



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# Desarrollo y análisis de antenas para un sistema de radio cognitiva en modo interweave

Miguel Ángel Saavedra Melo

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Bogotá, Colombia  
2018



# Desarrollo y análisis de antenas para un sistema de radio cognitiva en modo interweave

Miguel Ángel Saavedra Melo

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magíster en Ingeniería - Ingeniería Electrónica**

Director:  
Ing. Javier Leonardo Araque Quijano PhD

Línea de Investigación:  
Electrónica de Altas Frecuencias  
Grupo de Investigación:  
CMUN

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Bogotá, Colombia  
2018



“En todos los asuntos humanos hay esfuerzos y hay resultados, y la fortaleza del esfuerzo es la medida del resultado.”

James Allen



# Agradecimientos

Agradezco de manera especial a mi director de tesis, el profesor Javier Araque por todo su tiempo dedicado a ayudarme, por su enorme paciencia y por estar siempre dispuesto a resolver cada duda o inconveniente. Al Grupo de Investigación en Electrónica de Altas Frecuencias y Telecomunicaciones (CMUN) y mis compañeros de laboratorio, en particular a Germán Ramírez, de quien recibí innumerables y valiosos consejos y correcciones. A mi familia, a mi madre Cecilia Melo y hermano Manuel por ser ese apoyo incondicional y constante con el que siempre cuento, y a Enrique Lindarte por ser esa voz de aliento en los momentos difíciles.

Y por supuesto agradezco también a la Universidad Nacional de Colombia, mi Alma Mater, la cual me ha permitido formarme profesionalmente y de la que preservo recuerdos memorables.



## Resumen

En este documento se presentan los resultados del diseño de antenas reconfigurables en frecuencia para su uso en sistemas de radio cognitiva en modo entrelazado. Primero se indaga por el estado del arte de los sistemas de radio cognitiva, de las técnicas de reconfiguración de antenas, de los sistemas de radio definidos por software (SDR), y de las técnicas de detección de espectro. En seguida se detallan el problema a resolver y los objetivos propuestos. Después se muestran los diseños, simulaciones e implementaciones realizadas y las consideraciones y criterios de decisión y uso en cada caso. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos que efectivamente validan el correcto funcionamiento del sistema propuesto, junto con algunas conclusiones y se proponen algunos temas para trabajo futuro.

**Palabras clave:** antena eléctricamente reconfigurable, radio cognitiva, sensado dinámico de espectro, optimización de antenas, conmutadores de microondas.

## Abstract

In this document the results of the design of reconfigurable antennas in frequency for use in cognitive radio systems in interweave mode are presented. First, it explores the state of the art of cognitive radio systems, antenna reconfiguration techniques, software defined radio systems (SDR), and spectrum detection techniques. Next, the problem to be solved and the proposed objectives are detailed. After showing the designs, simulations and complete implementations with the criteria of decision and use of considerations in each case. Finally, the results obtained and some conclusions are presented, and some topics are proposed for future work.

**Keywords:** electrically reconfigurable antenna, cognitive radio, switching element, spectrum sensing, antenna optimization.

# Lista de Figuras

2-1. Modo de operación subyacente (underlay) [39]. . . . .	3
2-2. Modo de operación entrelazado (interweave) [39]. . . . .	4
2-3. Ciclo cerrado de un sistema CR [39]. . . . .	4
2-4. Principales técnicas de reconfiguración de antenas [17]. . . . .	7
2-5. Antena reconfigurable en frecuencia con MEMS [22]. . . . .	9
2-6. Antena reconfigurable en frecuencia con diodos PIN [35]. . . . .	10
2-7. Geometría final de radiador diseñado en [32]. . . . .	10
2-8. Parámetro de reflexión de la antena presentada en [32]. . . . .	11
2-9. Antena reconfigurable en frecuencia con diodos Varactores [42]. . . . .	11
2-10. Antena MIMO reconfigurable en frecuencia presentada en [40]. . . . .	12
2-11. Parámetros $S_{11}$ y $S_{21}$ de la antena MIMO reconfigurable en frecuencia presentada en [40]. . . . .	13
2-12. Arquitectura ideal del SDR [25]. . . . .	14
2-13. Arquitectura práctica de un SDR [5]. . . . .	14
2-14. Estructura de GNU Radio y la USRP [10]. . . . .	16
2-15. USRP N210 [7]. . . . .	17
2-16. USRP B210 [7]. . . . .	17
2-17. Arquitectura de la USRP B210 [7]. . . . .	18
2-18. Identificación de espacios en blanco usando base de datos [1]. . . . .	19
2-19. Identificación de espacios en blanco usando beacons [1]. . . . .	20
2-20. Problema de Nodo Oculto [21]. . . . .	21
2-21. Detector de Energía [31]. . . . .	22
4-1. Metodología utilizada. . . . .	27
4-2. Circuito recomendado por el fabricante para el interruptor de conmutación elegido [9]. . . . .	29
4-3. Diseño de interruptor de conmutación propuesto inicialmente. . . . .	30
4-4. Pruebas iniciales realizadas con el interruptor. . . . .	30
4-5. Diseño final del interruptor de conmutación elegido. . . . .	31
4-6. Simulación en bloques de la estructura luego de la simulación <i>full wave</i> . . . . .	31
4-7. Resultados de simulación obtenidos para el diseño final. . . . .	32
4-8. Resultados de medición del interruptor en su estado encendido. . . . .	33
4-9. Resultados de medición del interruptor en su estado apagado. . . . .	33

