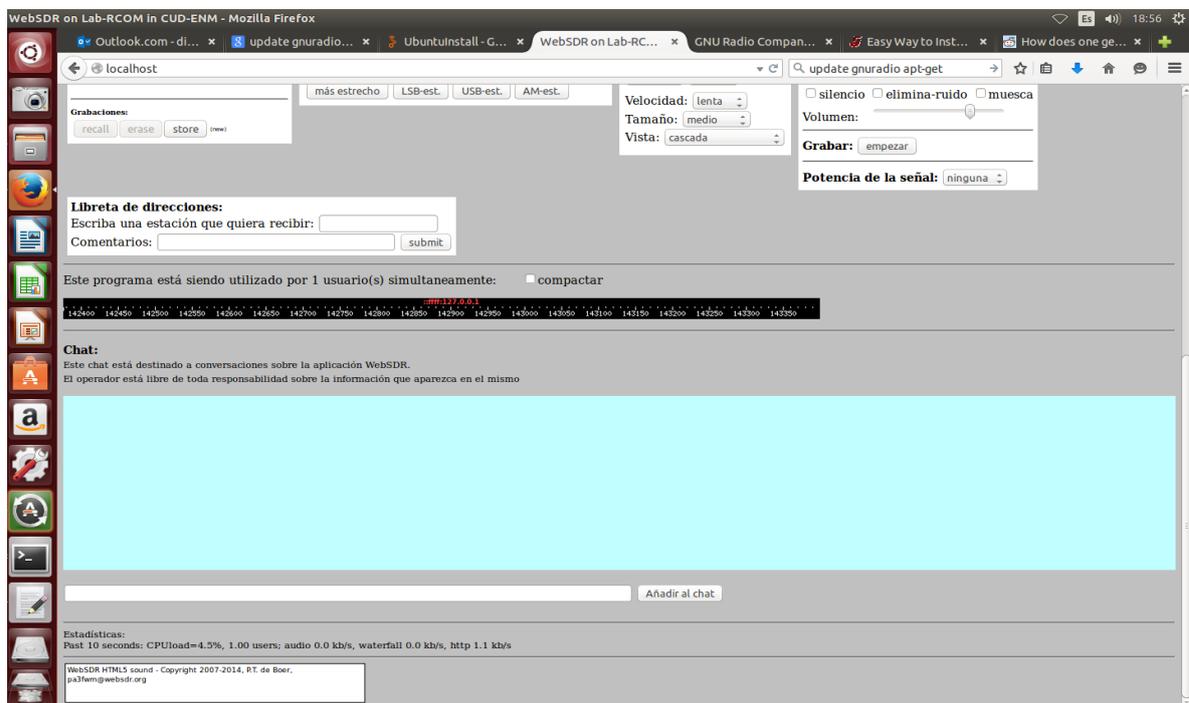


Figura 6-5 WEBSDR-CUDENM (II).

7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

7.1 Conclusiones.

Para finalizar es necesario incluir una serie de conclusiones que nos permitirán explicar si se alcanzaron o no los objetivos establecidos al inicio del TFG.

Se ha dado al lector una aproximación la tecnología SDR abordando los principios básicos de este tipo de radiocomunicaciones, así como la importancia de su uso en la banda de HF enmarcado dentro del ámbito militar y civil. Se ha desarrollado un sistema económico que permite la recepción de señales de HF mediante una serie de elementos hardware y software basándonos en tecnología SDR. Dicho sistema ha sido comparado en diferentes áreas con algunos de los sistemas SDR más modernos. La evaluación de los softwares más relevantes que existen en la actualidad en el ámbito SDR ha sido un factor con un importante peso en el trabajo. SDRSharp se presenta como un programa de rápido entendimiento que permite al usuario interactuar con el sistema desarrollado, permitiendo realizar recepciones de RF de manera fácil y sencilla. Por su parte el software GNURadio se presenta como una opción más que rentable y a tener en cuenta para posteriores trabajos por su calidad como material docente. Por último, la aplicación WebSDR realizada ha sido otro objetivo cumplido pues pone la tecnología SDR y en concreto la recepción en la banda de HF a disposición de cualquier usuario gracias a un entorno web.

