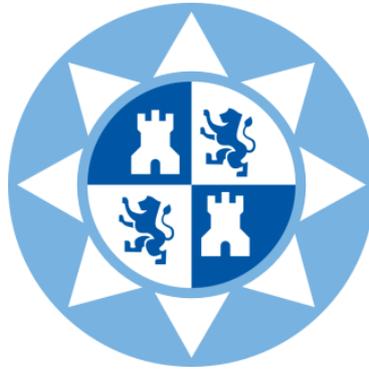


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA DE TELECOMUNICACIÓN
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



Proyecto Final de Carrera

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN DETECTOR DE ENERGÍA PARA
SEÑALES FM WIRELESS MICROPHONE EN RADIO COGNITIVA



AUTOR: María Dolores Cereceda Tobal
DIRECTOR: José María Molina García-Pardo
CODIRECTOR: Andreas Wilzeck
Octubre 2011



Autor	María Dolores Cereceda Tobal
E-mail del Autor	MD.cereceda@gmail.com
Director de la UPCT	José María Molina García-Pardo
E-mail del Director	josemaria.molina@upct.es
Codirector de la Leibniz Universität Hannover	Andreas Wilzeck
E-mail del Director	andreas.wilzeck@ikt.uni-hannover.de
Título del PFC	Diseño y evaluación de un detector de energía para señales FM Wireless Microphone en Radio Cognitiva
<p>Resumen</p> <p>La idea general de la Radio Cognitiva consiste en la utilización de la tecnología para conocer el estado del entorno y poder ajustar dinámica y automáticamente los parámetros y protocolos necesarios para poder llevar a cabo los objetivos definidos. Esto se consigue gracias a la observación del entorno, en este caso, se considerará el espectro radioeléctrico. Esta área de estudio es posible debido a la investigación sobre la detección del espectro disponible o spectrum sensing. Como método más sencillo y eficaz de spectrum sensing, se utiliza el detector de energía.</p> <p>En este proyecto se evalúa la presencia de cinco señales FM Wireless Microphone dentro de un canal de televisión de 8 MHz, zona del espectro infrautilizada. Para ello, se ha diseñado un detector de energía lo más eficiente y exacto posible. Se ha realizado un análisis del detector, en el que se muestran los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones para evaluar su comportamiento.</p>	
Titulación	Ingeniería de Telecomunicación
Departamento	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.
Fecha de Presentación	Octubre-2011

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Andreas Wilzeck, director de este proyecto, por la oportunidad que me ha brindado para realizar este proyecto en el Institut für Kommunikationstechnik en Hannover. También quiero agradecerle el respeto y la paciencia con los que me ha tratado, además de la confianza depositada.

También me gustaría agradecer a mi familia, a mis padres, a mi hermana y mi tía, el gran apoyo mostrado durante toda mi vida y mucho más durante el desarrollo del proyecto. Sin ellos, sin sus palabras, sin cada momento vivido con ellos no sería quien soy, ni tampoco podría serlo. Gracias por darme esto y mucho más.

Gracias a todos los que en estos momentos no estáis conmigo pero habéis estado alguna vez a lo largo de mi vida, porque aunque no podéis disfrutar conmigo de mi situación actual, sé que donde estáis os alegráis por mi cada día.

Gracias a todos los profesores, desde el colegio hasta la universidad, sin vosotras enseñanzas, tanto intelectuales como humanas, esto no hubiera sido posible.

Gracias a todos los amigos que he conocido en Hannover, sitio que durante este año ha sido mi segundo hogar. Sin vosotros esto no hubiera salido adelante. Gracias por vuestro apoyo y dedicación, por transmitirme la fuerza necesaria para llegar al final. Parte de este trabajo es vuestro.

Gracias a todos mis amigos que aunque sean pocos son los mejores, sois como mi familia. Sin nuestras conversaciones, sin nuestros momentos, tanto buenos como malos, sin vuestro apoyo no sería quien soy ahora. A todos ellos gracias.

Finalmente, gracias a ti, Jorge. Por el tiempo que me has dedicado, tanto el que tenías como el que no. Gracias por estar tan cerca de mí en Hannover aunque físicamente estuvieses en Polonia. Gracias por sacarme del hoyo en tantas ocasiones. Gracias por saber que puedo contar contigo. Gracias por aguantar todos mis momentos malos durante todo nuestro camino, en especial durante este año. Sin tu apoyo este proyecto no hubiera tenido fin.

Acabar este proyecto no ha sido una tarea fácil pero sin vuestra ayuda hubiera sido imposible. A todos y cada uno, muchas gracias.

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS:

SÍMBOLOS:

°C: Grados Celsius.
°K: Grados Kelvin.
 α : frecuencia cíclica.
 Λ_E : umbral establecido.
 μ : Micra.
 π : Constante pi (3.141592)
 σ_w : Varianza del ruido.

A:

A_c : Amplitud de la portadora.
AMM: Modo alternativo de monitorización.
ATSC: Comité de Sistemas de Televisión Avanzada.
AWGN: Ruido aditivo, blanco y gaussiano.

B:

B: Ancho de banda.

C:

CNFA: Cuadro Nacional de Atribuciones de Frecuencia.
CFR: Código de Regulación Federal.

D:

d: Distancia.
DARPA: Agencia de Investigación de Proyectos Avanzados de Defensa.
dB: Decibelios
dBm: Decibelios relativos a un mili vatio.
DSP: Procesamiento de una señal digital.

F:

f: Frecuencia central del ancho de banda de la señal de entrada.
 f_c : Frecuencia portadora.
FCC: Comisión federal de comunicaciones.
 f_{cx} : Frecuencia portadora x.
FFT: Transformada rápida de Fourier.
FM: Modulación de frecuencia.
FPGA: Arreglos de compuertas programables en campo.

G:

GHz: Gigahercios.
GNU: GNU no es Unix.

H:

H_0 : Hipótesis nula.
 H_1 : Hipótesis alternativa.

I:

IEEE: Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos.

IMI: Modo inicial de identificación.
ITU: Unión internacional de telecomunicaciones.

K:

k: Constante de Boltzmann ($1.3806503 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$).
 k_f : Sensibilidad de frecuencia del modulador.
KHz: Kilohercios.
Km: Kilómetros.

M:

m: Metro.
M: Decisión métrica.
MHz: Megahercios.

N:

n: Índice de la muestra.
N: Longitud de un vector.
 N_0 : Densidad espectral de potencia del ruido térmico.
NTIA: Administración Nacional de telecomunicaciones e información.

O:

OFCOM: Regulador de las comunicaciones británico.
OODA: Observar, orientar, decidir y actuar.

P:

PU: Usuario Principal.
PathLoss: Pérdidas en el espacio libre.
 P_D : Probabilidad de detección.
 P_{FA} : Probabilidad de falsa alarma.
Prob: Probabilidad clásica.

R:

R&O: Informe y orden.
RC: Radio Cognitiva.
ROC: Características operativas del receptor.
 R_x : Receptor.
 R_y^α : Función de autocorrelación cíclica.

S:

s: Señal detectada.
S: Densidad espectral cíclica.
SDR: Radio definida por software.
SR: Radio Software.
SU: Usuario secundario.

T:

T: Temperatura.
TRUST: Proyecto europeo transparente, ubicuo y terminal.
 T_s : Tiempo de muestreo.
Tx: Transmisor.

W:

w: ruido aditivo, blanco y gaussiano.

WM: Wireless microphones.

WRAN: Red inalámbrica de área regional.

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
2. RADIO COGNITIVA:	4
2.1. RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE:.....	4
2.1.1. <i>Antecedentes:</i>	4
2.1.2. <i>Definición:</i>	4
2.1.3. <i>Características:</i>	5
2.1.4. <i>Arquitectura:</i>	5
2.2. DEFINICIÓN DE RADIO COGNITIVA.....	6
2.3. RELACIÓN ENTRE SDR Y RADIO COGNITIVA.....	8
2.4. CICLO COGNITIVO	9
2.5. CARACTERÍSTICAS DE LA RADIO COGNITIVA.....	11
2.6. APLICACIONES DE LA RADIO COGNITIVA.....	12
3. DETECCIÓN DE ESPECTRO PARA APLICACIONES DE RADIO COGNITIVA.	13
3.1. INTRODUCCIÓN.....	13
3.2. MÉTODOS DE DETECCIÓN DE ESPECTRO PARA RADIO COGNITIVA.....	13
3.2.1. <i>Filtro adaptado</i>	13
3.2.2. <i>Detección basada en la forma de onda.</i>	13
3.2.3. <i>Detección basada en la cicloestacionariedad</i>	14
3.2.4. <i>Detección basada en la radio identificación</i>	15
3.2.5. <i>Detección basada en un detector de energía.</i>	15
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS.	17
4.1. DESCRIPCIÓN DEL DETECTOR DE ENERGÍA.....	17
4.2. DISEÑO DEL DETECTOR DE ENERGÍA PARA SEÑALES WIRELESS MICROPHONES.....	17
4.3. IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO (CÓDIGO MATLAB™).....	18
4.4. ESTUDIO DEL DETECTOR DE ENERGÍA.....	30
4.4.1. <i>Comportamiento del detector de energía ante la variación de distancia entre Emisor y Receptor</i>	30
4.4.2. <i>Comportamiento del detector de energía ante la variación de temperatura.</i>	31
5. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS.	44
5.1. CONCLUSIONES.....	44
5.2. LÍNEAS FUTURAS.....	44
6. FIGURAS.	46
7. REFERENCIAS.	48

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de radiocomunicación ha avanzado mucho durante los últimos años. En la década de los 70's y los 80's se produjo una revolución muy importante. Los sistemas radio pasaron de analógicos a digitales en tecnología hardware, tanto en el control de fuente como en la codificación del canal. A principio de la década del 2000, apareció la siguiente revolución importante, la radio dirigida por Software (SDR), gracias a radioaficionados como Gerard Youngblood [1]. Esta revolución ha extendido los límites existentes en radiocomunicaciones, ya que usando software, se puede controlar muchas funciones de los equipos de radio igual o mejor que los controles del propio equipo hardware.

La aparición de la SDR, ha llevado a cabo la aparición de proyectos como la GNU radio, conjunto de herramientas para el desarrollo de software libre para la implementación de DSP. Al ser software libre, está a disposición de cualquier aficionado, estudiante o institución, lo que conlleva que el espectro de radiofrecuencia pueda ser accesible por todos, incrementando su demanda cada vez más.

Debido al gran desarrollo que ha sufrido el espectro de radio frecuencias, éste se encuentra regulado por los organismos reguladores de cada país, los cuáles realiza una política de asignación fija del mismo. Como ejemplos de dicho organismos, en España se encuentra la CNAF (Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias), en Alemania, "Die Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen", en Reino Unido, la Ofcom (Independent regulator and competition authority for the UK communications industries), en los Estados Unidos, la NTIA (National Telecommunications and Informations Administration), de la cual se muestra la tabla de asignación del espectro de radio frecuencia.

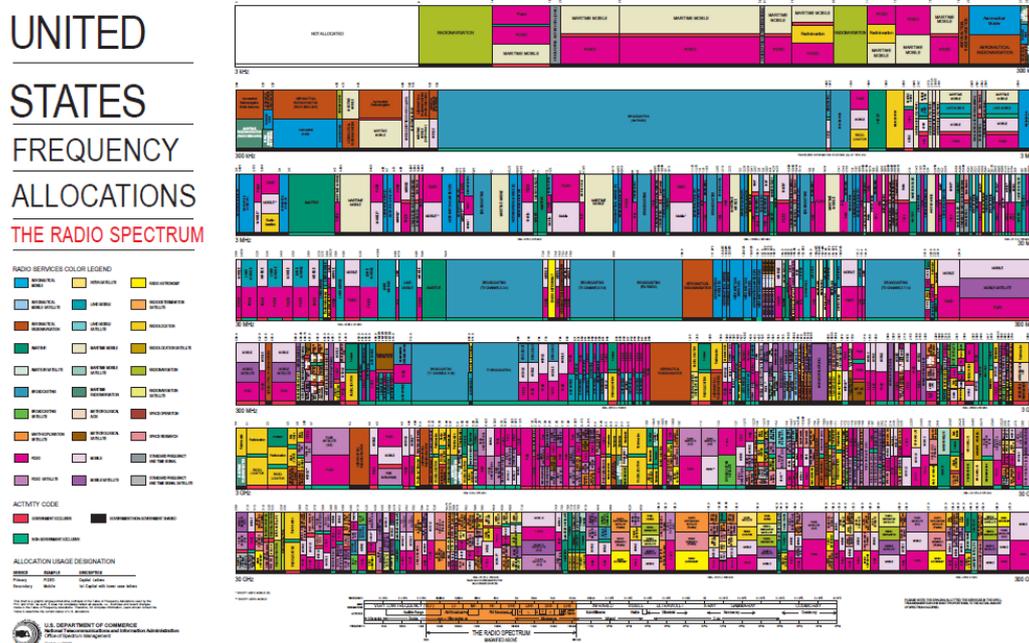


Fig. [1]: Cuadro de asignación de frecuencias del espectro en los Estados Unidos.

Fuente: <http://www.ntia.doc.gov/osmhome/allochrt.pdf>.

Como se puede apreciar en la imagen, el espectro tiene una alta ocupación por lo que resulta difícil encontrar una banda de utilización libre. Pero según las investigaciones de la FCC

(Federal Communications Comissions) [2] muchos de los usuarios, que tiene una banda del espectro asignada con licencia, la tienen altamente utilizada. En contraposición, otros la tienen parcialmente desaprovechada. De hecho, se afirma que la utilización del espectro en las bandas de 0 a 6 GHz varía entre el 15% y el 85%. Por ejemplo, Las bandas de telefonía móvil aprovechan su banda de espectro a diferencia de las bandas de broadcasting, radio amateur y paging. Esto ocasionó que la FCC plantease la apertura de dichas bandas con licencia infrutilizadas a usuarios sin licencia. A partir de ese momento una de las características de la Radio Cognitiva, acceso dinámico al espectro, es decir, adaptabilidad, apareció.

En Noviembre de 2008, la FCC hizo público un informe y ordenó (R&O) permite a los dispositivos sin licencia usar las bandas vacantes (White spaces [3]) en el espectro de televisión (los canales de televisión 5-13 en la banda de VHF y 14-51 en la banda UHF) [4].

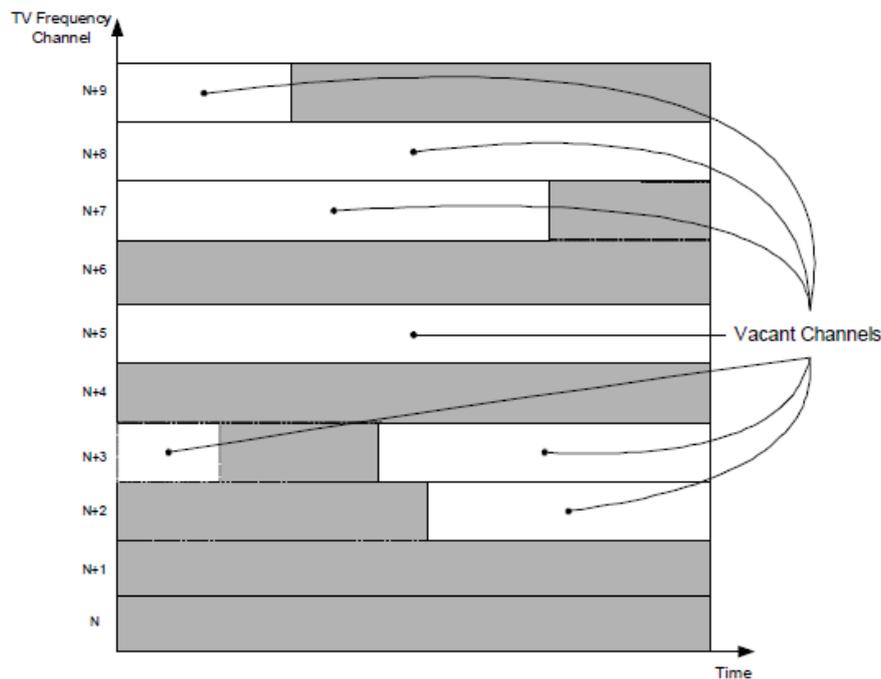


Fig. [2]: Ejemplo de la ocupación de una banda de televisión a través del tiempo y la frecuencia.

Fuente: C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru, N. Sai Shankar, Philips Res., Briarcliff Manor, NY, "IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios", *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 328-337, Baltimore, MD, USA, Nov. 2005.

Tras este R&O, aparece el primer estándar que utiliza tecnología de radio cognitiva para trabajar con los White spaces de televisión, el IEEE 802.22 WRAN. Este estándar tiene como objetivo proporcionar una comunicación empleando frecuencias con licencia a servicios secundarios de televisión de banda ancha sin interferencia entre usuarios. Para evitar dichas interferencias, hay que prestar especial atención a la detección de señales de usuarios primarios. Actualmente, debido a la asignación del espectro, cualquier señal sin licencia o usuario secundario (SU) se ven obligadas a compartir el espectro disponible. Por lo que, debe de evitar la interferencia con los usuarios primarios que tienen prioridad ante ellos. Por este motivo, la capacidad de detectar que señal se recibe en cada momento es importante.