---

4-10.Optimización Global: algoritmo genético [3]. . . . .	35
4-11.Estructura base realizada en GID. . . . .	36
4-12.Geometría original obtenida en la optimización. . . . .	37
4-13.Geometría final modificada. . . . .	38
4-14.Estructura de la antena simulada en CST. . . . .	39
4-15.Simulación de los escenarios 1 a 3. . . . .	39
4-16.Simulación de los escenarios 4 a 6. . . . .	40
4-17.Simulación de los escenarios 7 a 9. . . . .	40
4-18.Patrón de radiación de la antena alimentando el puerto 1 con $\theta = 90^\circ$ . . . . .	41
4-19.Patrón de radiación de la antena alimentando el puerto 1 con $\phi = 90^\circ$ . . . . .	41
4-20.Patrón de radiación de la antena alimentando el puerto 1 con $\theta = 90^\circ$ . . . . .	42
4-21.Patrón de radiación de la antena alimentando el puerto 2 con $\phi = 90^\circ$ . . . . .	42
4-22.Interfaz del detector de señal. . . . .	43
4-23.Diagrama de bloques del detector de energía. . . . .	45
4-24.Implementación del detector de energía en GNU Radio. . . . .	45
5-1. Photoplotter, Insoladora y Splash Center, algunos de los equipos utilizados para la fabricación de la antena. . . . .	48
5-2. Proceso de fabricación de la antena y el circuito de control de interruptores. . . . .	49
5-3. Prototipo final de la antena y el circuito de control de interruptores. . . . .	50
5-4. Comportamiento de la antena medidos para los escenarios 1 a 3. . . . .	51
5-5. Comportamiento de la antena medidos para los escenarios 4 a 6. . . . .	52
5-6. Comportamiento de la antena medidos para los escenarios 7 a 9. . . . .	52
5-7. Diagrama de bloques del transmisor de audio cognitivo. . . . .	53
5-8. Diagrama de bloques del receptor de audio. . . . .	53
5-9. Experimento en diagrama de bloques. . . . .	53
5-10.Fotografía del experimento completo. . . . .	54
5-11.Fotografía de la antena CR con la tarjeta <i>Arduino Mega 2560</i> y una <i>USRP B210</i> . . . . .	54
5-12.Espectro Medido con US en 3 GHz. . . . .	55
5-13.Espectro Medido con US en 3.5 GHz. . . . .	55
5-14.Espectro Medido con US en 4 GHz. . . . .	56

# Lista de Tablas

2-1. Comparación de métodos de detección. . . . .	23
4-1. Comparación de algunos interruptores de conmutación en RF consultados. .	28
4-2. Escenarios de operación de la antena. . . . .	37

# Contenido

<b>Agradecimientos</b>	<b>vii</b>
<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Abreviaturas</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Marco teórico y estado del arte</b>	<b>2</b>
2.1 Sistemas de Radio Cognitiva (RC) . . . . .	2
2.1.1 Definición y principios de un sistema RC . . . . .	2
2.1.2 Modos de operación de un sistema RC . . . . .	2
2.1.3 Ciclo de Radio Cognitiva . . . . .	3
2.2 Antenas reconfigurables . . . . .	5
2.2.1 Tipos de reconfigurabilidad en antenas . . . . .	7
2.2.2 Reconfiguración de respuesta en frecuencia de antenas para Radio Cognitiva . . . . .	8
2.3 Radio Definido por Software (SDR) . . . . .	13
2.3.1 Definición de SDR . . . . .	13
2.3.2 Herramienta de software . . . . .	15
2.3.3 Herramienta de hardware . . . . .	15
2.4 Detección de espectro . . . . .	18
2.4.1 Métodos de identificación de espacios en blanco . . . . .	19
2.4.2 Métodos de detección de espectro . . . . .	20
<b>3 Planteamiento del problema y Objetivos</b>	<b>24</b>
3.1 Descripción del problema . . . . .	24
3.2 Objetivos . . . . .	25
3.2.1 Objetivo General . . . . .	25
3.2.2 Objetivos Específicos . . . . .	25
<b>4 Sistema de radio cognitiva en modo interwave</b>	<b>26</b>
4.1 Elemento conmutador para reconfiguración en frecuencia de la antena . . . . .	28
4.1.1 Comparación de distintas tecnologías . . . . .	28
4.1.2 Interruptor elegido . . . . .	28

---

4.2	Software de optimización de antenas y Antena obtenida . . . . .	34
4.2.1	Software utilizado . . . . .	34
4.2.2	Estructura base propuesta y optimización elegida . . . . .	35
4.2.3	Simulación Fullwave . . . . .	37
4.3	Detección de espectro . . . . .	43
4.3.1	Detector de señal . . . . .	43
4.3.2	Flujo de proceso en GNU Radio . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Pruebas experimentales y Resultados</b>	<b>47</b>
5.1	Proceso de fabricación . . . . .	47
5.2	Control de los elementos conmutadores y reconfigurabilidad de la antena . . . . .	47
5.3	Resultados . . . . .	49
<b>6</b>	<b>Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>57</b>
6.1	Conclusiones . . . . .	57
6.2	Trabajo futuro . . . . .	58
	<b>Bibliografía</b>	<b>59</b>

# Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
<i>CR</i>	Radio cognitiva
<i>RF</i>	Radio frecuencia
<i>UP</i>	Usuario primario
<i>US</i>	Usuario secundario
<i>NB</i>	Narrow Band
<i>WB</i>	Wide Band
<i>UWB</i>	Ultra Wide Band
<i>SDR</i>	Radio definido por software
<i>USRP</i>	Universal Software Radio Peripheral
<i>SPST</i>	Single Pole Single Trough
<i>SPDT</i>	Single Pole Double Trough
<i>CPWG</i>	Coplanar Waveguide with Lower Ground Plane
<i>WBFM</i>	Wide Band Frequency Modulation

# 1 Introducción

El crecimiento exponencial de los servicios de comunicaciones inalámbricas ha generado una alta tasa de transmisión de datos en una variedad de servicios que incluye, entre otros, llamadas de audio/video de alta calidad, transmisiones de video en línea y en directo, videoconferencias y juegos en línea. Dichos servicios utilizan el espectro en bandas fijas atendiendo a diferentes estándares establecidos, lo que ha generado un uso dinámico pero ineficiente de recursos altamente subutilizados; ello ocurre ya que la ocupación entre las varias aplicaciones inalámbricas no está adecuadamente distribuida: algunas partes están usadas en exceso, mientras otras raramente son empleadas, lo cual ha conducido a un problema de uso desbalanceado [39]. Así pues, es evidente la necesidad de lograr un sistema inalámbrico inteligente que consiga una utilización eficaz del espectro disponible, reconociendo y adaptándose apropiadamente al comportamiento espectral de su entorno. Para lograrlo se debe hacer frente a grandes desafíos en distintos niveles, incluyendo la búsqueda de las técnicas más apropiadas para elegir la mejor opción entre un grupo de bandas de frecuencias a través del aprendizaje de experiencias previas; la elección o la creación de un protocolo que permita la correcta comunicación entre dispositivos; o la obtención de las antenas adecuadas (para observar el espectro o para establecer el canal de comunicaciones), lo cual es uno de los mayores retos.