7.2 Líneas futuras.

Para posteriores trabajos relacionados con este tipo de tecnología se proponen una serie de posibles líneas futuras:

- En relación con el hardware del sistema, sólo un receptor bueno o un dispositivo SDR con filtros pasobanda y preamplificador de la banda a recibir puede tener unos resultados satisfactorios. La selección de un dispositivo receptor mejor en cuanto a sensibilidad y rango dinámico es evidente, así como la construcción de unos filtros pasobanda que eliminen el ruido y los armónicos de las emisoras de FM y AM comercial.
- En este sentido, se plantea como posible línea futura la experimentación y diseño del filtro de banda eliminada mencionado anteriormente, que pueda introducirse entre en la antena y el receptor, y que sea capaz de eliminar las bandas innecesarias. El diseño de este tipo de filtros podría llevarse a cabo con el programa RFSIM99.
- La instalación y desarrollo de una futura estación multibanda, que abarque las bandas de LF, VHF y UHF, se plantea como línea de investigación muy interesante pues se podrían unificar diferentes tecnologías SDR en una misma plataforma a coste moderado.

- La modernización de esta primera estación no sería un problema pues al ser una tecnología basada en software, permite actualizar las infraestructuras existentes minimizando los costes de despliegue.
- El paso de una estación receptora a una transceptora (emisión/recepción) es de gran interés para establecer enlaces bidireccionales con otras estaciones y unidades con el objeto de poder experimentar en modo “activo” y no pasivo como se hace hasta la fecha.
- La recepción de las diferentes señales de HF es, en la mayoría de los casos, conveniente llevarlas a cabo en sitios elevados, alejados de los centros urbanos. Sería por lo menos interesante reubicar las antenas utilizadas en este TFG en emplazamientos de mejor cobertura que los actuales.
- Además, queda pendiente de plantear la posible instalación de una baliza que quede colocada autónomamente de forma remota en un lugar elevado y controlado en todo momento. Con un oscilador DDS o generador de RF sería suficiente para comprobar, a mayores, la calidad de nuestro sistema.
- Un estudio en detalle de la calidad del enlace y su alcance desde el emplazamiento actual, teniendo en cuenta que la propagación es de tipo ionosférico, sería una posible línea de investigación. Dicho estudio podría llevarse a cabo con los programas adecuados como VOACAP.
- La utilización de los softwares utilizados como apoyo a las diferentes asignaturas relacionadas con las radiocomunicaciones puede ser otra posible línea de actuación en un futuro. En concreto el software GNURadio que permitiría al alumno la capacidad de realizar diferentes “circuitos” y esquemas de demodulación.
- Aunque el alcance de este Trabajo Fin de Grado se ha limitado a enlaces radio de voz (fonía), sería interesante experimentar con distintos tipos de servicios de datos como los que se citan a continuación:

CW
PSK
RTTY
ADSB
ACARS
APRS
SSTV
FDMDV
NAVTEX
WeatherFax HF (WEFAX)
DRM

Además de los anteriores, resulta de interés para el ámbito militar los siguientes servicios de datos:

STANAG 5066 (Open5066)
STANAG 4538

- El estudio del impacto del uso masivo de este tipo de receptores en el ámbito militar y particularmente la posibilidad de introducción de un dispositivo SDR en un BUI de la Armada sería un objetivo a tener en cuenta para posibles TFG's.