Para una correcta detección, existen diferentes aspectos que hay que tener en cuenta: el nivel de conocimiento de las señales, con prioridad o sin ella, y la potencia de ruido que se reciba. Según el tipo de conocimiento, se tienen tres tipos de detectores. Si la señal transmitida es

conocida, se utiliza el filtro adaptado. Su principal característica es que para conseguir unos datos útiles necesita un periodo de tiempo corto. Como desventajas destacar el alto consumo de potencia, debido al gran número de algoritmos necesarios en la recepción, y la limitación existente al necesitar información sobre la señal a transmitir ya que la Radio Cognitiva necesita detectar todo tipo de señales. Cuando las señales presenta un tipo de periodicidad, es conveniente utilizar el método de detección mediante procesos cicloestacionarios ya que estos procesos ofrecen una media y una autocorrelación con una cierta periodicidad. Pero el detector más común, que es objeto de este proyecto, es el detector de energía. Este método no necesita conocer características de la señal transmitida ya que al procesar la señal, el detector la compara con un umbral de detección subordinado a las características del ruido. Destacar de este método su robustez ante las variaciones de la señal detectada. Como desventaja, un detector de energía no puede distinguir señales de otras señales e interferencias.

En este proyecto, se ha desarrollado la implementación de un detector de energía señales Wireless Microphones (WM) en un canal de televisión. WM son dispositivos de corto alcance que operan bajo unas bases de no protección y no interferencia. Dependiendo de las reglas de cada nación, WM son considerados como usuarios de espectro con o sin licencia. Cabe destacar que en países como los Estados Unidos, la señales WM se consideran como usuarios de baja potencia sin licencia o secundarios en una banda de televisión. Además están reguladas por las reglas de la FCC para Radio Broadcast en Título 47 Código de Regulación federal (CFR), Parte 74 (47cfr74).

2. RADIO COGNITIVA:

2.1. RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE:

2.1.1. Antecedentes:

El mundo de la tecnología radio ha evolucionado mucho durante los últimos años, desde el nacimiento de la telegrafía en 1830 por Morse, pasando por los adelantos sufridos por la tecnología wireless a partir de 1902, gracias a Marconi y Tesla, hasta llegar a la actualidad con la Radio definida por Software.

La esencia de los bloques utilizados para la tecnología radio no han cambiado en este siglo. Se sigue necesitando una antena, una amplificación de la potencia transmitida, una conversión de Radiofrecuencia en recepción, un modulación/demodulación (modem) y un codificación/decodificación (codec); mismas necesidades pero con una cierta evolución. Una de las evoluciones más importantes ha sido la creación de la Radio definida por Software donde los parámetros de las necesidades anteriores pueden ser cambiados dependiendo del entorno radio, de la situación de los usuarios, de la situación de la red, etc.

De 1990 a 1995, DARPA demostró SPEAKeasy I, la primera SRD, con radio frecuencia continua desde 2 MHz a 2 GHz en sólo tres bandas analógicas: HF (2–30 MHz), banda media (30–500 MHz) y banda alta (0.5–2 GHz) [5].

La tecnología MICRO Electro-Mechanical Systems (MEMS) reprogramó los componentes de radio frecuencia analógicos a digitales para llevar a cabo la SDR SPEAKeasy I. Esta SDR generó la idea de una radio más flexible, evitando el uso de aplicaciones y componentes fijos analógicos.

Esta primera idea de SDR siguió evolucionando hasta llegar a lo que hoy conocemos como Radio Cognitiva.

2.1.2. Definición:

El término SR (Software Radio) se refiere a todos aquellos equipos que, con un elemento hardware, pueden realizar en distintos instantes de tiempo diferentes funciones con sólo variar la configuración mediante software. Esta definición fue generada por Joseph Mitola III:

“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 unconverted 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, down converts and demodulates the channel waveform using software on a general purpose processor” [6]

Actualmente no es posible implementar un equipo SR ideal debido al estado de la tecnología. Por este hecho, se han creado los equipos SDR que se consideran una versión SR implementable.

Se pueden encontrar un gran número de definiciones para describir la radio definida por software pero la definición general fue desarrollada por el Forum de innovación Wireless junto al Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE). Esta definición es la siguiente:

“Radio en la cual algunas o todas funciones de la capa física son definidas por software” [7]

La radio definida por software elimina problemas existentes en la tecnología anterior (hardware) como el alto coste de producción y la poca flexibilidad ante diferentes formas de onda.

Algunos dispositivos que utilizan radio definida por Software son field programmable gate arrays (FPGA), procesado de señal digital (DSP) and Sistema programable on Chip (SoC).

2.1.3. Características:

- Reconfigurabilidad: SDR permite la coexistencia de múltiples módulos software implementados con diferentes estándares en el mismo sistema que permite la configuración dinámica del sistema con tan solo seleccionar el módulo de software correspondiente para ejecutar.
- Conectividad Ubicua: SDR permite la implementación de estándares de interferencia de aire como módulos software y múltiples instancia de estos módulos que implementan diferentes estándares pueden coexistir en el equipo de infraestructura y los terminales.
- Interoperabilidad: SDR facilita la implementación de la arquitectura abierta de sistemas radio.[8]

2.1.4. Arquitectura:

Un posible diagrama de bloques de una SDR es el siguiente:

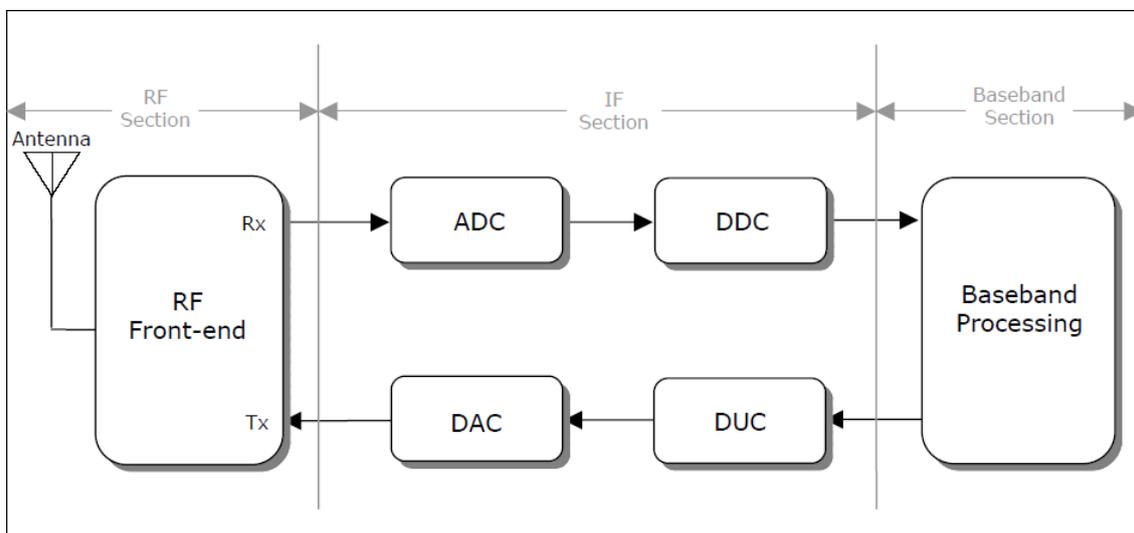


Fig. [3]: Diagrama de bloques de una SDR.

Fuente: Wipro technology

<http://www.broadcastpapers.com/whitepapers/WiproSDRadio.pdf?CFID=21641525&CFTOKEN=8a40b0992d28a1b2-DA5CFA3B-BA4B-0FDA-98280E8307D8724F>, Agosto 2002.

La sección RF es la responsable de adaptar la señal. En recepción la señal de radio frecuencia es transformada a una señal de frecuencia intermedia. En transmisión, la señal analógica es transformada y amplificada.

En la sección IF, los bloques ADC transforman la señal analógica en digital y los bloques DAC transforman la señal digital en analógica. En recepción, los bloques DDC realizan una digital-down-conversion (demodulación), en transmisión, los bloques DUC realizan una digital-up-conversion (modulación). Estos dos últimos bloques son programables. En lugar de utilizar IF, una aproximación de zero-IF puede ser elegida, la RF front-end realiza una conversión descendente directa a banda base.

La sección de banda base realiza operaciones en banda base e implementa, mediante software, el protocolo de la capa de enlace.

2.2. DEFINICIÓN DE RADIO COGNITIVA.

La definición de Radio cognitiva no es trivial, ya que al necesitar una eficacia muy elevada, se ha creado una cierta discusión entre investigadores y organismos oficiales. Esto es debido a que muchos investigadores consideran necesario un gran control en la Radio Software (SR) a diferencia de otros que dudan de esa necesidad. A continuación se van a mencionar algunas de las definiciones más relevantes.

En 1999, el término Radio Cognitiva fue acuñado en la tesis doctoral “Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio” [9]. El responsable de dicha tesis fue Joseph Mitola. La definición dada por Mitola fue:

“A radio that employs model based reasoning to achieve a specified level of competence in radio-related domains.”

Debido a la reciente popularidad de dicha tesis, se ha ido investigando sobre el estado de la Radio Cognitiva y surgiendo otras definiciones tales como la de Simon Haykin [10]:

“An intelligent wireless communication system that is aware of its surrounding environment (i.e., outside world), and uses the methodology of understanding-by-building to learn from the environment and adapt its internal states to statistical variations in the incoming RF stimuli by making corresponding changes in certain operating parameters (e.g., transmit-power, carrier frequency, and modulation strategy) in real-time, with two primary objectives in mind:

- *highly reliable communications whenever and wherever needed;*
- *efficient utilization of the radio spectrum.”*

Los organismos reguladores, centrados en el funcionamiento de los transmisores, también aportaron definiciones. Se puede destacar a la FCC [11], su definición fue:

“A radio that can change its transmitter parameters based on interaction with the environment in which it operates.”

Otro organismo regulador en los Estados Unidos es la NTIA. Este organismo regulador dio una definición de la Radio Cognitiva basándose en sus aplicaciones [12]:

“A radio or system that senses its operational electromagnetic environment and can dynamically and autonomously adjust its radio operating parameters to modify system operation, such as maximize throughput, mitigate interference, facilitate interoperability, and access secondary markets.”

El organismo de regulación del espectro a nivel internacional, ITU, ofrece una definición de Radio Cognitiva basada en sus capacidades [13]:

“A radio or system that senses and is aware of its operational environment and can dynamically and autonomously adjust its radio operating parameters accordingly.”

IEEE USA ofreció esta definición [14]:

“A radio frequency transmitter/receiver that is designed to intelligently detect whether a particular segment of the radio spectrum is currently in use, and to jump into (and out of, as necessary) the temporarily-unused spectrum very rapidly, without interfering with the transmissions of other authorized users.”

El grupo de trabajo IEEE 1900.1 realizó la siguiente definición [15]:

“A type of radio that can sense and autonomously reason about its environment and adapt accordingly. This radio could employ knowledge representation, automated reasoning and machine learning mechanisms in establishing, conducting, or terminating communication or networking functions with other radios. Cognitive radios can be trained to dynamically and autonomously adjust its operating parameters.”

De la misma manera, el Fórum SDR colabora con los esfuerzos de la FCC para encontrar una definición de Radio Cognitiva. Para ello, el Fórum SDR ha creado dos grupos de trabajo. Uno de los grupos, llamado Cognitive Radio Working Group y centrado en el lado más tecnológico, utiliza esta definición:

“A radio that has, in some sense, (1) awareness of changes in its environment and (2) in response to these changes adapts its operating characteristics in some way to improve its performance or to minimize a loss in performance.”

El otro grupo del Fórum SDR, llamado Special Interest Group for Cognitive Radio y centrado en el desarrollo de aplicaciones para la Radio Cognitiva, utiliza esta definición:

“An adaptive, multi-dimensionally aware, autonomous radio (system) that learns from its experiences to reason, plan, and decide future actions to meet user needs.”

El grupo de trabajo Virginia Tech Cognitive Radio ha adoptado la siguiente definición [16]:

“An adaptive radio that is capable of the following:

- a) awareness of its environment and its own capabilities,*
- b) goal driven autonomous operation,*
- c) understanding or learning how its actions impact its goal,*
- d) recalling and correlating past actions, environments, and performance.”*

En Septiembre de 2009, el sector de Radiocomunicación de la ITU desarrolló una definición para los sistemas de Radio Cognitiva [17]:

“Cognitive radio system (CRS): A radio system employing technology that allows the system to obtain knowledge of its operational and geographical environment, established policies and its internal state; to dynamically and autonomously adjust its operational parameters and

protocols according to its obtained knowledge in order to achieve predefined objectives; and to learn from the results obtained"

Como se puede observar, existe un gran número de definiciones para Radio Cognitiva, dependiendo de su utilidad y de su autor. Mirando las funcionalidades de todas y cada una de las definiciones anteriores, se pueden observar una serie de similitudes. Una de ellas es que la cognición será implementada como un proceso de control dentro de una radio definida por software. Otra similitud es cierta capacidad de funcionamiento autónomo. Algunas capacidades generales encontradas sobre la Radio Cognitiva son:

- Observación: Adquisición de información del entorno.
- Adaptabilidad: capaz de cambiar parámetros según el entorno.
- Inteligencia: Uso de información para llegar a un objetivo.

2.3. RELACIÓN ENTRE SDR Y RADIO COGNITIVA.

Como ya se ha dicho anteriormente, la Radio Cognitiva es capaz de cambiar sus parámetros radio (frecuencia, ancho de banda, potencia,...) dependiendo del entorno, de la geolocalización, del estado de la red, etc. SDR puede proporcionar esa adaptabilidad, eliminando el uso de aplicaciones y componentes fijos. Además, la Radio Cognitiva necesita ser diseñada en base a un SDR. Como se indicó en la sección de definición de Radio Cognitiva, "A cognitive radio is an SDR that senses and is aware of its operational environment and can dynamically and autonomously adjust its radio operating parameters accordingly to achieve designated objectives ". A continuación, se muestra un modelo simple de la relación entre la Radio Cognitiva y una SDR.

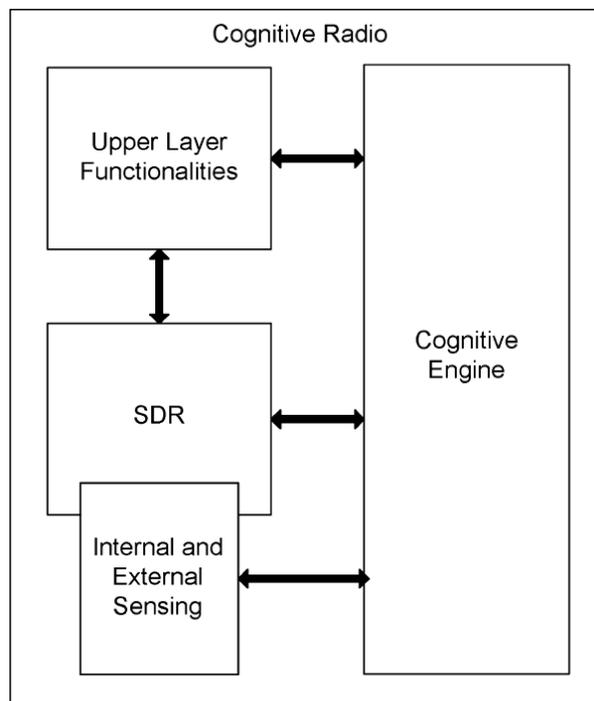


Fig. [4]: Relación entre SDR y Radio Cognitiva.

Fuente: Hüseyin Arslan and Hasari Celebi, "Capítulo 4: Software Defined Radio Architectures for Cognitive Radios", Libro "Cognitive Radio, Software Defined Radio and Adaptive Wireless Systems", ISBN 978-1-4020-5541-6(HB), 2007.

Este modelo se ajusta a la perfección al modelo de Radio Cognitiva ya que se observa la combinación entre la máquina cognitiva, SDR y funcionalidades adicionales. La máquina cognitiva, utilizando parámetros del exterior como el estado del entorno y la red y conociendo los recursos y la capacidad del hardware radio, es capaz de controlar y optimizar la SDR. SDR puede soportar diferentes estándares y tecnologías de acceso múltiple. SDR es capaz de operar con amplios rangos de frecuencias dentro de diferentes anchos de banda y con diferentes modulaciones y formas de onda. En otras palabras, partes de la SDR pueden ser consideradas como un pequeño analizador de espectros el cuál aporta información a la máquina cognitiva acerca del espectro.

2.4. CICLO COGNITIVO.

Según Joseph Mitola III [9], los niveles de funcionalidad de la radio cognitiva van incrementando desde una radio software hasta una compleja radio auto-consciente. Los diferentes niveles se muestran en la siguiente tabla:

Level	Capability	Task Characteristics	Comments
0	Pre-programmed	The Radio has no model-based reasoning capability.	A software radio.
1	Goal Driven	Goal-driven choice of RF band, air interface and protocol.	Chooses waveform according to goal. Requires environment awareness.
2	Context Awareness	Infers external communications context (minimum user involvement)	Knowledge of what the user is trying to do.
3	Radio Aware	Flexible reasoning about internal and network architectures.	Knowledge of radio and network components, environment and models.
4	Capable of Planning	Reasons over goals as a function of time, space and context.	Analyze situation (Level 2& 3) to determine goals (QoS, power), follows prescribed plans
5	Conducts Negotiations	Expresses arguments for plans/alternatives to user, peers and networks.	Settle on a plan with another radio
6	Learns Environment	Autonomously determines the structure of the environments.	Autonomously determines structure of environment
7	Adapts Plans	Autonomously modifies plan as learned fluent change.	Generates new goals
8	Adapts Protocols	Autonomously proposes and negotiates new protocols	Proposes and negotiates new protocols

Fig. [5]: Tabla sobre los niveles de funcionalidad de la Radio Cognitiva.

Fuente: información procedente de James O'Daniell Neel, "Analysis and Design of Cognitive Radio Networks and Distributed Radio Resource Management Algorithms", Septiembre 2006.