Así pues, con el fin de contribuir a la búsqueda y mejora del mencionado sistema inalámbrico, en este proyecto se presenta la validación de antenas eléctricamente reconfigurables en frecuencia para su uso en sistemas de radio cognitiva en modo entrelazado, integradas, con un tamaño y peso comparativamente pequeños y con una cantidad importante de estados reconfigurables, lo que se traduce en disminución de costos de fabricación y adaptabilidad a mayor número de aplicaciones. El documento está organizado en cinco capítulos, en el primero se presentan algunas definiciones importantes y se realiza una revisión del estado del arte sobre los sistemas de radio cognitiva, las antenas reconfigurables, los radios definidos por software y las técnicas de detección de espectro, en el segundo se presenta el problema planteado y los objetivos propuestos, en el capítulo tres se presentan los diseños, simulaciones e implementaciones realizadas del elemento conmutador, de la antena reconfigurable y el algoritmo de detección de espectro, en el cuarto capítulo se presentan las pruebas experimentales realizadas y los consecuentes resultados obtenidos, y finalmente en el quinto capítulo se mencionan algunas conclusiones y se presenta trabajo futuro.

## 2 Marco teórico y estado del arte

### 2.1. Sistemas de Radio Cognitiva (RC)

#### 2.1.1. Definición y principios de un sistema RC

Un sistema de radio cognitiva (CR) presenta una solución potencial para los sistemas de comunicaciones inalámbricas del futuro, ya que permite mejorar el uso del espectro al interactuar con el entorno operante, haciéndolo eficiente y, más importante aún, minimizando el problema del espectro saturado [39]. Este sistema tiene la habilidad de ser consciente del uso del espectro (identificando alguna parte que no esté ocupada) y, además, posee la capacidad de conmutar para operar entre diferentes bandas de frecuencia desocupadas, logrando un modelo óptimo de comunicaciones al asignar los canales apropiados para ser usados [26]. La interfaz de un sistema CR consiste en dos tipos de antenas: una antena de detección, típicamente de Ultra Wide-Band (UWB) y una antena de comunicaciones típicamente reconfigurable. La función de la antena de detección es la de identificar bandas libres en todo el espectro de interés, mientras la antena de comunicaciones cambia dinámicamente su frecuencia de operación para establecer canales de comunicación en dichas bandas y así utilizar eficientemente el ancho de banda disponible [20].

En un sistema CR se deben identificar dos tipos de usuarios: primarios (UP) y secundarios (US). Los usuarios primarios ya están asignados en partes específicas del canal y tienen derecho al libre acceso a este en algún tiempo dado; sin embargo, no están activos todo el tiempo y no necesariamente ocupan todo el canal, por lo que el sistema puede alojar a los usuarios secundarios, a los cuales se les permitirá usar partes del canal que no están ocupadas por los usuarios primarios o partes en las que sean tolerados por estos (dependiendo el nivel de interferencia que generen). Es decir, en un sistema CR los usuarios secundarios son dinámicamente asignados para ocupar partes específicas del espectro, dependiendo de la actividad de los usuarios primarios [41, 23].

#### 2.1.2. Modos de operación de un sistema RC

Un sistema CR puede operar en dos modos diferentes: subyacente (*underlay*) y entrelazado (*interweave*).

### Modo subyacente (underlay)

En este modo de operación, que se muestra en la figura 2-1 los usuarios primarios pueden compartir canal con algún o algunos usuarios secundarios, pero hay restricciones de potencia para los usuarios secundarios que compartan canal y, además, si algún usuario primario no tolera compartir su canal, los usuarios secundarios son forzados a transmitir en todas las bandas excepto en las que se ubican dichos usuarios primarios [16, 24].