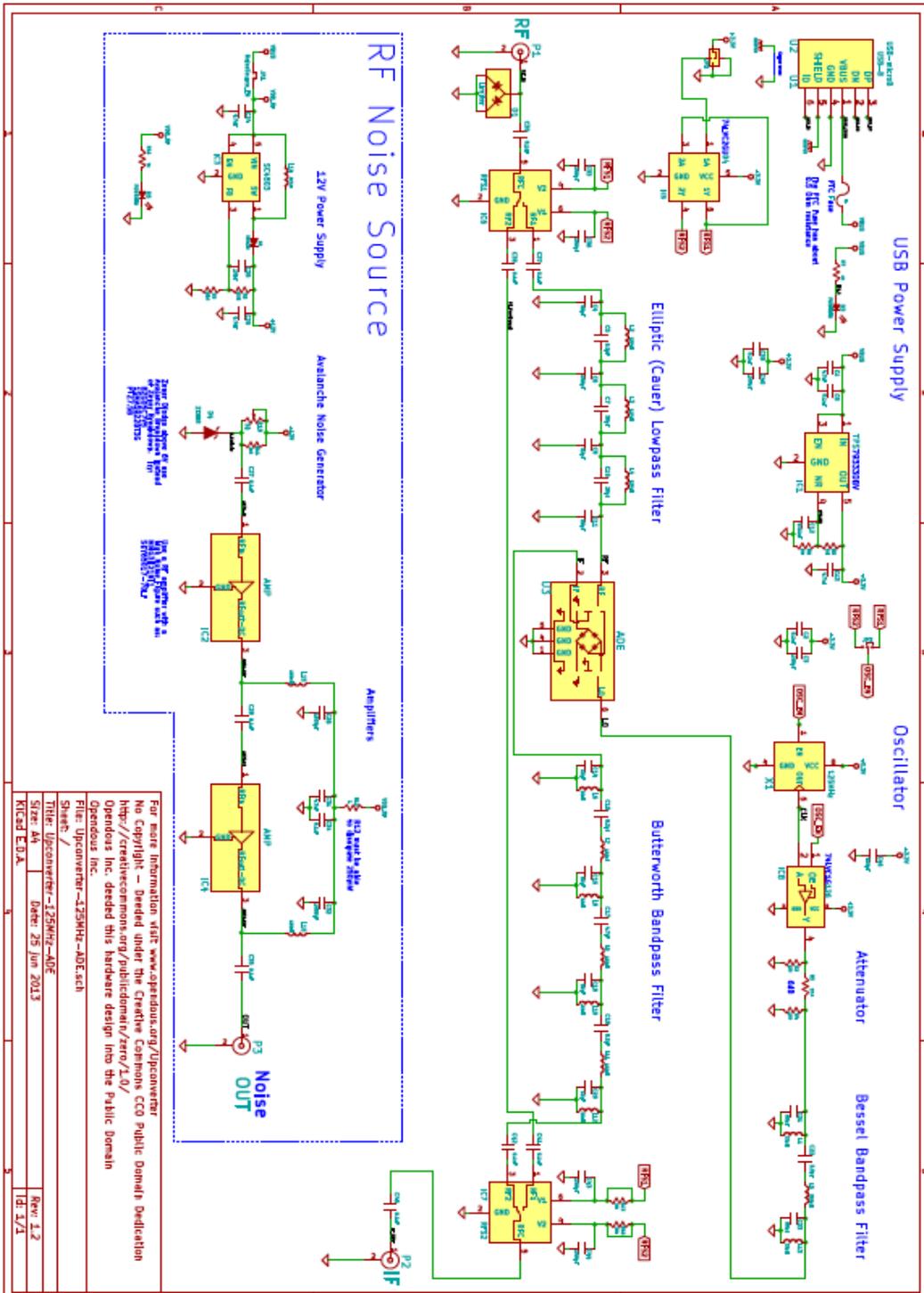
8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. H. Reed, *Software Radio: A modern Approach to Radio Engineering*, Prentice Hall, 2002.
- [2] Tuttlebee, W. (2002). *Software Defined Radio: Origins, drivers, and international perspectives*. John Wiley & Sons, Inc. Nueva York.
- [3] D. Luis Fernando Bolaños Alonso, *SDR (Software Defined Radio)*, Memorial del Arma de ingenieros, 90, Julio 2013.
- [4] S. Srikanteswara, R. C. Palat, J. H. Reed, P. Athanas, “An Overview of Configurable Computing Machines for Software Radio Handsets”, *IEEE Communications Magazine*
- [5] J. Mitola, “The Software Radio Architecture”, *IEEE Communications Magazine*, Mayo 1995.
- [6] R. L. Lackey, D. W. Upmal, “Speakeasy: The Military Software Radio”, *IEEE Communications Magazine*, Mayo 1995
- [7] Software Defined Radio Forum, www.sdrforum.org.
- [8] W. Bonser, *SPEAKeasy Military Software Defined Radio*, International Symposium on Advanced Radio Technologies, 1998
- [9] J. Mitola III, “SDR Architecture Refinement for JTRS”, *Proceedings of the Military Communications Conference*, vol 1, 2000
- [10] B. Tarver, E. Christensen, A. Miller et al, “Digital Modular Radio (DMR) as a Maritime/Fixed Joint Tactical Radio System (JTRS)”, *Proceedings of the IEEE Military Communications Conference*, vol 1, 2001
- [11] Assurance Technology Corporation, “Joint Combat Information Terminal (JCIT)”, <http://www.assurancetechnology.com/jcit.asp>