El nivel 0 es un sistema software radio. El nivel 1 elige los parámetros radios necesarios para lograr el objetivo, necesita cierto conocimiento del entorno. En el nivel 2 se tiene un conocimiento de lo que el usuario intenta hacer. En el nivel 3 se tiene un cierto conocimiento acerca de los componentes de la red, así como, del entorno y los modelos. En el nivel 4 se analiza la situación, es decir, se estudian los niveles 2 y 3 para determinar el objetivo, siguiendo los planes recomendados. En el nivel 5 se decide por un plan con otro dispositivo radio. En el nivel 6 de forma automática se determina la estructura del entorno. En el nivel 6 se generan nuevos objetivos. En el nivel 7, último nivel, se proponen y negocian nuevos protocolos. Estos tres últimos niveles asumen la mayor parte de la inteligencia del sistema.

Para comprender la forma en la que una Radio Cognitiva consigue estos niveles de funcionalidad, Joseph Mitola III introdujo el ciclo cognitivo siguiente.

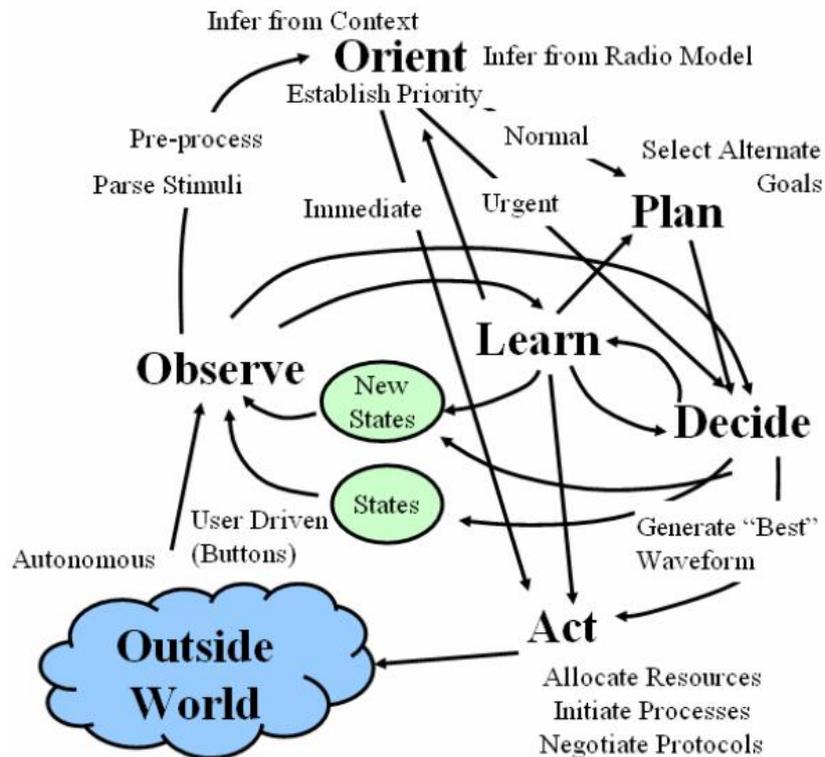


Fig. [6]: Ciclo Cognitivo.

Fuente: James O'Daniell Neel, "Analysis and Design of Cognitive Radio Networks and Distributed Radio Resource Management Algorithms", Septiembre 2006.

En el ciclo cognitivo, la información se obtiene por la observación (Observe) de un entorno operacional (Outside World) o mediante algún tipo de señalización (User Driven). Esta información es evaluada para determinar el grado de importancia: Normal, Urgente o inmediata (Orient). Una vez hecha la valoración, si la información es normal, la radio precisa sus opciones (Plan) y elige la opción más acertada siguiendo los criterios tomados (Decide). Una vez elegida la mejor opción (generate "Best" Waveform), ésta es desarrollada por el sistema adaptándose a los recursos disponibles (Act) y forma la señal adecuada. Este cambio se ve reflejado en el mundo exterior (Outside world) debido a la influencia de la Radio Cognitiva. Además, el sistema tiende a mejorar ya que tiene en cuenta todas las observaciones y decisiones que se han tomado en el ciclo (Learn), cambiando estados existentes (States), generando nuevos estados (New State) o definiendo nuevos criterios para elegir la opción más adecuada.

Este ciclo cognitivo completo resulta muy costoso y la tecnología actual no está preparada para llevar a cabo la parte de la inteligencia del sistema. En el caso del espectro, el ciclo cognitivo se reduce bastante ya que se centra en las fases de Observación, Orientación, Decisión y Actuación (OODA). Este ciclo cognitivo simplificado es capaz de interactuar en tiempo real con el entorno determinando y adaptar los parámetros de la comunicación.

- *Observación:*

En esta primera fase, se detecta y percibe el entorno radio. Gracias a esto, se localizan las bandas libres en el espectro, por lo que, se pueden seleccionar los parámetros adecuados para una correcta y óptima transmisión, sin interferencias con otros usuarios. En esta fase se realiza la detección del espectro.

- *Orientación:*

En esta fase, se analizan las bandas libres de frecuencias detectadas, es decir, los agujeros en el espectro. De estas bandas se extraen el valor de parámetros de transmisión como la velocidad de datos, el tipo de modulación y el ancho de banda.

- *Decisión:*

En esta fase, tras conocer el resultado de las dos fases anteriores, se elige la banda libre que más se ajusta a los parámetros del usuario para llevar a cabo la transmisión con éxito.

- *Actuación:*

En esta fase, se lleva a cabo la transmisión. Debido a que el entorno es cambiante, el sistema debe estar preparado para actuar ante cualquier situación. Por entorno cambiante se refiere al hecho de la aparición de un usuario con mayor prioridad de transmisión o por la indisponibilidad del canal.

2.5. CARACTERÍSTICAS DE LA RADIO COGNITIVA.

Las características de una Radio Cognitiva básica son:

- *Detección del espectro de frecuencias radioeléctricas en el entorno:*

La Radio Cognitiva es capaz de detectar medidas como la frecuencia utilizada, cuándo se utiliza dicha frecuencia, la situación del transmisor y el receptor y la modulación de la señal utilizada. La información extraída del entorno se utiliza para la configuración radio.

- *Política y configuración de los datos base:*

La Radio Cognitiva deber establecer políticas de cómo puede actuar la radio, de qué limitaciones físicas tiene la radio a la hora de actuar o cómo acceder a través de la red. Dichas políticas podrían especificar que frecuencias deben ser utilizadas en las diferentes ubicaciones.

- *Autoconfiguración:*

Cada uno de los módulos de la Radio Cognitiva deben ser auto-descritos, por lo que, ante un entorno cambiante, la Radio automáticamente configura los módulos para el correcto funcionamiento.

- *Algoritmos adaptativos:*

Mientras la Radio Cognitiva está detectando el entorno, negocia para realizar la mejor utilización de espectro y conocer la demanda de los usuarios y poder ajustarse a la situación.

- *Colaboración distribuida:*

La Radio Cognitiva comparte, con el resto, información actualizada de su entorno local, de su rendimiento y de su demanda de usuarios. Con el conocimiento de su propia información y la de los demás puede optimizar sus operaciones.

- *Seguridad:*

La Radio Cognitiva será capaz de unirse y dejar una red inalámbrica sin ningún tipo de problema.

2.6. APLICACIONES DE LA RADIO COGNITIVA.

A continuación se presentan ciertas aplicaciones de la Radio Cognitiva:

- *Red Alquilada:*

La red primaria proporciona una red “alquilada” ya que permite que usuarios de una Radio Cognitiva sin licencia puedan acceder a la red de una manera oportunista sin perjudicar a los usuarios principales.

- *Red Cognitiva de malla:*

Para la conectividad de banda ancha, las redes de malla se están convirtiendo en una opción bastante rentable. El problema es que las redes de malla necesitan una alta capacidad para cumplir los requisitos de las aplicaciones con alto rendimiento. Por lo que, la Radio Cognitiva es una buena opción para las redes de malla ya que ofrece un ancho de banda de gran potencial y mejora la adaptabilidad en la capa de red y enlace.

- *Red de emergencia:*

En situación de difícil cobertura en la que las redes primarias no se encuentran disponibles, sus bandas del espectro pueden ser utilizados por otros usuarios, de ahí, la utilización de Radio Cognitiva. Las redes de Radio Cognitiva pueden establecer una comunicación sin necesidad de una estructura, gracias a las habilidades del modo ad hoc, teniendo en cuenta la prioridad y el tiempo.

- *Red militar:*

La radio militar necesita elegir la frecuencia intermedia del ancho de banda, el tipo de modulación y el tipo de codificación dependiendo del entorno en el campo de batalla. Gracias a la Radio Cognitiva, la selección de los parámetros anteriores es más sencilla.

3. DETECCIÓN DE ESPECTRO PARA APLICACIONES DE RADIO COGNITIVA.

3.1. INTRODUCCIÓN.

La detección del espectro es una de las acciones más importantes para la implantación de la Radio Cognitiva. La detección de espectro tiene conocimiento acerca del nivel de interferencia o sobre la existencia de usuarios primarios. Además de estas capacidades anteriores, la detección de espectro debe ser capaz de detectar que tipo de señales están ocupando el espectro y que características tienen (tipo de modulación, ancho de banda, frecuencia portadora, forma de onda...). Debido a este alto nivel de conocimiento, la detección de espectro para Radio Cognitiva requiere un alto coste computacional.

Se debe tener en cuenta que en el espacio libre existe ruido además a veces existen interferencias debidas a la temperatura y otros agentes, por lo que la detección del espectro se complica más aún. Además de estos dos problemas, se debe tener en cuenta la posibilidad de no ser capaz de detectar una transmisión de un usuario primario en curso por:

- Interferencias de los dispositivos de Radio Cognitiva.
- La ancha distribución de frecuencias del usuario primario a diferencia del ancho de banda disponible.
- Un corto periodo de detección.

3.2. MÉTODOS DE DETECCIÓN DE ESPECTRO PARA RADIO COGNITIVA.

En este apartado, se va a describir las técnicas más comunes para la detección del espectro con Radio cognitiva.

3.2.1. Filtro adaptado.

Este método de detección es el más óptimo para la detección de usuarios primarios siempre y cuando se conozca la señal transmitida. La principal ventaja de este método es el corto tiempo que necesita para ser consciente si se ha realiza una detección incorrecta o no se haya detectado la señal que debía de haber sido detectada.

El filtro adaptado necesita la demodulación de la señal del usuario primario, por ello, necesita la Radio Cognitiva ya que está tiene un conocimiento *a priori* de la señal (modulación y orden, tipo de pulso, formato de los paquetes...). Pero esta característica es demasiado difícil de implementar debido a que la Radio Cognitiva necesita la recepción de cualquier tipo de señal, esto también conlleva un gran gasto de potencia ya que se necesitan un gran número de receptores.

3.2.2. Detección basada en la forma de onda.

Este método es utilizado únicamente con patrones de señal conocido. Un patrón conocido se utiliza para ayudar a la sincronización de sistemas inalámbricos. Este método de detección tiene una fiabilidad muy alta, un tiempo de medida corto y un tiempo de convergencia mejor que otros métodos de detección. Además cuanto más longitud tiene el patrón de la señal conocida mayor rendimiento tiene este método. La detección métrica viene dada por la siguiente expresión:

$$M = \sum_{n=1}^N |s(n)|^2 + \text{Re} \left[\sum_{n=1}^N w(n)s^*(n) \right]. \quad (3.1)$$

donde

s: señal que debe ser detectada.

w: Ruido AWGN (aditivo, blanco y gaussiano).

n: índice de la muestra.

N: longitud del patrón conocido.

La decisión sobre la existencia de una señal de usuario primario se realiza mediante la comparación de M con un valor umbral λ_w y las siguientes hipótesis:

$$H_0: y(n) = w(n), \quad (3.2)$$

$$H_1: y(n) = s(n) + w(n).$$

Si el valor de M es menor que el umbral se elige la hipótesis nula, por el contrario, si el valor de M es mayor se elige la hipótesis alternativa.

3.2.3. Detección basada en la cicloestacionariedad.

La periodicidad es una característica que poseen las señales, la cuál puede ser utilizada por el receptor para la estimación de parámetros de una señal aleatoria junto con un antecedente de ruido.

Las señales cicloestacionarias presentan una correlación entre las componentes espectrales muy distantes entre sí debido a la redundancia espectral causada por la periodicidad o por sus características estadísticas como la media y la autocorrelación. La función de correlación cíclica se usa para detectar señales presentes dentro de un espectro. El algoritmo de detección basado en la cicloestacionariedad se muestra en el siguiente esquema:

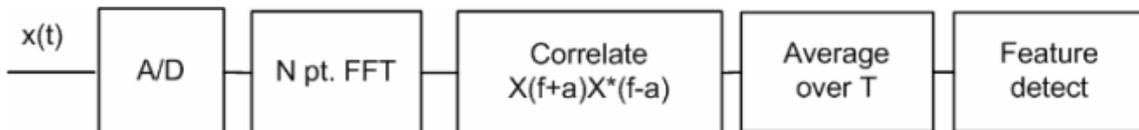


Fig. [7]: Implementación del detector basado en la cicloestacionariedad.

Fuente: Danijela Cabric, Shridhar Mubaraq Mishra, Robert W. Brodersen, "Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios", "Signals, Systems and Computers, 2004. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on", Noviembre 2004.

Este algoritmo de detección es capaz de diferenciar entre ruido, señal de usuario secundario y señal del usuario primario, ya que la señal de ruido es estacionario en sentido amplio pero sin correlación, mientras que las señales moduladas son cicloestacionarias con correlación espectral debido a la redundancia de la periodicidad de la señal.

La función de densidad espectral cíclica de la señal recibida es:

$$S(f, \alpha) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R_y^\alpha(\tau) e^{-j2\pi f \tau} \quad (3.3)$$

donde

$$R_y^\alpha(\tau) = E[y(n + \tau)y^*(n - \tau)e^{j2\pi\alpha n}] \quad (3.4)$$

R_y^α : Función de Autocorrelación cíclica.

α : Frecuencia cíclica.

La función de densidad espectral cíclica proporciona valores de salida cuando la frecuencia cíclica es igual a los valores de frecuencia que tiene la señal transmitida. Estas frecuencias cíclicas son conocidas previamente ya que los organismos reguladores tienen conocimiento de dichas frecuencias y sus principales parámetros, asignados en los estándares inalámbricos. Estos organismos reguladores son los responsables de la asignación de frecuencia.

3.2.4. *Detección basada en la radio identificación.*

Para conocer las características del espectro con una gran fiabilidad, la mejor técnica es la identificación de tecnología de las señales transmitidas. Gracias a este conocimiento, la Radio Cognitiva consigue una mayor precisión. La extracción de las características y la clasificación de las técnicas se realizan en el contexto del proyecto europeo transparente ubicuo y terminal (TRUST) [18]. El objetivo es identificar la presencia de conocidas tecnologías de transmisión y conseguir establecer una buena comunicación. Las dos tareas principales son: el modo inicial de identificación (IMI) y el modo alternativo de monitorización (AMM). En IMI, el dispositivo cognitivo busca una red para poder realizar la transmisión. El modo AMM, mientras el dispositivo radio está realizando una comunicación con un modo, monitoriza otros modos existentes.

3.2.5. *Detección basada en un detector de energía.*

El detector de energía es el detector de espectro más utilizado debido a su baja complejidad computacional. Este detector solamente necesita conocer el ancho de banda y la frecuencia portadora de la señal transmitida para poder funcionar. A continuación, se presenta la implementación de un detector de energía:

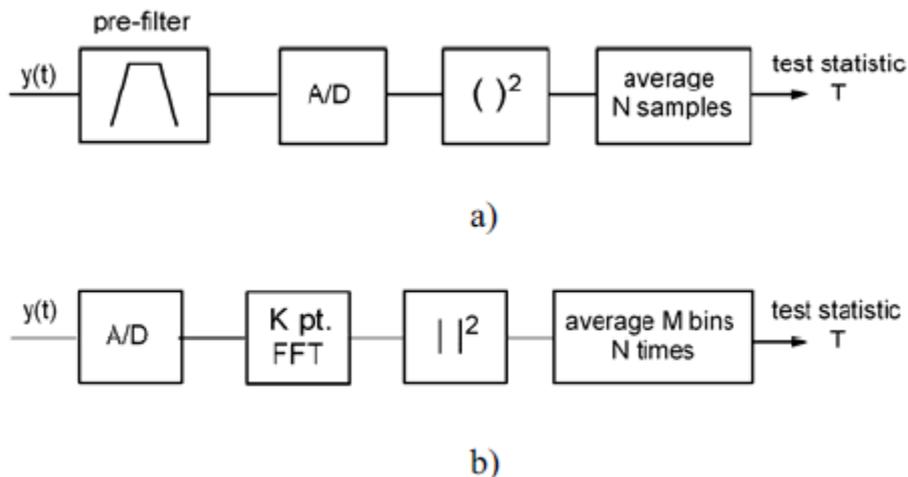


Fig. [8]: a) Implementación del detector de energía en el dominio del tiempo b) implementación del detector de energía en el dominio de la frecuencia.

Fuente: D. Cabric, A. Tkachenko, R.W. Brodersen, Berkeley Wireless Res. Center, Univ. of California, Berkeley, CA, "Military Communications Conference, 2006. MILCOM 2006. IEEE", Octubre 2006

En el dominio de la frecuencia, la señal de entrada $y(t)$ es transformada de Analógico a Digital, seguidamente, la señal es cuadrada e integrada dentro del tiempo de observación.

Finalmente, el valor resultante es comparado con el umbral y dependiendo del resultado, será detectada la señal. Este umbral es establecido dependiendo del nivel del ruido.