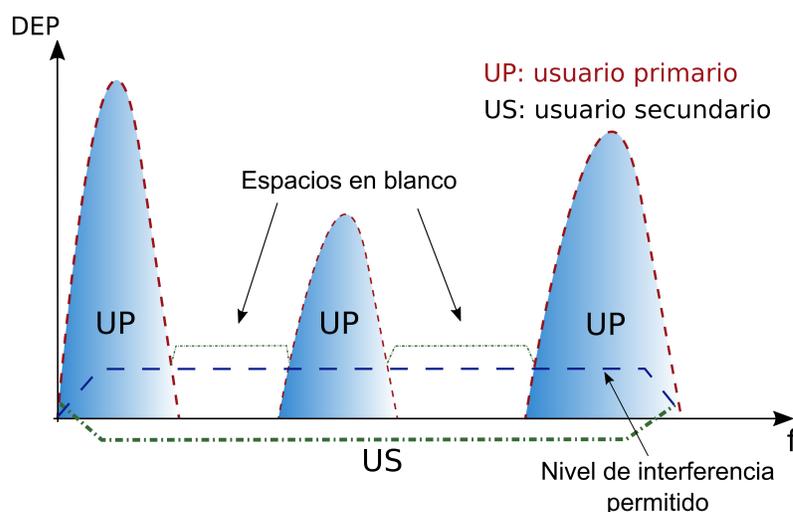


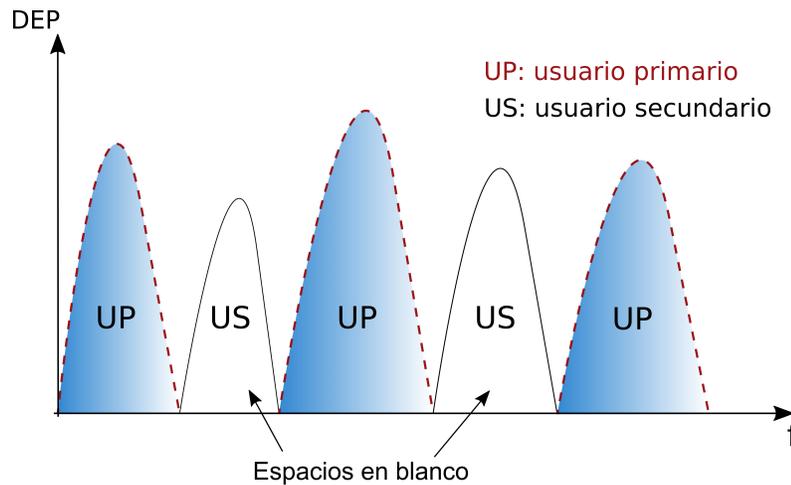
Figura 2-1: Modo de operación subyacente (underlay) [39].

### Modo entrelazado (interweave)

Para este caso los usuarios primarios no comparten su canal con usuarios secundarios, así que la función principal del sistema consiste en encontrar espacios del espectro que no estén ocupados (espacios en blanco) y, en función de esto, decidir qué espacio de los encontrados será asignado al usuario secundario que lo solicite, el cual podrá utilizarlo sin ninguna restricción de potencia. Este modo de operación se ilustra en la figura 2-2.

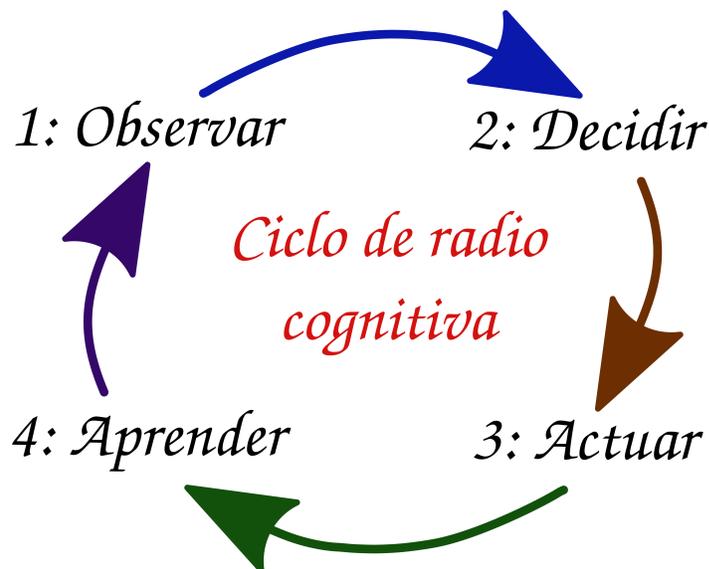
#### 2.1.3. Ciclo de Radio Cognitiva

Para ambos escenarios se sigue un ciclo básico de cuatro etapas: observación, decisión, acción y aprendizaje, como se muestra en la figura 2-3. La observación consiste en revisar la actividad de la banda de interés: en el modo interweave se puede hacer detección de banda ancha (se registra toda la banda al mismo tiempo) o angosta (se hace un barrido consecutivo en secciones de la banda), y en el modo underlay solo se hace censado de banda ultra ancha. En la decisión se utilizan los datos adquiridos en la etapa previa para determinar los espacios en blanco o clasificar a los usuarios presentes en función de su tolerancia a los niveles de interferencia (dependiendo del modo de operación), para escoger la parte del espectro que será



**Figura 2-2:** Modo de operación entrelazado (interweave) [39].

asignada al usuario secundario que la solicitó. En la etapa de acción se realiza la adecuación (reconfiguración) del sistema, dependiendo de la decisión tomada para que la transmisión en el canal escogido se pueda realizar. Finalmente, en la etapa de aprendizaje, se generan registros acerca de la actividad del canal para ser tenidos en cuenta posteriormente y así predecir resultados futuros [23].



**Figura 2-3:** Ciclo cerrado de un sistema CR [39].

El motor CR (*spectrum manager*) es considerado el cerebro del sistema y es el responsable de “manejar” e integrar esas cuatro etapas, procesando todos los algoritmos que incluyen la detección, el análisis y la clasificación, la reconfiguración de hardware, el manejo de niveles

de potencia (según el caso) y el aprendizaje [38, 40].

## 2.2. Antenas reconfigurables

Para caracterizar cualquier antena, incluida una reconfigurable, se requiere de dos datos: su respuesta en frecuencia (impedancia característica de entrada en términos de la frecuencia) y su patrón de radiación. Generalmente, la respuesta en frecuencia debe considerarse primero porque es necesaria una buena adaptación de impedancia de entrada para que el sistema transmisor no sufra reflexiones severas que podrían dañar otros componentes y malgastar energía, mientras que los sistemas receptores sufrirán una sensibilidad reducida y requerirán amplificación de señal adicional.

La respuesta en frecuencia de una antena está definida como la impedancia de entrada en función de la frecuencia. La impedancia de entrada compleja ( $Z_{in}(\omega) = R(\omega) + jX(\omega)$ ) permite considerar la antena como un elemento circuital y puede usarse para determinar la relación de voltaje de onda estacionaria ( $VSWR$ ), la pérdida de retorno ( $RL$ ) y el coeficiente de reflexión ( $\Gamma$ ) en términos de la frecuencia [29]:

$$\Gamma = \frac{Z_{in}(\omega) - Z_0}{Z_{in}(\omega) + Z_0} \quad (2-1)$$

$$VSWR = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{i}n}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2-2)$$

$$RL = -20 \log_{10}(|\Gamma|) \text{ (dB)} \quad (2-3)$$

Históricamente las antenas se han fabricado para tener impedancias de entrada lo más cercanas posible a  $50 \Omega$ , lo que se traduciría en un coeficiente de reflexión de cero, un  $VSWR$  de uno y un  $RL$  de infinito en un sistema normalizado a  $50 \Omega$ . Esta práctica común ha permitido la estandarización de los equipos de prueba, de los conectores, cables y otras conexiones que simplifican el ensamblaje de un sistema completo. Se debe tener en cuenta, sin embargo, que si el diseño de la antena es parte de un diseño de un sistema más grande, no es necesario que todo el sistema se base en una referencia de  $50 \Omega$ .