- [12] Ing. Alexander Galvis Quintero, IEEE Graduate Student Member, Christian A. Ceballos Betancour, Lukas De Sanctis Gil, *SDR: La alternativa para la evolución inalámbrica a nivel físico*, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.
- [13] Z. Salcic, C. F. Mecklenbrauker, “Software Radio - Architectural Requirements, Research and Development Challenges”, *The 8th International Conference on Communication Systems, Volume 2*, Noviembre 2002
- [14] Fernando Fernández de Villegas, Unión de Radioaficionados de Ourense, Equipos de radio definido por software, Octubre 2008.
- [15] Unión de radioaficionados de Ourense. Equipos de radiocomunicaciones <http://www.ea1uro.com/equipos2.html>
- [16] ExpertElectronics <http://eesdr.com/en/products-en/transceivers-en/sunsdr-mb1-en>
- [17] José Manuel Andújar Márquez, *Diseño y construcción de un sistema digital avanzado de comunicaciones en HF*, Física de la Tierra, 2000, Universidad Ramón Llull, E.I. T. Lasalle
- [18] José M^a Hernando Rábanos, Luis Mendo Tomas, José Manuel Riera Salis, *Transmisión por radio*, Ed. Universitaria Ramón Areces, 2013
- [19] Free Software Foundation, *GNU Radio, The GNU Software Radio* <http://www.gnu.org/software/gnuradio>

9 ANEXOS

9.1 Esquema interno Ham-it Up converter



9.2 Divagaciones sobre el acoplamiento antena cable estación HF CUD.

Pérdidas por desadaptación de la antena

Pérdidas de la simulación de un monopolo ideal de longitud 5m ($\lambda/4=300/4$) que presenta una ROE mínima de 1.75 en $f= 15$ MHz cuando se acopla a un coaxial con impedancia de 50 Ω .

El coeficiente de reflexión se define como:

$$\Gamma = \frac{\text{señal reflejada}}{\text{señal incidente}}$$

La ROE se determina en función del coeficiente de reflexión:

$$ROE = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \quad \Gamma = \frac{ROE-1}{ROE+1}$$

A su vez, el coeficiente de reflexión (Γ) vale:

$$\Gamma = \frac{Z_c - Z_0}{Z_c + Z_0}$$

Las pérdidas por desadaptación valen:

$$ML = -10 * \log(1 - \Gamma^2)$$

En nuestro caso, tenemos que $\Gamma = 0.28$ y las pérdidas son **ML= 0.34 dB**.

Pérdidas en el cable

Supongamos un cable de 50 Ω con una longitud de 10 metros que une la antena con el receptor.

Tipo cable	Atenuación	Atenuación (10m)
RG-58	7 dB/100m a 30 MHz	0.7 dB
RG-213	2 dB/100m a 10 MHz	0.2 dB
CFL-200	6 dB/100m a 30 MHz	0.6 dB

Pérdidas totales

Teniendo en cuenta que las pérdidas por desadaptación de la antena son independientes de la longitud del cable:

Tipo de cable	ML (dB)	Atenuación (10m)	Pérdidas totales
RG-58	0.34 dB	0.7 dB	1.04 dB
RG-213	0.34 dB	0.7 dB	0.54 dB
CFL-200	0.34 dB	0.7 dB	0.94 dB

Cable de 75Ω

Si el cable fuese de 75 Ω tendríamos:

Tipo cable	Atenuación	Atenuación (10m)
RG-59	4 dB/100m a 10 MHz	0.4 dB
RG-11	3.5 dB/100m a 10 MHz	0.35 dB

En este caso la ROE mínima es de 2.12 en $f = 15$ MHz por lo que $\Gamma = 0.36$ y las pérdidas son **ML=0.6 dB**.