Seguidamente, se va a realizar una breve explicación del algoritmo de dicho detector. La expresión de la señal recibida en el detector es:

$$x(n) = s(n) + v(n) \quad (3.5)$$

Donde $s(n)$ es la señal transmitida, $v(n)$ es el ruido AWGN (Aditivo, blanco y gaussiano) y n es el índice de la muestra.

Para la toma de decisión se utiliza dos hipótesis, H_0 , hipótesis nula, si se decide por esta hipótesis la señal transmitida está ausente, por lo que, sólo se tendría ruido. La otra hipótesis es H_1 , hipótesis alternativa, en el caso de elegir esta hipótesis, se detectaría la señal transmitida junto con el ruido. Para resumir lo anteriormente escrito podemos expresarlo de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} H_0: x(n) &= v(n), s(n) = 0, \\ H_1: x(n) &= s(n) + v(n), n = 1, 2, 3, \dots, N. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Donde N es el tamaño del vector de observación. Tras atravesar cada uno de los bloques que forma el detector y llegar a realizar el test estadístico, donde es comparada con el umbral, la expresión de la señal es:

$$M = \sum_{n=0}^N |y(n)|^2. \quad (3.7)$$

Por lo tanto, M , la medida de la decisión y λ_E , el umbral fijado, determinan la ocupación del canal. Gracias a dos tipos de probabilidades, la probabilidad de detección, P_D , y la probabilidad de falsa alarma, P_{FA} , se caracteriza mejor el estado del canal. P_D , la probabilidad de detección, es la probabilidad de detectar la señal transmitida en el canal a la frecuencia determinada. De este modo, la probabilidad de detección puede ser expresada como:

$$P_D = P(M > \lambda_E | H_1). \quad (3.8)$$

Como se puede observar, la probabilidad de detección es la probabilidad condicionada de que siempre que se detecte algo, es decir, se decida por la hipótesis H_1 , la señal esté presente realmente.

Para la probabilidad de falsa alarma, P_{FA} , es la probabilidad de que el detector indique que se ha detectado algo cuando la señal no está presente. La expresión que indica lo anterior es:

$$P_{FA} = P(M > \lambda_E | H_0). \quad (3.9)$$

A la hora de optimizar el detector se debe intentar que la probabilidad de falsa alarma sea lo más pequeña posible para evitar el descenso de las posibilidades de transmisión. El umbral de decisión puede ser establecido si realizamos un balance entre la probabilidad de detección y la de falsa alarma.

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL DETECTOR DE ENERGÍA.

El objetivo de este detector de energía consiste en la capacidad del mismo para poder distinguir señales WM, señales con licencia de usuario secundario, dentro de un canal de televisión. Para ello, se han generado varias señales WM. Las señales WM, con un ancho de banda inferior a 200 KHz, se han caracterizado como señales FM [19]:

$$s(t) = A_c \cos \left[2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right] \quad (4.1)$$

donde

A_c : amplitud de la señal.

f_c : frecuencia portadora.

k_f : sensibilidad de frecuencia del modulador.

De acuerdo con la aproximación en [19], se van a generar cuatro situaciones distintas: no señal, silencio, voz baja y voz alta.

El problema de las señales WM es que no tiene una característica clara de identificación, además, en una canal de televisión pueden existir varias señales WM con una separación que no está definida claramente. Por lo que, al no tener una característica clara de detección, se utiliza el detector de energía.

4.2. DISEÑO DEL DETECTOR DE ENERGÍA PARA SEÑALES WIRELESS MICROPHONES.

El diseño por bloques del detector de energía para señales WM es el siguiente:

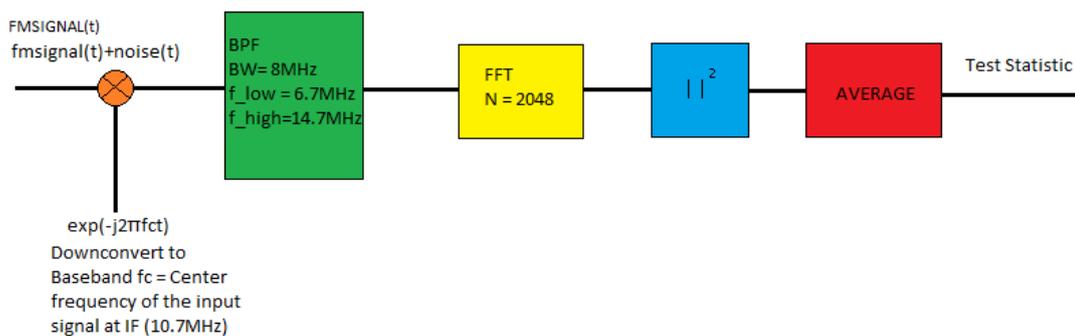


Fig. [9]: Diagrama de bloques del detector de energía para WM.

A continuación, se va a explicar el funcionamiento de cada uno de los bloques.

Inicialmente se tiene la entrada de una señal FM junto con el ruido añadido. Esta señal es multiplicada por una exponencial de $-j2\pi f_c t$ donde f_c es la frecuencia central de la señal de entrada, en este caso, es 10.7MHz. Este paso se realiza para llevar a la señal a un rango de frecuencias, con el cuál, la señal puede ser procesada.

Posteriormente, la señal resultante es filtrada por un filtro paso banda de ancho de banda 8 MHz, el mismo ancho que el canal de televisión, para ajustar la señal a las limitaciones

existentes. La frecuencia inferior y la superior del filtro se han seleccionado a partir del valor de la frecuencia intermedia para una señal WM (10.7MHz). Con este paso se consigue una mayor selección de la señal ya que reduce el ancho del ruido recibido.

Seguidamente, la señal se discretiza con un conversor Analógico/Digital realizando una transformada rápida de Fourier (FFT) en una total de 2048 muestras. Este paso se realiza para poder tener un número de muestras finito de la señal y así poder trabajar con ella de una manera más fácil.

A continuación, las muestras resultantes de la FFT son pasadas por el modulo cuadrado para tomar una idea sobre la potencia relativa de cada componente espectral, su representación es el espectro de potencia.

Posteriormente, se calcula el valor de la potencia de la señal, gracias a los valores de potencia resultantes del módulo anterior.

Para finalizar, con el valor de potencia anterior y el umbral establecido en función del ruido, el detector, gracias a la hipótesis nula y a la hipótesis alternativa, es capaz de detectar la presencia o la ausencia de las señales WM.

4.3. IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO (CÓDIGO MATLAB™).

En esta sección se va a exponer y explicar el código Matlab™ realizado para diseñar el detector.

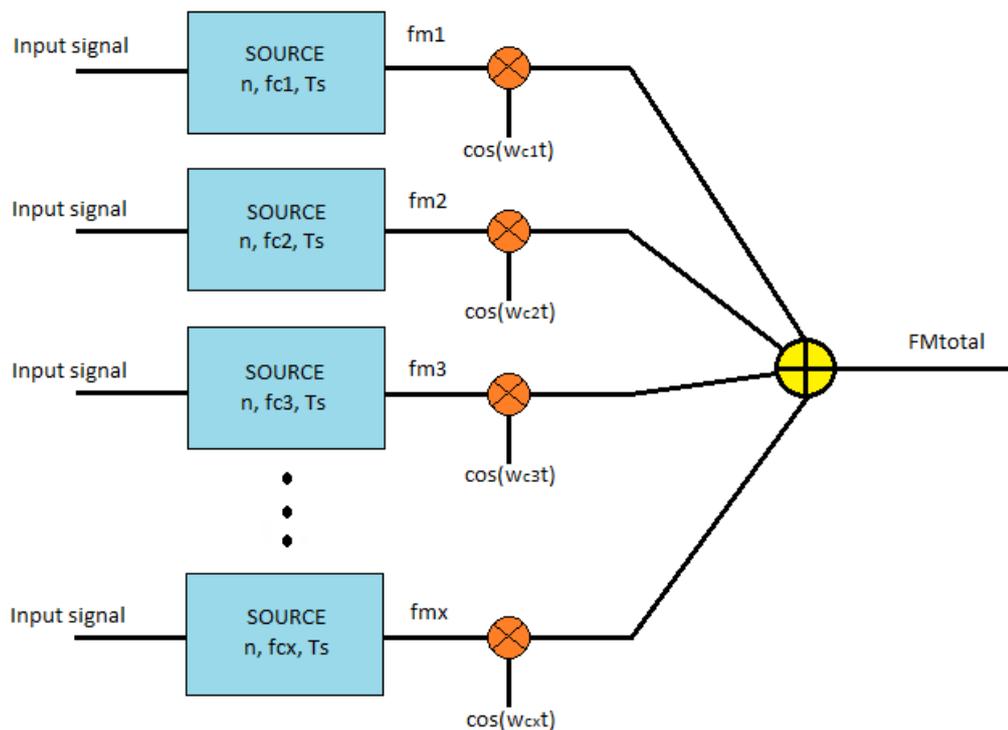


Fig. [10]: Diagrama de bloques de la generación de las señales WM.

Esta figura representa el proceso a seguir para el diseño de las señales WM.

Inicialmente, se introduce la señal de entrada, en este caso va a ser una señal sinusoidal simple. Esta señal se introduce al bloque SOURCE que necesita como entradas: n (tipo de situación), fc_x (frecuencia portadora) y T_s (tiempo de muestreo). El código que implementa este bloque es el siguiente:

```

function x1 = source(n, fcarry, Ts)

%"t" is the signal's length.
t = 0:Ts:5*10^(-6);

%The followed parameters are used for doing an integral.
inter=[];
interfinal=[];

if n == 0
    x1 = zeros(1,length(t));
end

if n == 1
    %Silent, the piece of information that I have to use -->
    2*pi*Kf=±5000
    %Initial signal --> m(t)=sin(2*pi*32000*t).

    %The integral has the length between 0 and 2.5*10^6.
    %The integral of sin(2*pi*32000*t) with t=0 is the following:
    inter0=-cos(2*pi*32000*0)/(2*pi*32000);

    for k = 1:length(t)
        %The integral of sin(2*pi*32000*t) when t takes one value
        between
        %t(1) and t(2.5*10^6) is the following:
        inter(k)=-cos(2*pi*32000*t(k))/(2*pi*32000);
        %The integral's result:
        interfinal(k)=inter(k)- inter0;
        %A part of the FM signal.
        x1(k)= cos(2*pi*fcarry*t(k)+2*pi*5000*interfinal(k));
    end
end

if n == 2
    %Soft speaker, the piece of information that I have to use -->
    2*pi*Kf=±15000
    %Initial signal -->m(t)=sin(2*pi*3900*t).

    %The integral has the length between 0 and 2.5*10^6.
    %The integral of sin(2*pi*3900*t) with t=0 is the following:
    inter0=-cos(2*pi*3900*0)/(2*pi*3900);

    for k = 1:length(t)
        %The integral of sin(2*pi*3900*t) when t takes one value
        between
        %t(1) and t(2.5*10^6) is the following:
        inter(k)=-cos(2*pi*3900*t(k))/(2*pi*3900);
        %The integral's result:
        interfinal(k)=inter(k)- inter0;
        %A part of the FM signal.
        x1(k)= cos(2*pi*fcarry*t(k)+2*pi*15000*interfinal(k));
    end
end

if n == 3
    %Loud speaker, the piece of information that I have to use -->

```

```

2*pi*Kf=±32600
%Initial signal -->m(t)=sin(2*pi*13400*t) .

%The integral has the length between 0 and 2.5*10^6.
%The integral of sin(2*pi*13400*t) with t=0 is the following:
inter0=-cos(2*pi*13400*0)/(2*pi*13400);

for k = 1:length(t)
    %The integral of sin(2*pi*13400*t) when t takes one value
between
    %t(1) and t(2.5*10^6) is the following:
    inter(k)=-cos(2*pi*13400*t(k))/(2*pi*13400);
    %The integral's result:
    interfinal(k)=inter(k)-inter0;
    %A part of the FM signal.
    x1(k)=cos(2*pi*fcarry*t(k)+2*pi*32600*interfinal(k));
end
end
end

```

Inicialmente, se tiene el periodo de la señal muestreado. Se presentan cuatro situaciones:

- n=0, No se introduce ninguna señal.
- n=1, Silencio.
- n=2, Soft Speaker, voz baja.
- n=3, Loud Speaker, voz alta.

Dentro de cada situación, se lleva a cabo el desarrollo de la expresión 4.1. Dependiendo de la situación escogida, tanto la señal de entrada como la sensibilidad de la frecuencia del modulador son diferentes para poder caracterizar la señal.

El código que genera las señales WM es el siguiente:

```

%-----
-----
%% FM signals(Now, It is going to create the FM signal with the
function
%% source)
%-----
-----

fm1 = source (n(b), fcarrier(1), Ts);
fm2 = source (n(b), fcarrier(2), Ts);
fm3 = source (n(b), fcarrier(3), Ts);
fm4 = source (n(b), fcarrier(4), Ts);
fm5 = source (n(b), fcarrier(5), Ts);

```

Seguidamente, estas señales son multiplicadas por la siguiente expresión:

$$y(t) = \text{Real}\{x(t)e^{j2\pi f_c t}\} \quad (4.2)$$

Si se desarrolla la expresión 4.2, nos es más que la multiplicación de la señal $x(t)$ por el $\cos(\omega_c t)$, es decir, se ha multiplicado la señal por un pulso coseno para evitar posibles solapamientos entre señales. El código que lleva a cabo lo anteriormente dicho es el siguiente:

```

%-----
%% Real part.
%-----

for d = 1:length(fm1)

    fm1r(b,d) = real(fm1(d)*exp(i*2*pi*fcarrier(1)*d));
    fm2r(b,d) = real(fm2(d)*exp(i*2*pi*fcarrier(2)*d));
    fm3r(b,d) = real(fm3(d)*exp(i*2*pi*fcarrier(3)*d));
    fm4r(b,d) = real(fm4(d)*exp(i*2*pi*fcarrier(4)*d));
    fm5r(b,d) = real(fm5(d)*exp(i*2*pi*fcarrier(5)*d));

end

```

Finalmente, se suman todas las señales WM para generar la señal que va a ser objeto de estudio:

```

%-----
%% Now, It is going to add all the Fm signals in a variable.
%-----

FMtotal(b,:) = fm1r(b,:) + fm2r(b,:) + fm3r(b,:) + fm4r(b,:) +
fm5r(b,:);

```

Al transmitir dicha señal al entorno, ésta se ve afectada por pérdidas debidas al espacio libre y por el ruido existente en el ambiente. El ruido existente en el ambiente se caracteriza por ser un ruido aditivo, blanco y gaussiano, con media nula y varianza σ_w . La varianza σ_w es la densidad espectral de potencia del ruido, en este caso, al ser un ruido térmico viene dada por la expresión:

$$N_0 = KTB \text{ (Watts)} \quad (4.3)$$

donde

K=constante de Boltzmann(J/°k)

T=temperatura ambiente (°k)

B=ancho de banda (Hz)

Para finalizar, el ruido ambiental se obtiene mediante la multiplicación de esta varianza con un conjunto de valores aleatorios procedentes de una distribución normal.

El código que implementa este ruido es el siguiente:

```

%-----
%-->Thermal Noise.
%-----

% Boltzmann's constant (J/°K) .
K = 1.3806504*10^(-23);
% Temperature (°K) .
T = 290;
% Bandwidth (8MHz) .
B = 8*10^6;

% PSD, Thermal noise.
No = K*T*B;
NodBm = 10*log10 (No/0.001);

%-----
%-->AWGN
%-----

media = 0;
var2 = NodBm;
var = sqrt(0.001*10^(var2/10));

%-----
%% Noise outdoor (AWGN) .
%-----

Noise (b, :) = var*randn(1,length(FMtotal (b, :)));

```

Para añadir las pérdidas en espacio libre, se ha utilizado la expresión que las caracteriza:

$$PathLoss(dB) = 32.45(dB) + 20 \log_{10}(f(MHz)) + 20 \log_{10}(d(Km)) \quad (4.4)$$

donde

f: frecuencia central del ancho de banda de la señal de entrada.

d: distancia entre emisor y receptor.

El código que implementa dichas pérdidas es:

```

%-----
%% Path Loss.
%-----

Path_Loss = 32.45 + 20*log10(10.7) + 20*log10(0.5); % (dB)

```

Para introducir estos dos parámetros en la señal FMtotal, debemos poner todos los parámetros en las unidades correspondientes. El código es el siguiente:

```

PL = 10^(-Path_Loss/10);

for c = 1:length(FMtotal(b,:))

    FMsignal(b,c) = PL*FMtotal(b,c) + Noise(b,c);

end

```

Una vez efectuados todos los pasos anteriores, se puede afirmar que esta es la señal que va a ser detectada.

A partir de aquí, se va a desarrollar el código que implementa el detector de energía:

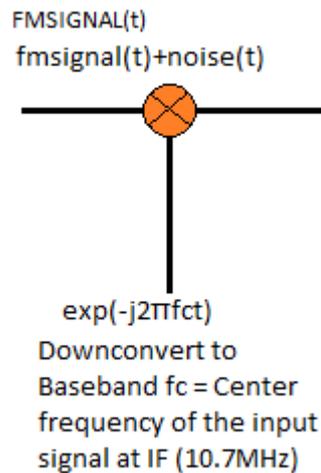


Fig. [11]: Selección de la banda base.

```

%-----
% Now, It is going to convert the FM signal into baseband signal.
% Central frequency fc=10,7MHz.
%-----

%The center frequency is fc= 10,7 MHz
fc = 10.7*10^6;

for e = 1:length(FMsignal(b,:))

    y(b,e) = FMsignal(b,e)*exp(-1i*2*e*fc);

end

```

Con este paso, se eliminan las frecuencias altas y se selecciona la banda base deseada gracias a la frecuencia central elegida.