La primera referencia en la literatura acerca de antenas reconfigurables apareció en 1983, publicada por Schaubert [34], y paulatinamente se han empezado a estudiar su potencial uso en una variedad de aplicaciones entre las que se encuentran sistemas Multiple In - Multiple

Out (MIMO), aplicaciones satelitales y, por supuesto, los sistemas de radio cognitiva.

Existen varias ventajas al usar antenas reconfigurables: la posibilidad de soportar varios estándares para comunicaciones inalámbricas, el excelente desempeño en sistemas SDR (Software Defined Radio) y su multifuncionalidad (operar en banda angosta o ancha, operar como elemento único o como parte de un arreglo, etc.). Por otra parte, los principales costos al utilizar este tipo de antenas están relacionados con el incremento en la complejidad de su estructura y en el consumo de potencia al incorporar elementos activos para lograr la reconfiguración deseada; así como la generación de armónicos y la necesidad de una sintonización más rápida en la antena para que el sistema funcione adecuadamente [17].

La reconfigurabilidad de antenas es la capacidad de cambiar las características operativas fundamentales de un radiador individual con la ayuda de dispositivos eléctricos, ópticos, mecánicos, o incluso usando materiales inteligentes. Una antena reconfigurable en rigor debe por ser capaz de cambiar su ancho de banda, frecuencias de operación, patrones de radiación y/o polarizaciones de manera autónoma para adaptarse a las condiciones de operación que son dinámicas [11, 13]. Sin embargo, lograr dicha reconfigurabilidad supone grandes retos para quien diseña antenas y sistemas, que incluyen la obtención de la funcionalidad buscada en la antena y su integración en sistemas completos para generar soluciones eficientes, lo cual muy seguramente implicará costos importantes en las tecnologías necesarias para la reconfigurabilidad, más que en la antena, como ocurre generalmente [12].

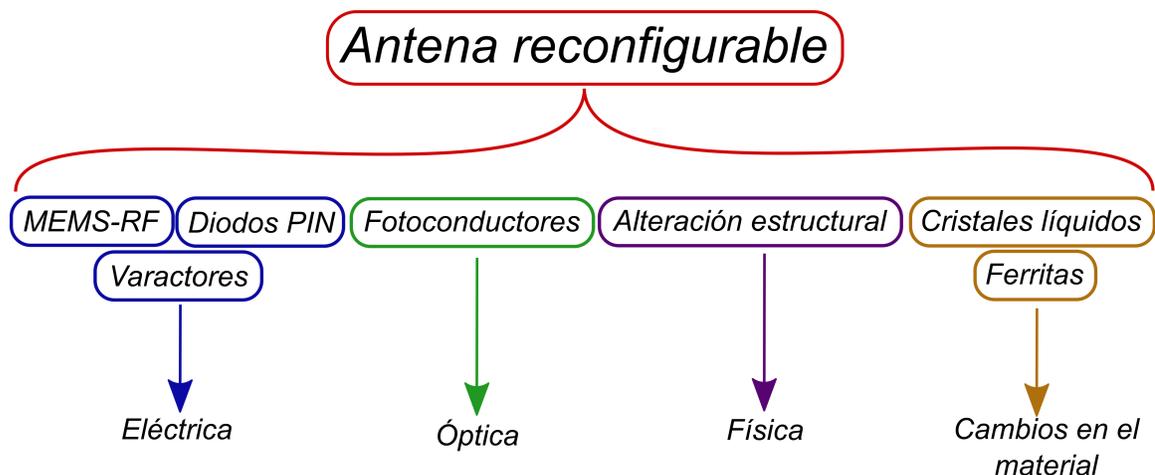
Los escenarios en los cuales es útil lograr la reconfiguración de una antena son variados. En aquellos que solo utilizan un elemento radiador, como en un GPS, un teléfono celular, una tableta o un computador portátil, se utilizan antenas individuales como monopolos o microstrips, que pueden o no tener varias bandas de operación. En estos casos, la transmisión desde el dispositivo a algún punto de acceso es la parte más débil del enlace de comunicación porque al ser portable está sometido a considerables restricciones de volumen, costo y potencia radiada. Adicionalmente, las condiciones de operación del equipo pueden ser difíciles de predecir lo que reduce el rendimiento de la antena, pero si esta es reconfigurada, se podría por ejemplo resintonizar a una banda más adecuada, cambiar su patrón de radiación o filtrar señales de interferencia y así mejorar su desempeño. En los arreglos de antenas por su parte, generalmente se asume que el patrón de cada elemento de la antena es fijo, que todos los elementos son idénticos entre sí y que los elementos se encuentran dispuestos en una grilla uniforme; pero si se incorpora reconfigurabilidad al arreglo se pueden lograr grados de libertad adicionales que pueden dar como resultado volúmenes de exploración más extensos, mayores anchos de banda de frecuencia instantáneos y mejores patrones de radiación (distribuciones de lóbulos laterales más adecuadas) [12].

Es importante resaltar que el hecho de utilizar reconfigurabilidad en una antena crea la

necesidad de un control más complejo sobre la misma, puede ser necesario un delicado procesamiento de señal y la adición de circuitos de retroalimentación lo que implicará la inclusión de más componentes y procesos de fabricación más complejos. Además, la integración de reconfigurabilidad en las antenas no generará automáticamente un rendimiento más alto y costos menores; se tendrán nuevos grados de libertad para ser explorados con el fin de lograr que la antena se convierta en una parte más activa del enlace de comunicación [12].