Entonces las pérdidas totales en este caso son:

Tipo de cable	ML (dB)	Atenuación (10m)	Pérdidas totales
RG-59	0.34 dB	0.7 dB	1.04 dB
RG-11	0.34 dB	0.35 dB	0.7 dB

9.3 Calibración del USB SDR.

Para calibrar el Dongle:

1. Abrimos cmd en modo administrador.
2. Entramos dentro de la carpeta del programa
3. Introducimos el comando: `kal -s GSM900` y el programa nos muestra una lista con las posibles estaciones base y los canales.
4. Elegimos el canal con mayor potencia. En nuestro caso el canal 11.
5. Introducimos el comando: `kal -c11`.
6. Al finalizar dicha tarea, el programa nos traslada un mensaje donde nos indica las ppm a introducir en los diferentes softwares (concretamente -20.980 ppm).

```

C:\Users\tyson\Desktop\kalibrate-win-release>kal -c108
Found 1 device(s):
  0: ezcap USB 2.0 DUB-T/DAB/FM dongle

Using device 0: ezcap USB 2.0 DUB-T/DAB/FM dongle
Found Rafael Micro R820T tuner
Exact sample rate is: 270033.002142 Hz
meh: Calculating clock frequency offset.
Using GSM-900 channel 108 (956.6MHz)
average [min, max] (range, stddev)
+ 17.586kHz [17532, 17672] (141, 36.583420)
overruns: 0
not found: 7