A continuación, se va a desarrollar el bloque encargado de realizar el filtro paso banda:

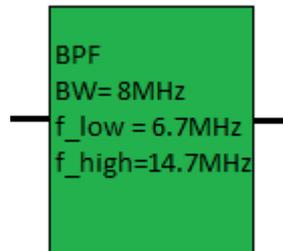


Fig. [12]: Filtro paso banda.

El filtro paso banda tiene el siguiente esquema:

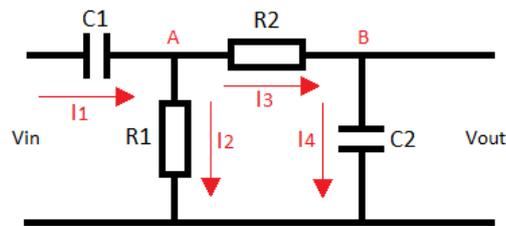


Fig. [13]: Circuito de un filtro paso bajo.

Para entender el código con mayor facilidad, se va a desarrollar el cálculo de la función de transferencia:

En el punto A:

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (4.5)$$

$$\frac{V_{in} - V_a}{Z_{C1}} = \frac{V_a}{Z_{R1}} + \frac{V_a - V_{out}}{Z_{R2}} \quad (4.6)$$

$$j\omega C_1 V_{in} = V_a \left(\frac{1}{R_1} + j\omega C_1 + \frac{1}{R_2} \right) - \frac{V_{out}}{R_2} \quad (4.7)$$

$$j\omega C_1 V_{in} = V_a \left(\frac{R_2 + j\omega C_1 R_1 R_2 + R_1}{R_1 R_2} \right) - \frac{V_{out}}{R_2} \quad (4.8)$$

En el punto B:

$$I_3 = I_4 \quad (4.9)$$

$$\frac{V_a - V_{out}}{Z_{R2}} = \frac{V_{out}}{Z_{C2}} \quad (4.10)$$

$$\frac{V_a}{R_2} = V_{out} \left(j\omega C_2 + \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.11)$$

$$V_a = V_{out}(j\omega C_2 R_2 + 1) \quad (4.12)$$

Ahora se sustituye la expresión 4.12 en la expresión 4.8 para obtener la función de transferencia del filtro:

$$j\omega C_1 V_{in} = V_{out}(j\omega C_2 R_2 + 1) \left(\frac{R_2 + j\omega C_1 R_1 R_2 + R_1}{R_1 R_2} \right) - \frac{V_{out}}{R_2} \quad (4.13)$$

$$j\omega C_1 V_{in} = V_{out} \left(\frac{j\omega C_2 R_2^2 + (j\omega)^2 C_1 R_1 C_2 R_2^2 + j\omega C_2 R_1 R_2 + R_2 + j\omega C_1 R_1 R_2 + R_1 - R_1}{R_1 R_2} \right) - \frac{V_{out}}{R_2} \quad (4.14)$$

$$H = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{j\omega C_1 R_1 R_2}{(j\omega)^2 C_1 R_1 C_2 R_2^2 + j\omega R_2 (C_2 R_1 + C_2 R_2 + C_1 R_1) + R_2} \quad (4.15)$$

$$H = \frac{j\omega C_1 R_1}{-\omega^2 C_1 R_1 C_2 R_2 + j\omega (C_2 R_1 + C_2 R_2 + C_1 R_1) + 1} \quad (4.16)$$

El valor de la frecuencia inferior y superior se ha elegido en función del ancho del canal de televisión y de las frecuencias portadoras.

El código es el siguiente:

```

%-----
%
%% Following, It is going to filter the baseband signal with a
bandpass
%% BPF (6.7-14.7 MHz) .
%-----
%
%low frequency
flow = 6.7*10^6;
%high frequency
fhigh = 14.7*10^6;
%I have supposed that the both resistance has the value 10k Ohms.
R1 = 10*10^3;
R2 = 10*10^3;
%High Pass Filter Stage:
C1 = 1/(2*pi*flow*R1);

%Low Pass Filter Stage:
C2 = 1/(2*pi*fhigh*R2);

%Bandwidth
BW = fhigh-flow;

```

```

%Central frequency
fcentral = sqrt(fhigh*flow);

%Transfer funtion
fbpf = linspace(flow,fhigh,length(y(b,:)));
num = 1i*2*pi*fbpf*C1*R1;
den = -C1*C2*R1*R2*(4*pi*pi.*fbpf.*fbpf) +
1i*2*pi*fbpf*(C1*R2+C1*R1+C2*R2)+1;
h = (num)./(den);

% In time domain
fil = fftshift(ifft(h))/length(h);

% Filtering.
filter(b,:) = conv(y(b,:),fil);

```

A continuación, se va desarrollar el código utilizado para realizar la FFT de 2048 puntos:

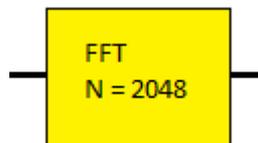


Fig. [14]: Bloque de una FFT de 2048 puntos.

El código implementado es el siguiente:

```

%-----
%% FFT of the signal.
%-----

Z(b,:) = fftshift(fft(filter(b,:),2048))/length(filter(b,:));

```

Los siguientes bloques van unidos, estos son el cuadrado y el promediado, gracias a ellos, se obtienen la media de los valores de potencia relativos de cada componente espectral de la señal elevada al cuadrado. Estos bloques son utilizados para calcular el valor de la potencia de la señal, valor que será utilizado en el test estadístico:

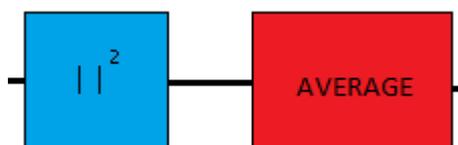


Fig. [15]: Bloques cuadrado y promediado.

El código siguiente corresponde al cálculo de la potencia de la señal recibida y procesada. Dentro del mismo aparece la utilización del bloque cuadrado.

```

%-----

```

```

-----
%% Average FFT output squared.
%-----

-----

% According to "Energy detection using estimated noise variance
for
% spectrum sensing in Cognitive Radio networks" I have included
% 1/length(z) in the expression of Power.

for g = 1:length(Z(b,:))

    P(b) = P(b) + abs(Z(b,g))^2;

end

P(b) = (1/length(Z(b,:))) * P(b);

%-----
%% Value of P(dBm) .
%-----

-----

dBmpot(b) = roundn(10*log10(P(b)/0.001), -2);

```

El valor de la potencia resultante es expresado en unidades de dBm. Además se redondea a dos decimales para facilitar la comparación en el test estadístico.

Por último, se encuentra el test estadístico. Este test es utilizado para comprobar la disponibilidad del canal además de la precisión del detector. Para ello, se van a calcular cuatro tipos de probabilidades:

- Pd: Probabilidad de detección. Probabilidad de que haya señal en el canal y se detecte correctamente.
- Pfa: Probabilidad de falsa alarma. Probabilidad de que no haya señal en el canal y el detector detecte algo.
- Pm: Probabilidad de pérdida. Probabilidad de que no se detecte nada cuando si existe una señal en el canal.
- Pnd: Probabilidad de no detectar. Probabilidad de que no se detecte nada cuando no hay señal en el canal.

El test estadístico consiste en comparar el valor de la potencia, calculado en el bloque anterior en unidades de dBm, con el valor umbral. El valor umbral se establece según el nivel de ruido, es decir, el valor de la densidad espectral de potencia del ruido. La idea general es la siguiente:

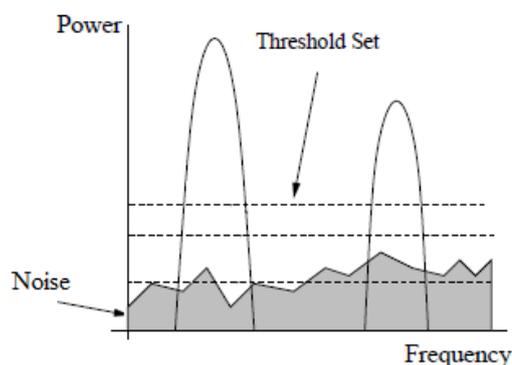


Fig. [16]: Idea general del test estadístico.

Source: Basada en figura 2.2.b of Jarmo Lundén, Helsinki University of Technology, Faculty of Electronics, Communications and Automation, Department of Signal Processing and Acoustics, "SPECTRUM SENSING FOR COGNITIVE RADIO AND RADAR SYSTEMS", Report 11, Nov. 2009.

Como se observa en la figura anterior, se establecen varios valores del umbral y se compara este nivel establecido con la potencia de la señal para ver si se detecta o por el contrario se debe cambiar el umbral establecido.

El test estadístico presenta dos hipótesis:

- H_0 : Hipótesis nula, en esta hipótesis la señal está ausente. Esta hipótesis se elige si el valor de la potencia es menor que el umbral.
- H_1 : Hipótesis alternativa, en esta hipótesis la señal está presente. Esta hipótesis se elige si el valor de la potencia es mayor que el umbral.

Para el cálculo de las cuatro probabilidades anteriores, se debe tener en cuenta las cuatro situaciones impuesta en el bloque "source". Si se recuerdan, cuando $n = 0$, no hay señal de entrada, cuando $n = 1$, la situación es silencio pero si hay señal de entrada, cuando $n = 2$, la situación es voz baja y hay señal de entrada y , cuando $n = 3$, la situación es voz y hay señal de entrada. Por lo tanto, partiendo de estas cuatro situaciones, las probabilidades se calculan mediante la experimentación. Por ello, se crean cuatro variables, correspondientes a las cuatro probabilidades. Conforme se va experimentando, estas variables van aumentando si el caso es favorable:

- Si en un experimento se ha elegido la hipótesis nula, quiere decir que el detector no ha detectado nada pero pueden darse dos circunstancias, que no haya señal de entrada, sólo haya ruido, caso $n = 0$, por lo que la variable correspondiente a la no detección aumenta un experimento. Por el contrario, si existe señal quiere decir que se encuentra en una detección perdida, por lo que la variable correspondiente a la detección perdida aumenta un experimento.
- Si en un experimento se ha elegido la hipótesis alternativa, quiere decir que el detector ha detectado pero pueden darse dos circunstancias, que no haya señal de entrada, sólo ruido, por lo que la variable correspondiente a falsa alarma aumenta un experimento. Por el contrario, si existe señal quiere decir que se encuentra en una

detección correcta, por lo que la variable correspondiente a la detección aumenta un experimento.

Finalmente, teniendo en cuenta el número total de experimentos realizados y los experimentos acertados que tiene cada variable, mediante la definición clásica de la probabilidad se obtiene el valor de las probabilidades:

$$Prob = \frac{\text{Número de resultados favorables}}{\text{Número de resultados posibles}} \quad (4.17)$$

Seguidamente, se va a introducir el código que implementa lo anteriormente dicho:

```

-----
%% Test of two hypotheses H0 and H1.
% If dBmpot < th--> H0
% If dBmpot >= th--> H1
-----

for f = 1 : length(thv)
    if dBmpot(b) < thv(f)
        H0 = [H0 dBmpot(b)];

        if n(b) == 0
            % In this case, n = 0, I do not have signal then the
detector
            % does not detect.
            NotDetection(b,f) = 1;
            disp('SIGNAL IS ABSENT')
        else
            % In this case, n is different of 0 then I have signal
but
            % the detector is not able to detect it therefore I
miss
            % the signal.
            MissedDetection(b,f) = 1;
            disp('SIGNAL IS PRESENT BUT THE DETECTOR DOES NOT
DETECT IT')
        end
    else if dBmpot(b) >= thv(f)
        H1 = [H1 dBmpot(b)];

        if n(b) == 0
            % In this case, n = 0, I do not have signal but
the
            % detector detects something, this means that I
have a false
            % alarm.
            FalseAlarm(b,f) = 1;
            disp('SIGNAL IS ABSENT BUT THE DETECTOR DETECTS
SOMETHING')
        else
            % In this case, n is different of 0 then the
detector
            % detects correctly because I have signal.

```

```

        Detection(b, f) = 1;
        disp('SIGNAL IS PRESENT')
    end
end
end
end

Pfa(b) = sum(FalseAlarm(b, :))/length(thv);
Pd(b) = sum(Detection(b, :))/length(thv);
Pnd(b) = sum(NotDetection(b, :))/length(thv);
Pm(b) = sum(MissedDetection(b, :))/length(thv);

```

Este es el código que define totalmente al detector diseñado. En esta sección, se va a estudiar la eficiencia del detector ante diferentes variaciones.

4.4. ESTUDIO DEL DETECTOR DE ENERGÍA.

4.4.1. Comportamiento del detector de energía ante la variación de distancia entre Emisor y Receptor.

En esta sección, se va a estudiar el comportamiento del detector de energía modificando la distancia entre el emisor y el receptor.

Se ha generado un vector de distancias que va desde 1 m hasta 20 km. Este vector influye en la expresión de las pérdidas en espacio libre, por tanto, también influye en la señal WM recibida en el detector.

Como resultado, se obtiene las siguientes gráficas:

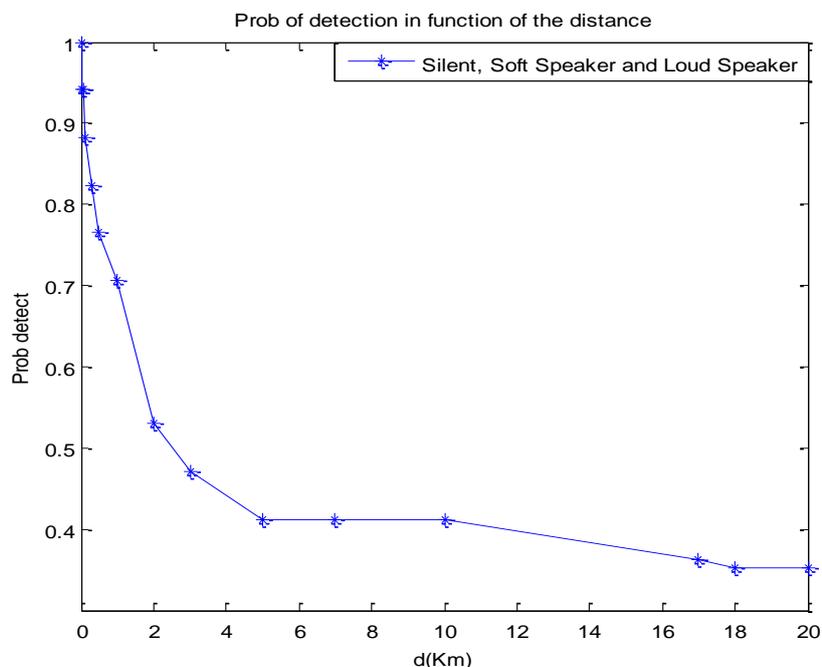


Fig. [17]: Variación de la Probabilidad de detección conforme aumenta la distancia entre Tx y Rx.

Como se puede observar, la probabilidad de detección disminuye conforme aumenta la distancia entre transmisor y receptor. Este comportamiento es lógico ya que la línea de observación directa entre transmisor y receptor adquiere una mayor distancia, debido a esto, aparecen más interferencias radio en la transmisión haciendo que la probabilidad de detección disminuya considerablemente.

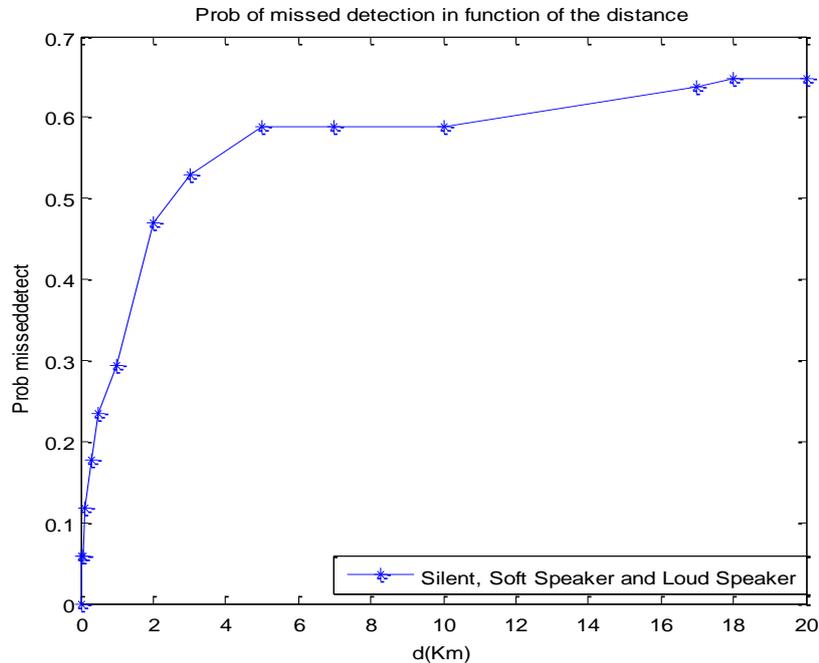


Fig. [18]: Variación de la Probabilidad de detección perdida conforme aumenta la distancia entre Tx y Rx.

Por el contrario, conforme aumenta la distancia entre emisor y receptor, la probabilidad de perder una detección aumenta. Esto es debido al aumento de la influencia del ruido y, por lo tanto, al aumento de la inestabilidad del enlace.

Cuando la distancia varía, la probabilidad de falsa alarma y la probabilidad de no detectar permanecen constantes. Estas probabilidades tiene los siguientes valores, la probabilidad de falsa alarma es 0.3529 y la probabilidad de no detección es 0.6471. Esto se debe a que, para calcular la probabilidad de no detectar y la probabilidad de falsa alarma no existe ninguna señal en el canal, es decir, sólo hay ruido. El ruido no se ve afectado por las pérdidas en espacio libre, y por tanto, no sufre variaciones con la distancia. Para entender mejor esta explicación, se debe tener presente la expresión 4.4.