### 2.2.1. Tipos de reconfigurabilidad en antenas

Se pueden usar varios mecanismos para lograr la reconfiguración de la antena, aunque unos son más efectivos que otros en cuanto a mantener las mismas características de radiación respecto a la antena original. Para lograr los cambios en la antena que la hacen reconfigurable se pueden utilizar varias técnicas. Las principales son la eléctrica, la óptica, la física y el uso de materiales inteligentes, como se observa en la figura 2-4.



**Figura 2-4:** Principales técnicas de reconfiguración de antenas [17].

En términos generales, cualquiera de las técnicas conduce a modificar las corrientes que fluyen a través de la antena y, de esta manera, modifican también los campos electromagnéticos que esta genera para así poder adaptarse a los cambios en las condiciones de su entorno o a los requerimientos de su sistema [17]. Sin importar la técnica escogida, cuando se procede a diseñar la antena reconfigurable siempre existirán tres preguntas principales que se deben responder:

1. ¿Qué característica de la antena debe ser modificada (su patrón de radiación, su frecuencia de operación, su polarización)?

2. ¿Cómo se pueden reconfigurar los elementos radiantes de la antena para lograr la modificación de la característica requerida?
3. ¿Cuál es la técnica de reconfiguración que menos afecta las características de radiación o de impedancia de la antena?

Así pues, la elección de la mejor alternativa para el diseño de las antenas dependerá de la respuesta a estas preguntas (y de otras consideraciones técnicas y económicas).

### **2.2.2. Reconfiguración de respuesta en frecuencia de antenas para Radio Cognitiva**

Las antenas reconfigurables en frecuencia, o sintonizables, pueden ser clasificadas como continuas o conmutadas [12]. Las antenas sintonizables continuas realizan transiciones suaves dentro o entre bandas de operación, las antenas sintonizables conmutadas, por su parte, usan algún método de conmutación para operar en bandas de frecuencia distintas, que además pueden estar separadas entre sí. Los dos tipos de antenas sintonizables comparten una teoría común para su operación y su reconfiguración, la principal diferencia es la longitud efectiva que permite el funcionamiento en diferentes bandas de frecuencia y la forma utilizada para lograrla.

#### **Elementos de conmutación utilizados**

Una antena reconfigurable eléctricamente se basa en componentes electrónicos como diodos PIN, varactores, RF-MEMS (Radio Frequency Microelectromechanical System) y otros tipos de interruptores que se encargan de redistribuir las corrientes superficiales de la estructura y alterar la topología de la estructura radiante de la antena y/o los bordes radiantes. Esta es una de las alternativas más fáciles de implementar para reconfigurar antenas, a pesar de los problemas asociados [17].

La integración de los interruptores en la estructura de la antena facilita que se alcance la funcionalidad reconfigurable deseada. La facilidad de integración de tales elementos de conmutación en la estructura de la antena ha hecho atractivas a este tipo de antenas reconfigurables a pesar de los numerosos problemas que rodean tales técnicas de reconfiguración, que incluyen la interferencia, las pérdidas de señal, los efectos indeseados de las líneas de transmisión para controlar los interruptores, los efectos no lineales de los interruptores y el efecto negativo de las líneas de polarización utilizadas para controlar el estado de los componentes de conmutación en el diagrama de radiación de la antena. A continuación, se describen tres tipos diferentes de antenas reconfigurables eléctricamente, cada ejemplo discute el uso

de una técnica de reconfiguración diferente para alcanzar la función correspondiente [17].

En [22] se muestran los resultados de una antena reconfigurable basada en RF-MEMS, en la figura 2-5 está la antena espiral rectangular reconfigurable con un conjunto de interruptores RF-MEMS, que están integrados monolíticamente y empaquetados en el mismo sustrato. La antena está impresa en un sustrato de placa de circuito impreso (PCB) con una constante dieléctrica de 3.27 y alimentada a través de un cable coaxial en su punto central. La estructura consta de cinco secciones que están conectadas con cuatro conmutadores RF-MEMS. El brazo espiral se incrementa mediante pasos discretos de la siguiente manera:  $U$ ,  $2U$ ,  $2U$ ,  $3U$ ,  $3U$ , ...,  $NU$ , donde  $U$  es la longitud del primer segmento de la espiral rectangular y  $N$  es un número entero. Se incrementa siguiendo la dirección de la mano derecha para proporcionar polarización circular a la derecha para el campo radiado. La ubicación de los interruptores está determinada por la relación axial y la ganancia de la antena son óptimas a la frecuencia de interés. En función del estado del RF-MEMS integrado, la antena puede cambiar la dirección del haz de radiación.

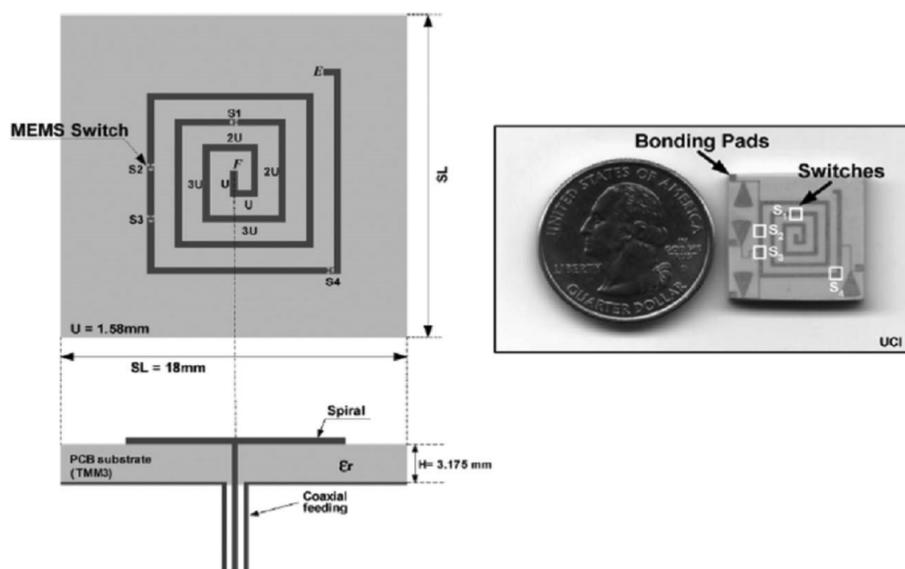
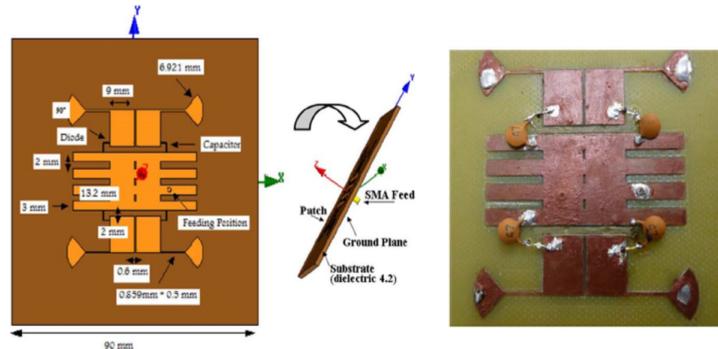