average absolute error: -18.384 ppm

C:\Users\tyson\Desktop\kalibrate-win-release>kal -s GSM900
Found 1 device(s):
  0: ezcap USB 2.0 DUB-T/DAB/FM dongle

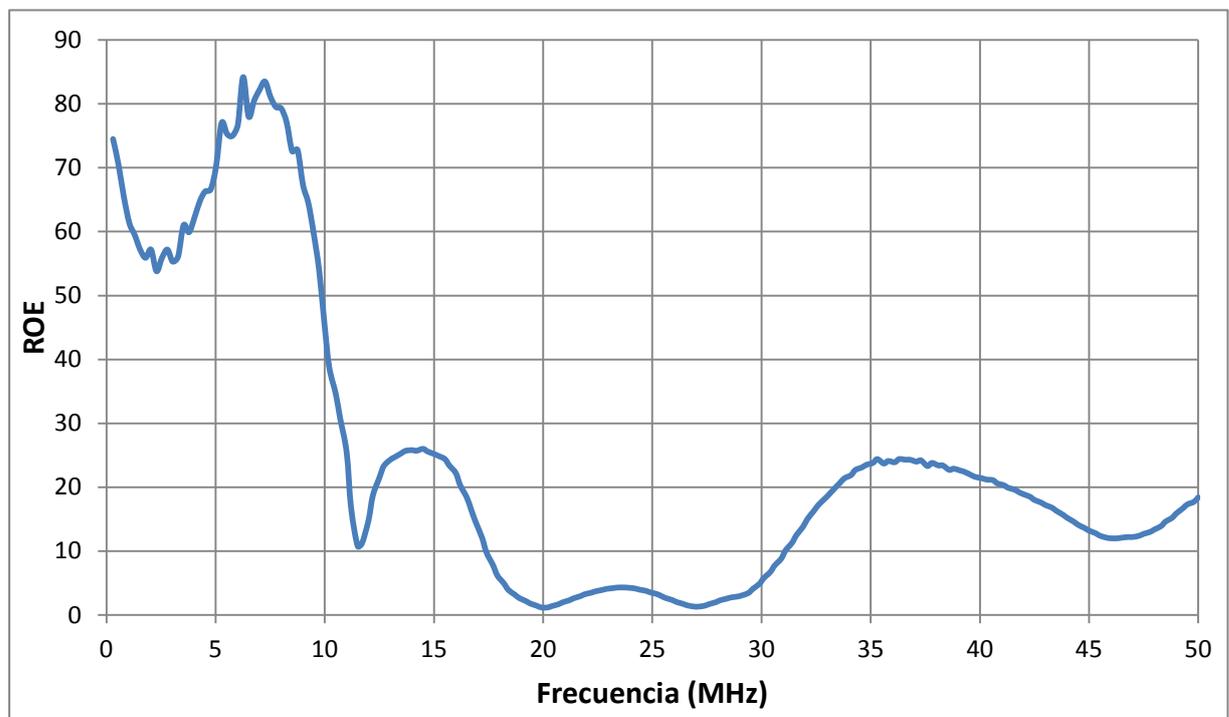
Using device 0: ezcap USB 2.0 DUB-T/DAB/FM dongle
Found Rafael Micro R820T tuner
Exact sample rate is: 270033.002142 Hz
meh: Scanning for GSM-900 base stations.
GSM-900:
  chan: 11 (937.2MHz + 18.357kHz) power: 54917.82
  chan: 12 (937.4MHz + 17.928kHz) power: 34123.95
  chan: 16 (938.2MHz + 18.068kHz) power: 46555.41
  chan: 108 (956.6MHz + 17.555kHz) power: 54686.42

C:\Users\tyson\Desktop\kalibrate-win-release>kal -c11
Found 1 device(s):
  0: ezcap USB 2.0 DUB-T/DAB/FM dongle

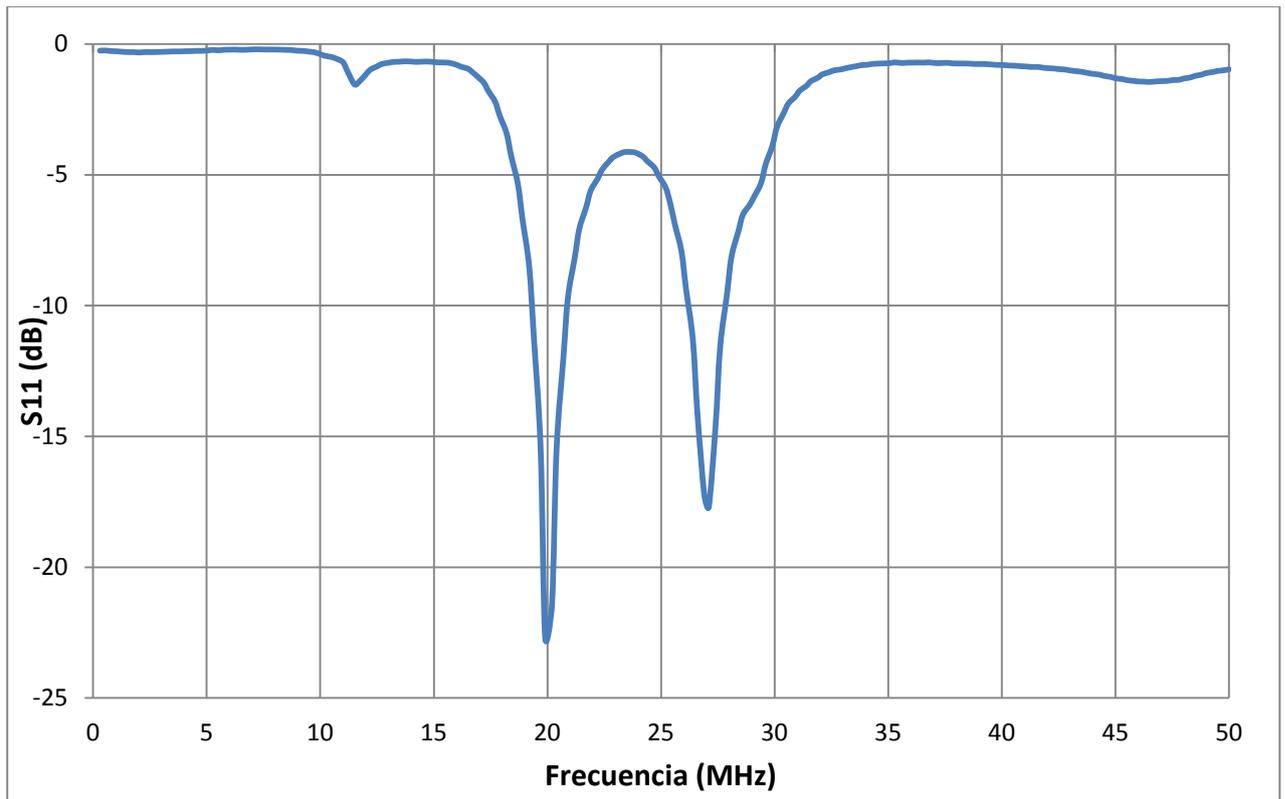
Using device 0: ezcap USB 2.0 DUB-T/DAB/FM dongle
Found Rafael Micro R820T tuner
Exact sample rate is: 270033.002142 Hz
meh: Calculating clock frequency offset.
Using GSM-900 channel 11 (937.2MHz)
average [min, max] (range, stddev)
+ 19.662kHz [19599, 19706] (106, 28.389431)
overruns: 0
not found: 263
average absolute error: -20.980 ppm

C:\Users\tyson\Desktop\kalibrate-win-release>_
    
```