Se han realizado más experimentos para comprobar el comportamiento de este detector ante la variación de la distancia a otras temperaturas. El resultado ha sido el mismo debido a que la influencia de la temperatura es mínima en comparación con las pérdidas en el espacio libre.

4.4.2. Comportamiento del detector de energía ante la variación de temperatura.

En esta sección, se va a comprobar el comportamiento del detector ante la variación de la temperatura. Para ello se debe fijar la distancia entre emisor y receptor. En este estudio se han tomado tres distancias diferentes: 10m, 1Km y 10Km. Una vez se fija la distancia, se ha creado un vector con diferentes temperaturas, en grados kelvin, que van desde los 273°K a 323°K, 0°C a 50°C, en grados Celsius.

Seguidamente se van a mostrar los resultados obtenidos para las diferentes distancias escogidas:

Para una distancia entre emisor y receptor de 10m se han obtenido:

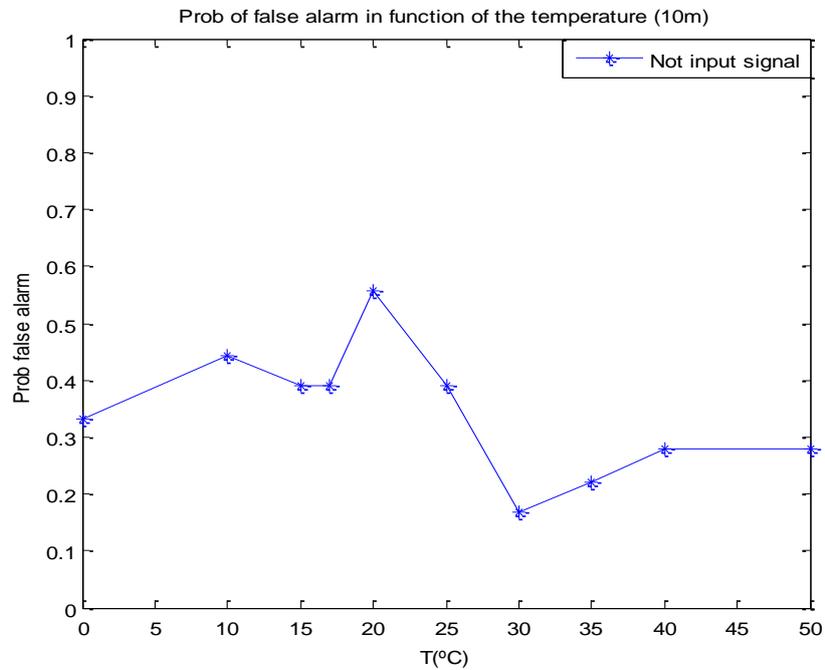


Fig.[19]: Probabilidad de falsa alarma en 10m conforme la temperatura aumenta.

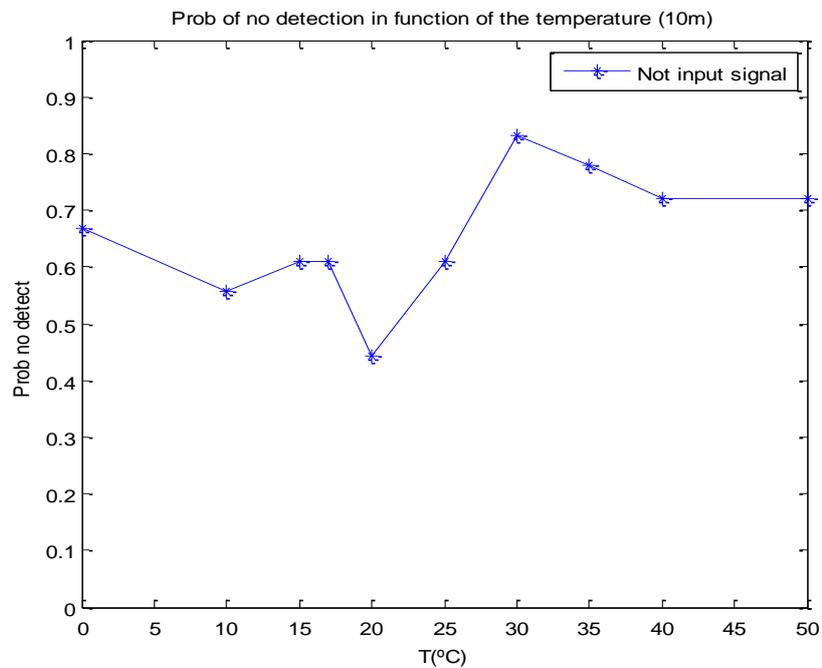


Fig.[20]: Probabilidad de no detección en 10m conforme la temperatura aumenta.

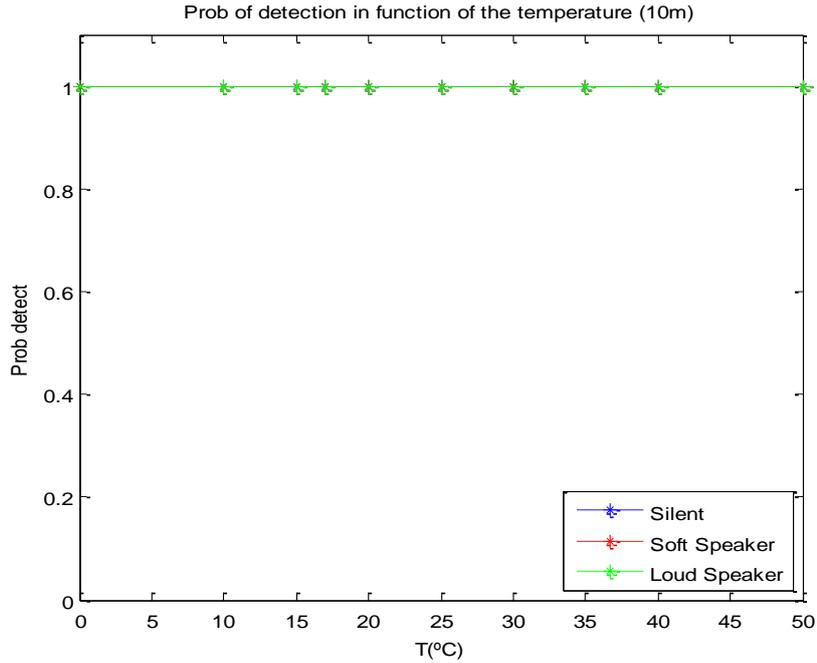


Fig.[21]: Probabilidad de detección en 10m conforme la temperatura aumenta.

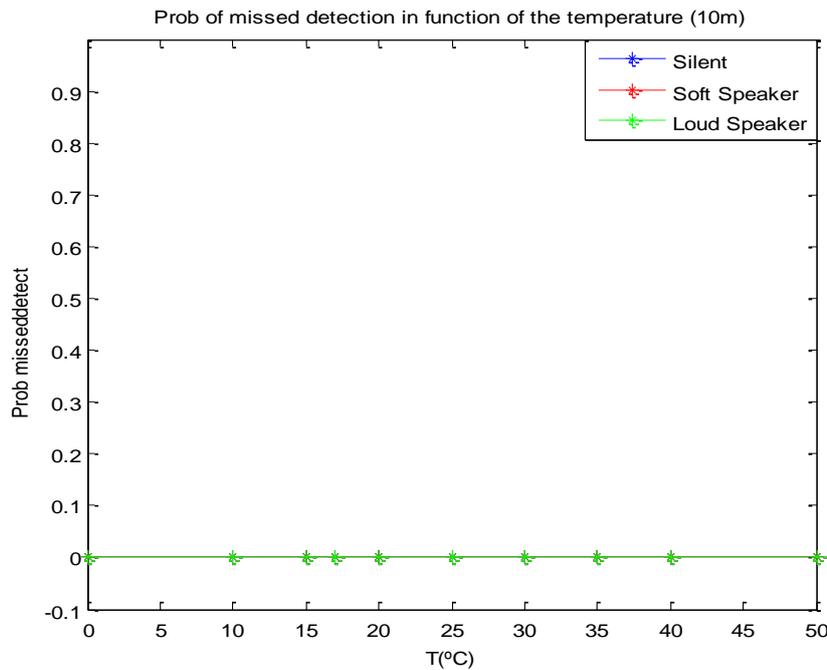


Fig.[22]: Probabilidad de detección perdida en 10m conforme la temperatura aumenta.

Observando las gráficas anteriores, se puede afirmar que el detector no se ve afectado en exceso por la variación de la temperatura, ya que la línea de observación directa entre emisor y receptor tiene una distancia mínima. Lo anteriormente dicho se puede apreciar en la forma de las gráficas, la probabilidad de detección es perfecta por lo que la probabilidad de pérdida es nula, esto es debido a que a esta distancia la comunicación es buena. La probabilidad de falsa alarma varía con las temperaturas intermedias, de 17 ° a 30°, pero tiene valores bajos, por lo que es poco probable tener una falsa detección. En cuanto a la probabilidad de no detectar, también varía en las temperaturas intermedias pero su rango de valores es bastante

alto por lo que existe una cierta fiabilidad a la hora de decir que el detector no ha detectado nada.

A continuación, se van a mostrar las probabilidades para una distancia entre emisor y receptor de 1Km:

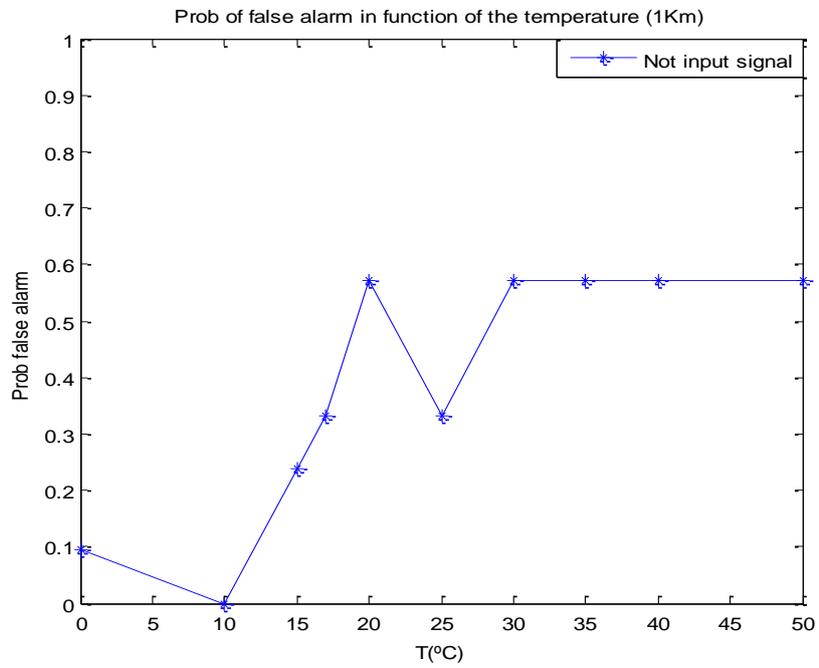


Fig.[23]: Probabilidad de falsa alarma en 1Km conforme la temperatura aumenta.

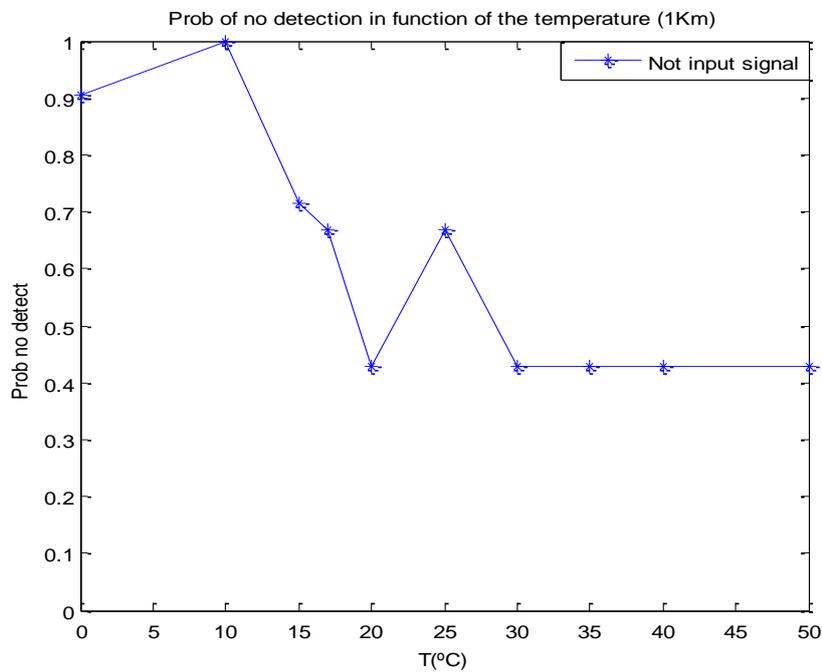


Fig.[24]: Probabilidad de no detección en 1Km conforme la temperatura aumenta.

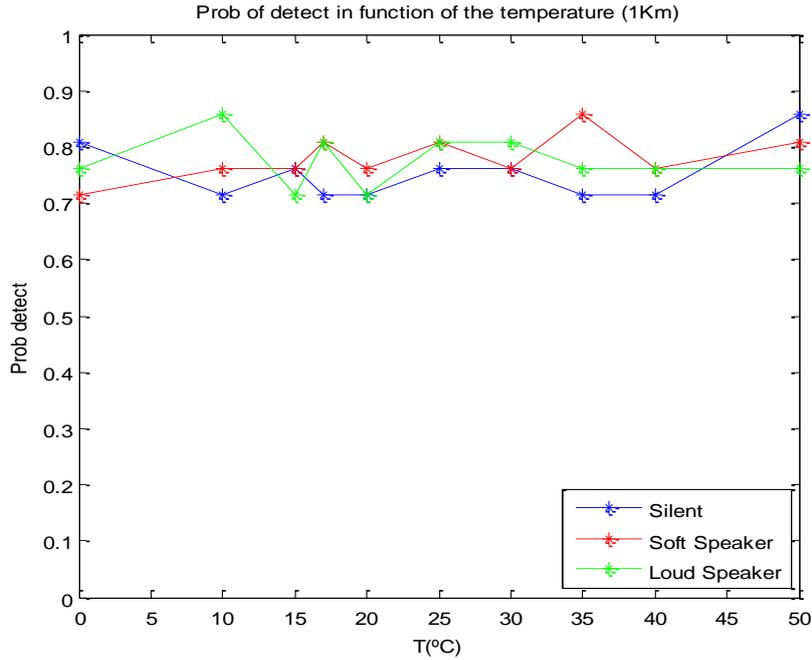


Fig.[25]: Probabilidad de detección en 1Km conforme la temperatura aumenta.

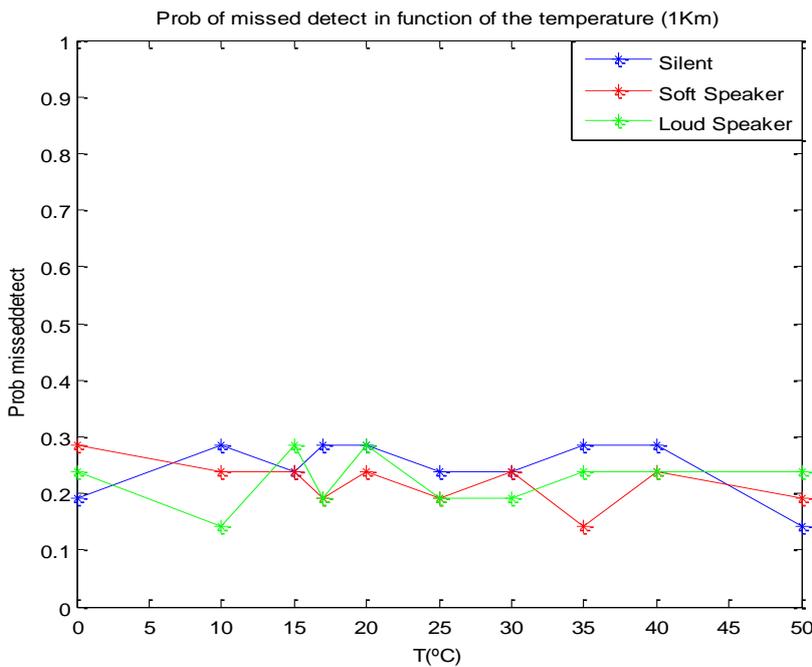


Fig.[26]: Probabilidad de detección perdida en 1Km conforme la temperatura aumenta.

Para dicha distancia, la temperatura afecta al detector. Como se puede observar, la probabilidad de detección es muy oscilante, aunque se mueve entre 0.7 y 0.9, valores cercanos a la unidad. Esto se debe a la interferencia producida por el ruido, el cual depende de la temperatura, y al valor umbral establecido, el cual suele tener un valor inferior al de la potencia de la señal recibida y procesada. Por esta misma razón, es por la que la probabilidad de detección perdida tiene esos valores tan oscilantes, entre 0.1 y 0.3.

En el caso de la probabilidad de falsa alarma, la temperatura influye más aún. Esto se debe a que el umbral establecido es comparado con el valor de potencia la señal procesada, en este caso, la señal procesada está compuesta sólo por ruido porque no se dispone de señal, por

esto, la gráfica de dicha probabilidad es oscilante. A temperaturas bajas esta gráfica posee valores bajos debido a que en las sucesivas comparaciones, el valor de la potencia de ruido procesado es menor que el valor de los umbrales comparados y por ello la probabilidad de falsa alarma es menor. Para valores de temperatura altos, dicha probabilidad adquiere valores significativos, por lo que en la mayoría de los casos, el nivel de potencia del ruido es mayor que los umbrales establecidos, lo que conlleva una alta probabilidad de falsa alarma al no tener señal transmitida. Esto es lógico porque a mayores temperaturas, mayor es el nivel de potencia del ruido.