Figura 2-5: Antena reconfigurable en frecuencia con MEMS [22].

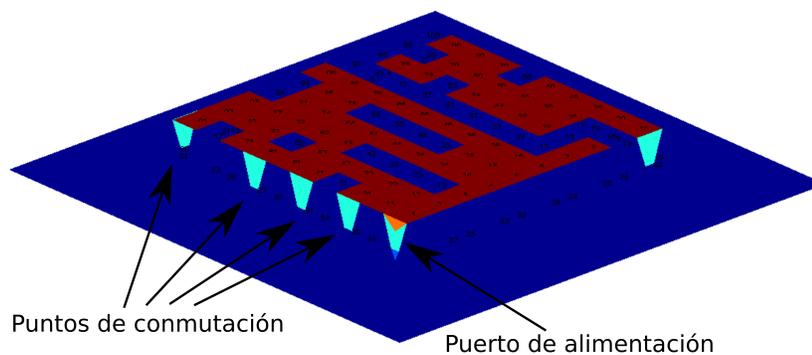
Un ejemplo de antenas reconfigurables basadas en diodos PIN se presenta en [35], en este caso la activación de los interruptores se automatiza a través de una FPGA. La estructura de la antena consta de tres capas, la capa inferior es un plano de tierra que cubre todo el sustrato, el sustrato medio tiene una constante dieléctrica de 4.2 y un espesor de 0.235 cm. Las variaciones en la configuración se logran a través de conmutadores controlables individualmente, cada uno implementado como un diodo PIN. El prototipo de antena fabricado se muestra en la figura 2-6. La antena ajusta su frecuencia de funcionamiento y patrón de

de radiación de acuerdo con las cuatro combinaciones de interruptor.



**Figura 2-6:** Antena reconfigurable en frecuencia con diodos PIN [35].

Otro ejemplo de este tipo de antena se presenta en [32]. En este trabajo se describen el diseño, la fabricación y la validación experimental de una antena compacta reconfigurable en frecuencia usando diodos PIN como interruptores, la antena se reconfigura en la banda de 1.7 a 2.7 GHz y para su diseño se utilizaron técnicas de optimización evolutiva. En las figuras 2-7 y 2-8 se presentan el diseño final obtenido y el comportamiento medido de la antena, que demuestra la validación del concepto que integra la metodología del diseño, la optimización y la fabricación.



**Figura 2-7:** Geometría final de radiador diseñado en [32].

Una antena reconfigurable basada en varactores de ranura y anillo con polarización simple y doble con ajuste de banda ancha utilizando diodos varactor se han demostrado en [42]. La antena de polarización simple sintoniza desde 0,95 a 1,8 GHz con pérdidas de retorno de 13 dB. Ambas polarizaciones de la antena se sintonizan de 0,93 a 1,6 GHz, independientemente, con una pérdida de retorno superior a 10 dB y un aislamiento puerto a puerto superior a 20 dB en la mayor parte del rango de sintonización. La capacitancia de los diodos varactores

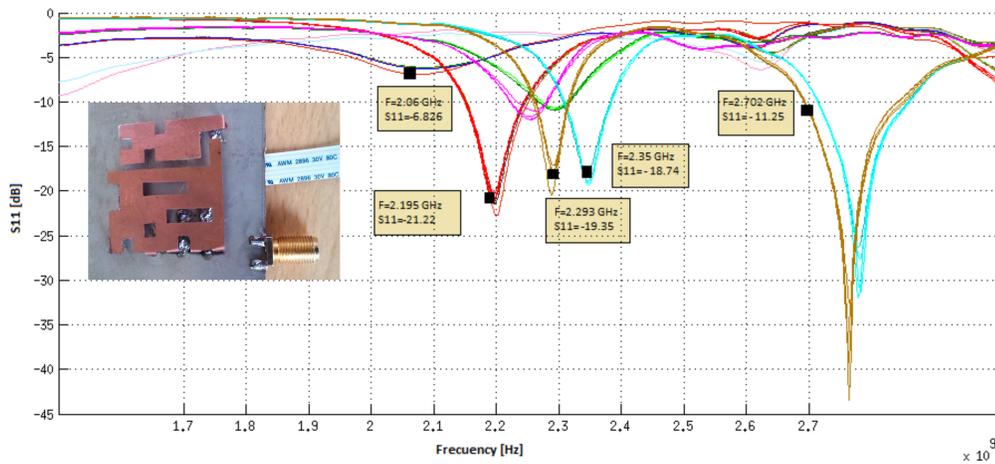


Figura 2-8: Parámetro de reflexión de la antena presentada en [32].

varía de 0.45 a 2.5 pF. Las antenas están impresas en sustratos de en  $70 \times 70 \times 0,787 \text{ mm}^3$  con una constante dieléctrica de 2.2. La antena de doble anillo polarizado se puede hacer tanto de polarización de frecuencia como de manera simultánea, o puede operar a dos frecuencias independientes en dos polarizaciones ortogonales. En la figura 2-9 se muestra la estructura de antena correspondiente para antenas de anillo ranurado monopolarizado y doble.