9.4 Caracterización A99 con analizador de espectros.



ROE A99



SW11 A99

9.5 Instalación final de la antena LW-20.



9.6 Glosario de abreviaturas.

ACTS	ADVANCED COMMUNICATIONS TECHNOLOGIES AND SERVICES
ADC	ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER (A/D)
AGC	AUTOMATIC GAIN CONTROL
ALE	AUTOMATIC LINK ESTABLISHMENT
AM	AMPLITUDE MODULATION
ATC	AIR TRAFFIC CONTROL
ATU	ANTENNA TUNER
BFEM	BATTLE FORCE E-MAIL
CHARIOT	CHANGEABLE ADVANCED RADIO FOR INTER-OPERABLE TELECOMMUNICATIONS
COMSEC	COMMUNICATION SECURITY
CORBA	COMMON OBJECT REQUEST BROKER ARCHITECTURE
COTS	COMMERCIAL OFF THE SHELF
CW	CONTINUOUS WAVE
DAMA	DEMAND ASSIGNED MULTIPLE ACCESS
DMR	DIGITAL MODULAR RADIO
DPSK	DIFFERENTIAL PHASE SHIFT KEYING
DSB	DOUBLE SIDEBAND
DSP	DIGITAL SIGNAL PROCESSOR
DVB-T	DIGITAL VIDEO BROADCASTING - TERRESTRIAL
FDMA	FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS
FFT	FAST FOURIER TRANSFORM
FSK	FREQUENCY SHIFT KEYING
GSM	GLOBAL SYSTEM FOR MOBILE COMMUNICATIONS
HF	HIGH FREQUENCY
ICNIA	INTEGRATED COMMUNICATIONS, NAVIGATION, IDENTIFICATION AND AVIONICS
IEEE	INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
IF	INTERMEDIATE FREQUENCY
INFOSEC	INFORMATION SECURITY
IST	INFORMATION SOCIETY TECHNOLOGIES
JPO	JOINT PROGRAM OFFICE
JTRS	JOINT TACTICAL RADIO SYSTEM
LAN	LOCAL AREA NETWORK
LMR	LAND MOBILE RADIO
LNA	LOW NOISE AMPLIFIER
LRU	LINE REPLACEABLE UNIT
LSB	LEAST SIGNIFICANT BIT
LUF	LESS USABLE FREQUENCY
MMITS	MODULAR MULTIFUNCTION INFORMATION TRANSFER SYSTEMS
MPSK	M-ARY PHASE SHIFT KEYING
MRSC	MODULAR SOFTWARE DEFINED RADIO CONSORTIUM
MUF	MAXIMUM USABLE FREQUENCY
OMG	OBJECT MANAGEMENT GROUP
OQPSK	OFFSET QUADRATURE PHASE SHIFT KEYING
OTA	OVER-THE-AIR
PMCS	PROGRAMMABLE MODULAR COMMUNICATIONS SYSTEM
QAM	QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION
QDPSK	QUADRATURE DIFFERENTIAL PHASE SHIFT KEYING
RF	RADIO FREQUENCY
SCA	SOFTWARE COMMUNICATIONS ARCHITECTURE
SDR	SOFTWARE DEFINED RADIO
SINGARS	SINGLE CHANNEL GROUND TO AIR RADIO SYSTEM
SNR	SIGNAL-TO-NOISE RATIO
SPECTRA	SIGNAL PROCESSING ENVIRONMENT FOR CONTINUOUS REAL-TIME APPLICATIONS
STANAG	STANDARDIZATION AGREEMENT
TAJPSP	TACTICAL ANTI JAM PROGRAMMABLE SIGNAL PROCESSOR
TRANSEC	TRANSMISSION SECURITY
UHF	ULTRA HIGH FREQUENCY
UNUN	UNBALANCED- UNBALANCED LINE
USB	UNIVERSAL SERIAL BUS
USRP	UNIVERSAL SOFTWARE RADIO PERIPHERAL

VHF	VERY HIGH FREQUENCY
VME	VERSA MODULE EUROPA
WFM	WIDE FREQUENCY MODULATION
WITS	WIRELESS INFORMATION TRANSFER SYSTEM