Como se puede deducir, la probabilidad de no detectar es inversa a la probabilidad de falsa alarma, por esto, la probabilidad de no detección para valores bajos de temperatura presenta valores oscilantes altos y para valores de temperatura altos la probabilidad de no detectar adquiere valores bajos.

Finalmente, se van a mostrar la evolución de las probabilidades para una distancia entre emisor y receptor de 10Km:

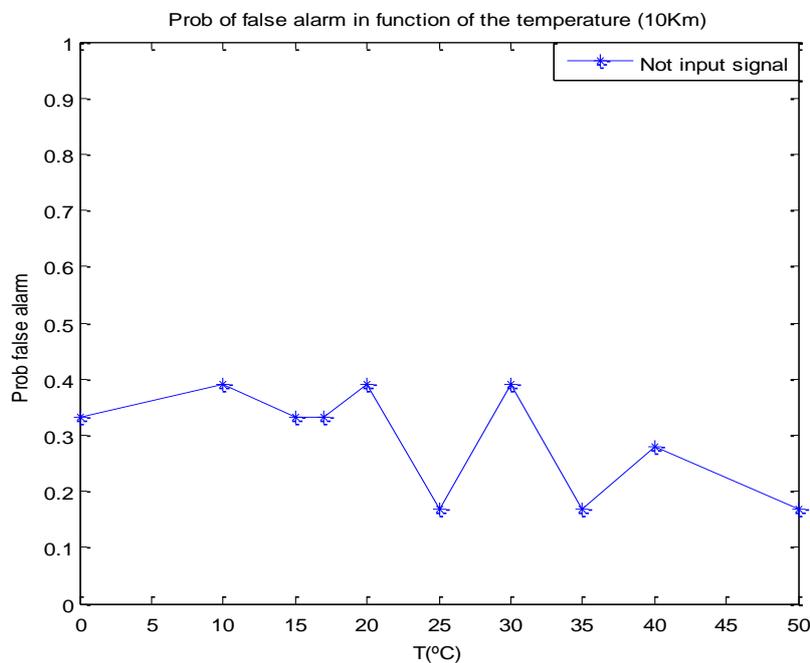


Fig.[27]: Probabilidad de falsa alarma en 10Km conforme la temperatura aumenta.

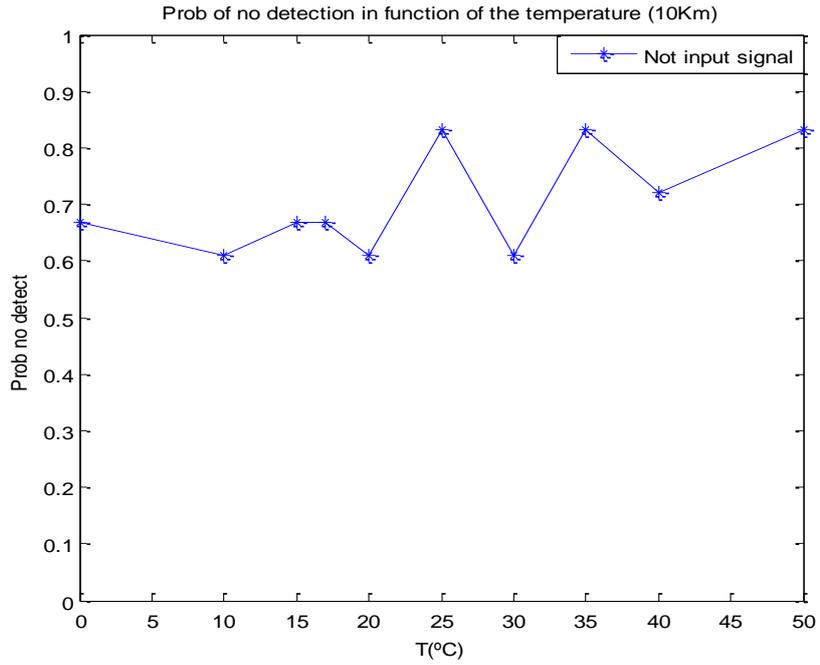


Fig.[28]: Probabilidad de no detección en 10Km conforme la temperatura aumenta.

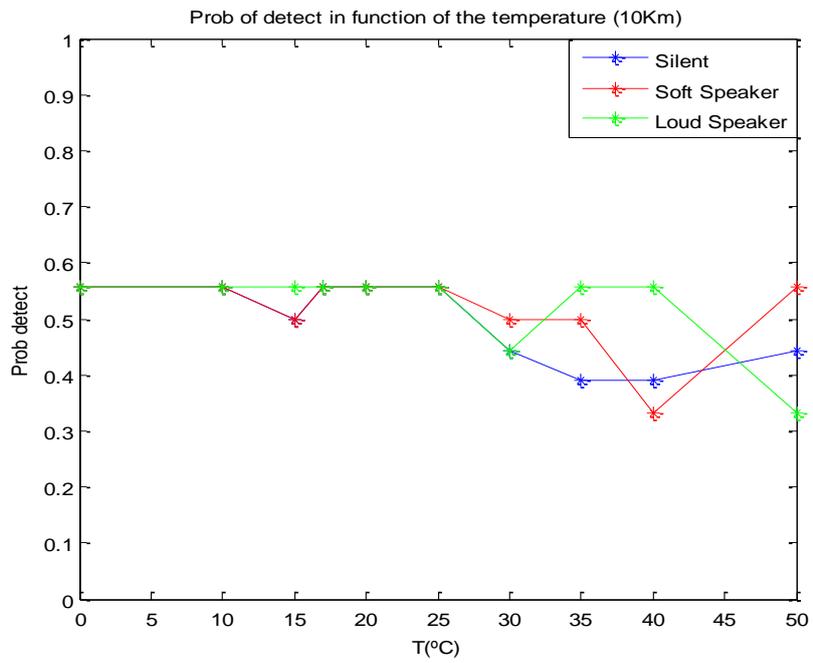


Fig.[29]: Probabilidad de detección en 10Km conforme la temperatura aumenta.

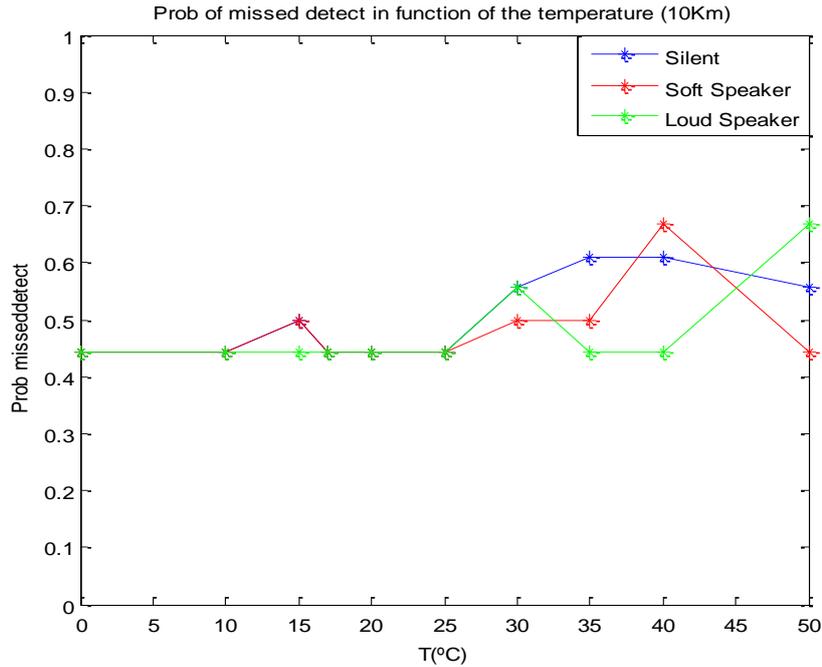


Fig.[30]: Probabilidad de detección perdida en 10Km conforme la temperatura aumenta.

A continuación, se van a comentar las gráficas anteriores. Como se puede observar, las probabilidades sufren una gran oscilación a lo largo de todo el rango de temperaturas. Esto se debe a la gran estabilidad que presenta el sistema debido a la separación que existe entre emisor y receptor, además del aumento del carácter aleatorio que presenta el ruido. Por este motivo, la probabilidad de falsa alarma y la probabilidad de no detectar son tan oscilantes. La probabilidad de falsa alarma, a pesar de su oscilación, presenta valores bajos, a diferencia de la probabilidad de no detección que presenta valores altos.

La probabilidad de detección no muestra valores muy seguros ya que se encuentran entre 0.5 y 0.3 por lo que no trabaja de manera muy estable. Lo mismo ocurre con la probabilidad de pérdida de detección, presenta valores muy altos.

A continuación, se van a comparar los tres casos de estudios conjuntamente.

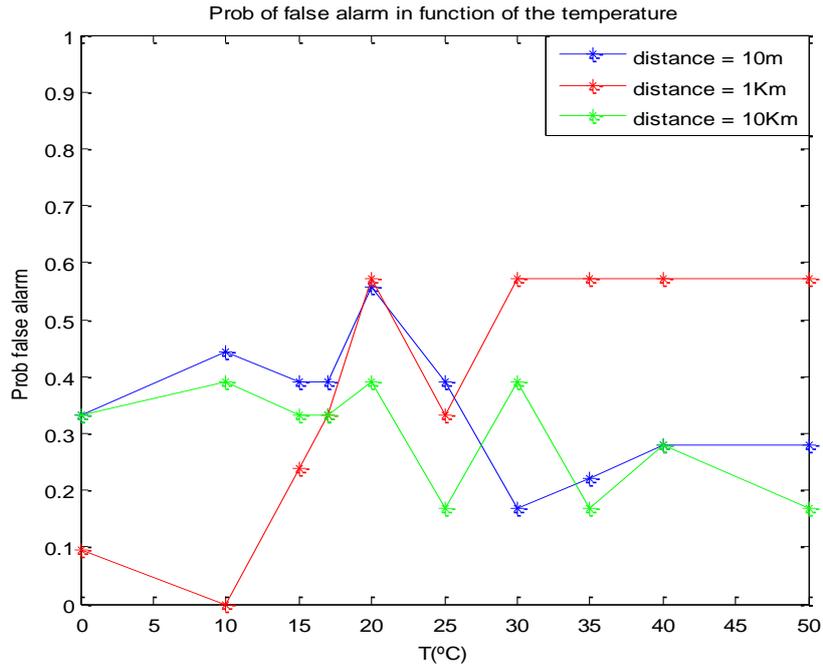


Fig.[31]: Probabilidad de falsa alarma conforme la temperatura aumenta.

Si se compara la probabilidad de falsa alarma de las tres pruebas realizadas, podemos observar que la distancia que presenta un valor de probabilidad más apropiado es a 10Km porque a esta distancia la detección no es tan frecuente, por este motivo presenta valores menores con respecto a las otras dos distancias. Sin embargo, la distancia que presenta peores valores de dicha probabilidad, es la distancia de 1Km porque presenta una inestabilidad alta conforme varía la temperatura.

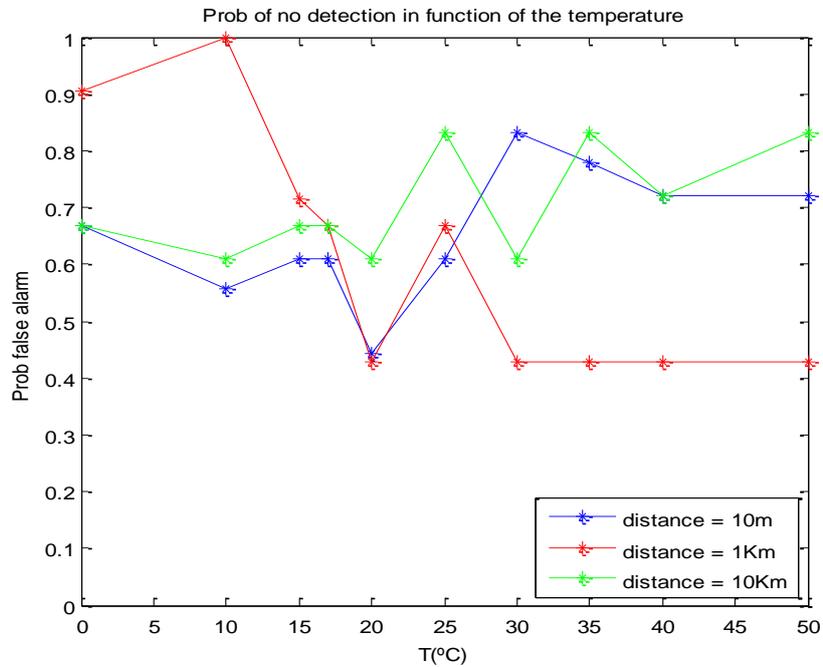


Fig.[32]: Probabilidad de no detección conforme la temperatura aumenta.

Al observar la probabilidad de no detección de las tres distancias y teniendo en cuenta lo anteriormente dicho de la probabilidad de falsa alarma, se puede ratificar las afirmaciones generadas, a 10Km se tiene una mayor probabilidad de no detectar nada debido a la distancia existente y a 1Km se tiene una probabilidad de no detectar muy cambiante y por lo tanto poco segura.

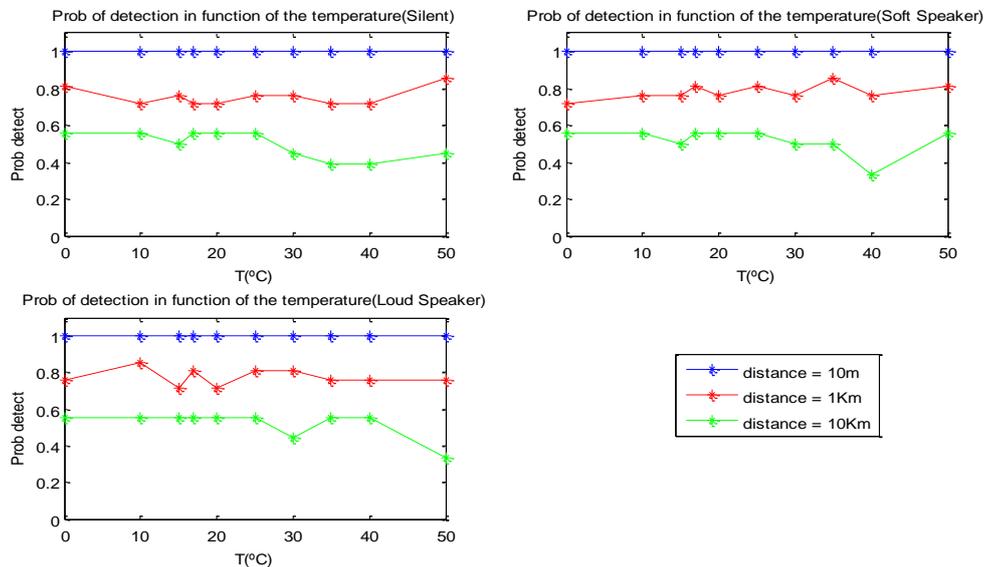


Fig.[33]: Probabilidad de detección conforme la temperatura aumenta en función de la situación.

Si se observan las gráficas generadas para la probabilidad de detección en función de la señal de entrada, se puede concluir que tienen características parecidas. A 10Km, en todas las gráficas, la probabilidad de detección es muy baja, algo lógico debido a la distancia existente. Como se puede observar, a 10m la probabilidad es perfecta debido a la que se encuentran en espacio libre de obstáculos y a la cercanía entre emisor y receptor. A 1Km la probabilidad de detección tiene unos valores bastante recomendables ya que están próximos a la unidad.

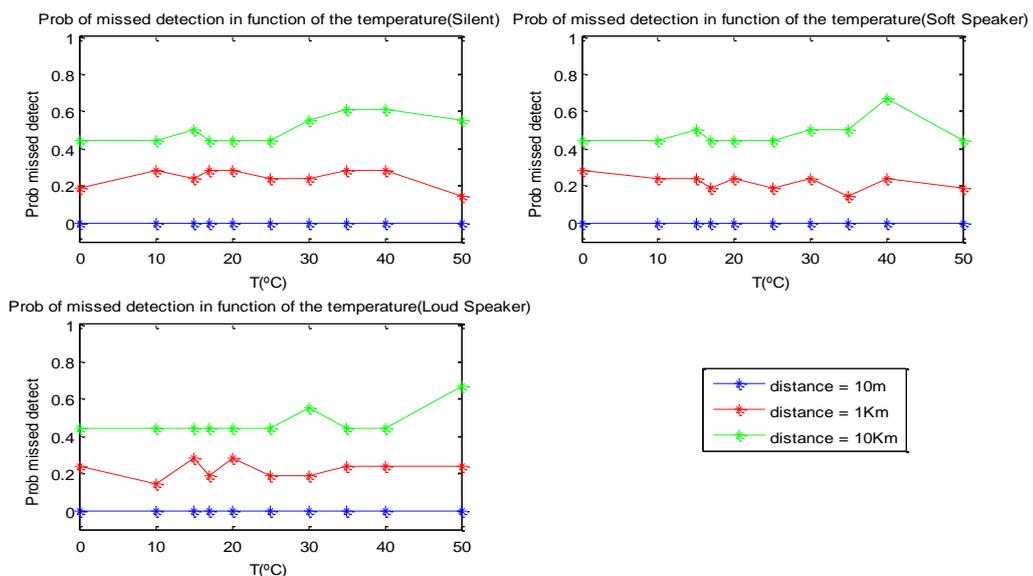


Fig.[34]: Probabilidad de pérdida de detección conforme la temperatura aumenta en función de la situación.

Al observar las gráficas generadas para la probabilidad de detección perdida en función de la señal de entrada, se puede observar que todas presentan una cierta similitud, como ocurría en el caso de la probabilidad de detección. A 10Km, la probabilidad de detección perdida es muy alta, algo lógico debido a la distancia existente. A 10m la probabilidad es perfecta debido a la que se encuentran en espacio libre de obstáculos y a la cercanía entre emisor y receptor, por lo que es poco probable que se pierda una transmisión. A 1Km la probabilidad de detección perdida tiene unos valores bastante recomendables ya que se encuentran en el rango entre 0.3 y 0.2, valores muy pequeños.

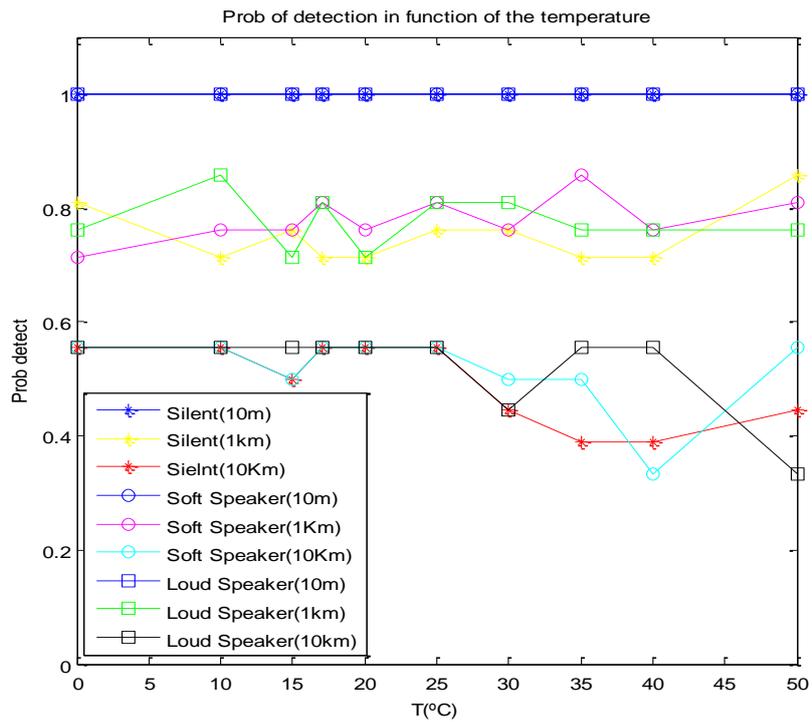


Fig.[35]: Probabilidad de detección en función de la temperatura.

Si se unen los tres gráficas anteriores de la probabilidad de detección, se puede observar que, sin tener en cuenta la detección perfecta a 10m debido a la cercanía entre emisor y receptor, el que presenta una detección más favorable es la detección de Soft Speaker a 1Km. En contra posición, se encuentra la situación de Silent a 10Km, que presenta una probabilidad de detección poco favorable.

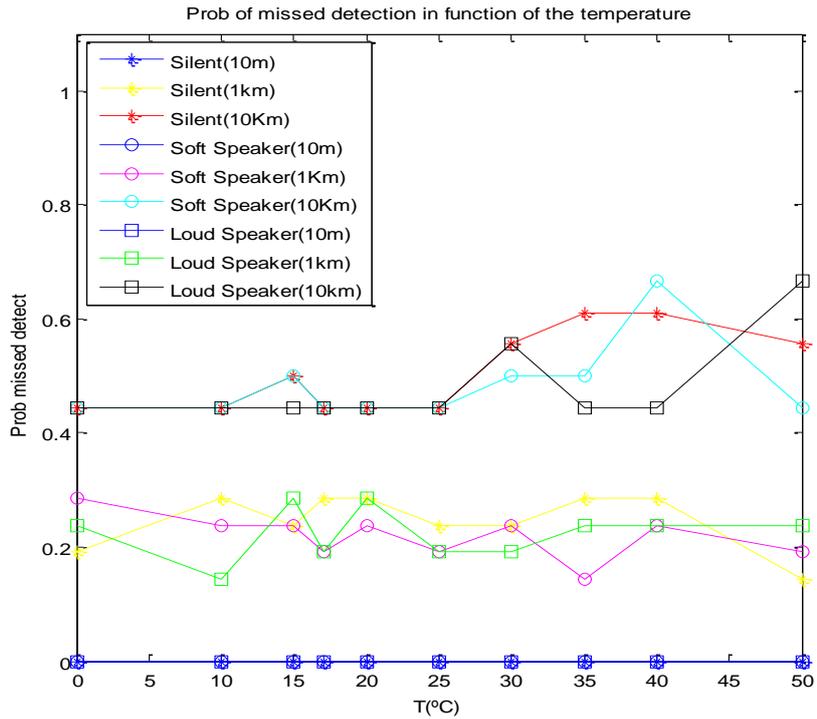
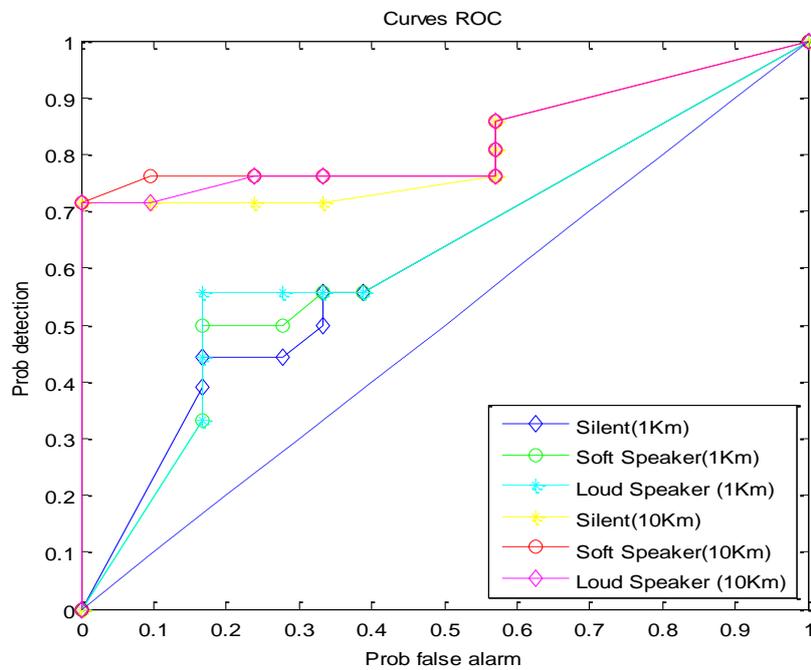


Fig.[36]: Probabilidad de pérdida de detección en función de la temperatura.

A unirse las probabilidades de detección perdida en una misma gráfica y en complemento a lo mencionado anteriormente, se puede decir que la situación que presenta una probabilidad de pérdida de detección menor es Loud Speaker a 1Km y la situación que presenta mayor probabilidad de pérdida es Soft Speaker a 10Km.



Fig[37]: Curva ROC.

La curva ROC pretende estudiar la sensibilidad y especificidad del detector de energía, dependiendo del espacio existente a la derecha de la curva. Cuanto más espacio haya, más

precisa será la curva. Se debe tener en cuenta que se han suprimido los resultados obtenidos a 10m porque aparece una situación perfecta ya que se tiene el total del espacio al tener los mejores puntos de predicción (x,1) respecto a la variación de la probabilidad de falsa alarma. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede concluir diciendo que la situación que presenta mejor precisión es Soft Speaker a 10km porque es la curva que deja un mayor espacio. En contraposición, tenemos que la situación de detección más inútil por la cercanía de espacio y por su proximidad a la línea de no discriminaciones (línea diagonal), es la de Silent a 1Km.

5. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS.

5.1. CONCLUSIONES.

A lo largo de este proyecto se ha diseñado un detector de energía y se ha analizado su comportamiento frente a diferentes situaciones. Este estudio ha sido realizado mediante una aplicación desarrollada en MatlabTM.

Esta nueva aplicación se ha utilizado para estudiar al detector en diferentes situaciones y condiciones.

En la sección 4.4.1, se ha analizado el comportamiento del detector ante la variación de la distancia. La probabilidad de detectar una señal presenta un carácter exponencial decreciente para la probabilidad de detección. Conforme aumenta la distancia entre el emisor y el receptor la detección de la señal WM se hace menos posible. En contraposición, la probabilidad de perder la detección de una señal tiene un carácter exponencial creciente conforme aumenta la distancia entre emisor y receptor.

En el caso de la probabilidad de falsa alarma y la probabilidad de no detectar señal, éstas permanecen constantes.

Por consiguiente, para una correcta detección y evitar la pérdida, lo lógico es que la distancia entre emisor y receptor no sea mayor a 2 km.

En la sección 4.4.2, se ha analizado el comportamiento del detector ante la variación de la temperatura. Dicho comportamiento presenta una gran inestabilidad debido a: la aleatoriedad del ruido y a los resultados oscilantes, por lo que, se deben de tener en cuenta la variación de la temperatura y de la distancia entre emisor y receptor. A causa de la cercanía entre emisor y receptor para 10m de separación, se prescinden de los resultados obtenidos debido a su perfección. Para una distancia de 1 km, los resultados obtenidos de la probabilidad de detección tienen un carácter oscilante entre 0.9 y 0.7, valores muy aceptables teniendo en cuenta la separación entre emisor y receptor, además, la probabilidad de perder la detección es pequeña. Para una distancia de 10Km, los valores de la probabilidad de detección tienen unos valores muy poco seguros ya que oscilan entre 0.5 y 0.3 y la posible pérdida de la detección oscila entre valores muy altos.

Sin embargo, la probabilidad de falsa alarma y la probabilidad de no detectar nada en ausencia de señal tienen los valores más adecuados en la distancia de 10Km, esto se debe a la poca capacidad de detectar que se tiene a esta distancia.

Como conclusión, decir que este detector trabaja apropiadamente cuando la distancia entre emisor y receptor se encuentra entre 0 y 2Km aproximadamente. Además, este detector sufre mucho las variaciones de temperatura ya que no adquiere un comportamiento estable, por lo que resulta muy difícil predecir a que temperatura va a trabajar correctamente.

5.2. LÍNEAS FUTURAS.

El trabajo llevado a cabo en este proyecto puede incitar al desarrollo de nuevas líneas de investigación.

Como primera línea de investigación, se propone estudiar la eficiencia de este detector con la presencia de obstáculos en la línea de observación entre emisor y receptor. Además de la inserción de interferencias multicamino o pérdidas.

Como siguiente línea de investigación, se puede proponer el hecho de que el detector sea capaz de generar y detectar señales ATSC además de las WM. Hay que tener en cuenta que ATSC son señales de usuario primario, por lo que, el detector debe ser capaz de distinguir estos dos tipos de señales y añadir la prioridad adecuada.

Por último, destacar que este proyecto ha sido realizado en la Gottfried Wilhelm Leibniz Universität en Hannover, Alemania, y que las futuras líneas de investigación aquí mencionadas fueron propuestas para su realización pero por falta de tiempo no pudieron ser completadas en su totalidad.

6. FIGURAS.

Fig. [1]: Cuadro de asignación de frecuencias del espectro en los Estados Unidos.

Fig. [2]: Ejemplo de la ocupación de una banda de televisión a través del tiempo y la frecuencia.

Fig. [3]: Diagrama de bloques de una SDR.

Fig. [4]: Relación entre SDR y Radio Cognitiva.

Fig. [5]: Tabla sobre los niveles de funcionalidad de la Radio Cognitiva.

Fig. [6]: Ciclo Cognitivo.

Fig. [7]: Implementación del detector basado en la cicloestacionariedad.

Fig. [8]: a) Implementación del detector de energía en el dominio del tiempo b) implementación del detector de energía en el dominio de la frecuencia.

Fig [9]: Diagrama de bloques del detector de energía para señales WM.

Fig [10]: Diagrama de bloques de la generación de señales WM.

Fig. [11]: Selección de la banda base.

Fig. [12]: Filtro paso banda.

Fig. [13]: Circuito de un filtro paso banda.

Fig. [14]: Bloque de una FFT de 2048 puntos.

Fig. [15]: Bloque cuadrado y promediado.

Fig. [16]: Idea general del test estadístico.

Fig. [17]: Variación de la Probabilidad de detección conforme aumenta la distancia entre Tx y Rx.

Fig. [18]: Variación de la Probabilidad de detección perdida conforme aumenta la distancia entre Tx y Rx.

Fig.[19]: Probabilidad de falsa alarma en 10m conforme la temperatura aumenta.

Fig.[20]: Probabilidad de no detección en 10m conforme la temperatura aumenta.

Fig.[21]: Probabilidad de detección en 10m conforme la temperatura aumenta.

Fig.[22]: Probabilidad de detección perdida en 10m conforme la temperatura aumenta.

Fig.[23]: Probabilidad de falsa alarma en 1Km conforme la temperatura aumenta.

Fig.[24]: Probabilidad de no detección en 1Km conforme la temperatura aumenta.

Fig.[25]: Probabilidad de detección en 1Km conforme la temperatura aumenta.

Fig.[26]: Probabilidad de detección perdida en 1Km conforme la temperatura aumenta.

Fig.[27]: Probabilidad de falsa alarma en 10Km conforme la temperatura aumenta.

Fig.[28]: Probabilidad de no detección en 10Km conforme la temperatura aumenta.

Fig.[29]: Probabilidad de detección en 10Km conforme la temperatura aumenta.

Fig.[30]: Probabilidad de detección perdida en 10Km conforme la temperatura aumenta.

Fig.[31]: Probabilidad de falsa alarma conforme aumenta la temperatura.

Fig.[32]: Probabilidad de no detección conforme aumenta la temperatura.

Fig.[33]: Probabilidades de detección conforme la temperatura aumenta en función de la situación.

Fig.[34]: Probabilidades de pérdida de detección conforme la temperatura aumenta en función de la situación.

Fig.[35]: Probabilidad de detección en función de la temperatura.

Fig.[36]: Probabilidad de pérdida de detección en función de la temperatura.

Fig.[37]: Curva ROC.

7. REFERENCIAS.

- [1] G. Youngblood, "A Software-Defined Radio for the Masses, Part 1", The National Association for Amateur Radio, November 2002.
- [2] FCC, "Spectrum Politic Talk Force", <http://transition.fcc.gov/sptf/>.
- [3] FCC officially frees TV white space spectrum, http://en.wikipedia.org/wiki/White_spaces_%28radio%29
- [4] Wireless microphone signal detection using a compressive sensing technique for IEEE 802.22, http://wireless.vt.edu/symposium/2010/preliminarytechnicalprogram/Session%20III_2_Wireless%20Microphone_Tachwali.pdf, Second Report and Order and Memorandum Opinion and Order In the Matter of Unlicensed Operation in the TC Broadcast Bands, Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and in the 3 GHz Band, Federal Communication Commission, Document 08-260, Nov. 14, 2008S
- [5] Hüseyin Arslan, "Cognitive Radio, Software Defined Radio and Adaptative Wireless System."
- [6] Joseph Mitola, "The Software Radio", IEEE National Telesystems Conference, 1992 - Digital Object Identifier 10.1109/NTC.1992.267870
- [7] http://www.wirelessinnovation.org/page/Introduction_to_SDR
- [8] Wipro technology "Software Defined Radio, White paper", <http://www.broadcastpapers.com/whitepapers/WiproSDRadio.pdf?CFID=21641525&CFTOKEN=8a40b0992d28a1b2-DA5CFA3B-BA4B-0FDA-98280E8307D8724F>, Agosto 2002.
- [9] J. Mitola III, "Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio", PhD thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2000.
- [10] S. Haykin, "Cognitive Radio: brain-empowered wireless communications", IEEE Journal on Selected Areas in Communications 23 (2), pp. 201-220, 2005.
- [11] FCC, "Cognitive Radio", ET Docket No 03-108 R&O, <http://transition.fcc.gov/oet/cognitiveradio/>, Marzo 2005.
- [12] National Telecommunications and Information Administration, "Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient and Reliable Spectrum Use Employing Cognitive Radio Technologies", FCC ET Docket No. 03-108, Feb. 2005.
- [13] ITU Wp8A, "Working document towards a preliminary draft new report - Cognitive radio systems in the land mobile service", <http://www.itu.int/md/R03-WP8A-C-0555/en>.
- [14] IEEE USA, "Improving Spectrum Usage through Cognitive Radio Technology", IEEE USA Position, Nov. 2003.
- [15] IEEE 1900.1 Group, Draft Document, "Standard Definitions and Concepts for Spectrum Managment and Advanced Radio System Technologies", Jun. 2006.

[16] "Cognitive Radio Definition," Virginia Tech Cognitive Radio Work Group, http://support.mprg.org/dokuwiki/doku.php?id=cognitive_radio:definition.

[17] Report ITU-R SM.2152, "Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS)", http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-E.pdf, Sep. 2009.

[18] TRUST (Transparent Re-configurable Ubiquitous Terminal), ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/ist/docs/ka4/mob_trust.pdf, Mar. 2002.

[19] Hou-Shin Chen Wen Gao Daut, D.G. Dept. of Electr. & Comput. Eng., Rutgers Univ., Piscataway, NJ, "Spectrum Sensing for Wireless Microphone Signals", Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks Workshops, 2008. SECON Workshops '08. 5th IEEE Annual Communications Society Conference on, Jul. 2008

[19] Hou-Shin Chen Wen Gao Daut, D.G. Dept. of Electr. & Comput. Eng., Rutgers Univ., Piscataway, NJ, "Spectrum Sensing for Wireless Microphone Signals", Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks Workshops, 2008. SECON Workshops '08. 5th IEEE Annual Communications Society Conference on, Jul. 2008