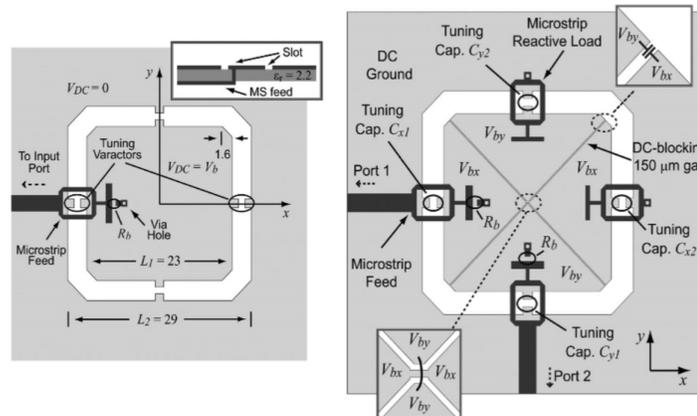


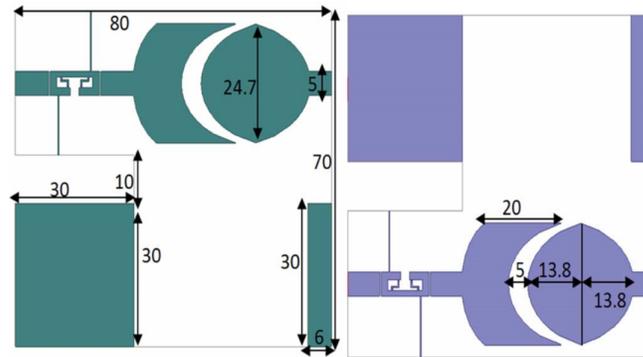
Figura 2-9: Antena reconfigurable en frecuencia con diodos Varactores [42].

### Antecedentes sobre antenas eléctricamente reconfigurables

Dado que el diseño de antenas para aplicaciones de CR es un tema de gran interés en la implementación de este tipo de sistemas, el énfasis se ha centrado en el diseño de una antena de comunicaciones reconfigurable, utilizando interruptores de microondas con una antena de

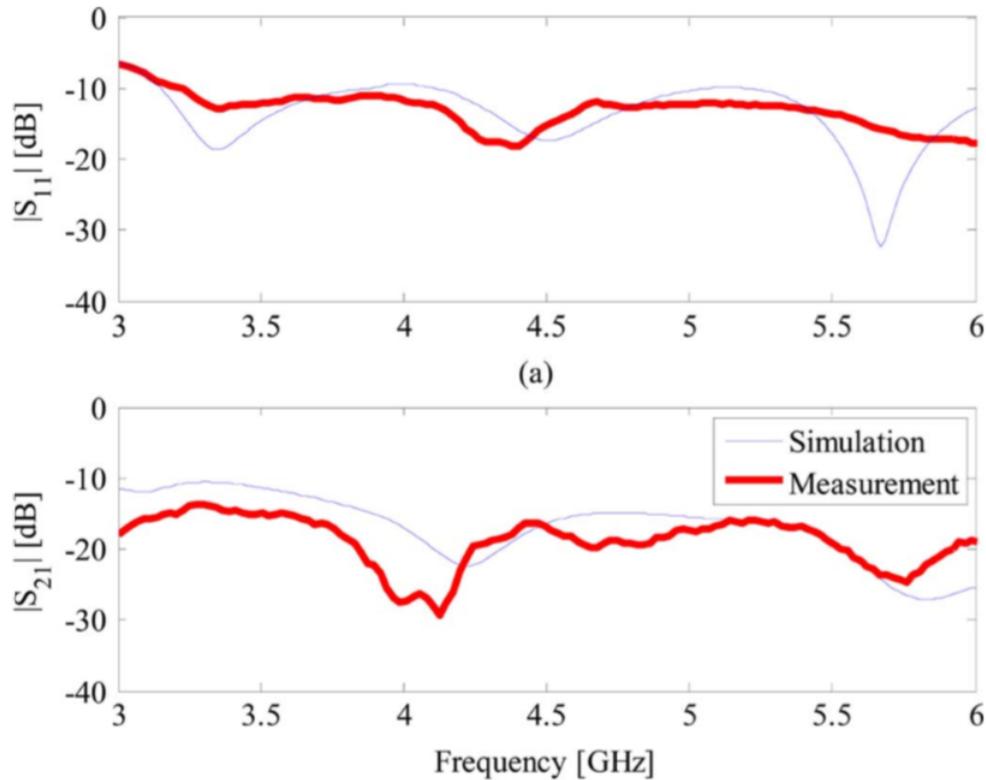
detección UWB en la banda de interés; no obstante, continúan siendo extensos los esfuerzos pendientes relacionados con la obtención de sistemas con antenas más compactas, integradas, en los que ambas puedan reconfigurarse, y que cuenten con una cantidad significativa de estados.

Los estudios en [16, 24], por ejemplo, muestran antenas reconfigurables de comunicaciones pero no las antenas de detección; en [37, 38] se presentan antenas reconfigurables de comunicación embebidas en las de detección, sin embargo no son suficientemente compactas y los estados reconfigurables son escasos. En [40] por su parte, se presentan antenas MIMO para los dos modos de operación de CR, aunque de nuevo con antena de detección de banda ancha en modo interweave y con una antena de comunicación embebida en la de detección (que es de nuevo una UWB) en modo underlay, las cuales, al ser MIMO, adquieren un gran tamaño ( $70 \times 80 \text{ mm}$ ), el diseño y los parámetros S obtenidos se muestran en las figuras 2-10 y 2-11.



**Figura 2-10:** Antena MIMO reconfigurable en frecuencia presentada en [40].

Construir las dos antenas eléctricamente reconfigurables en frecuencia permite corregir en tiempo real errores de transmisión y recepción de la información y, además, logra una significativa reducción del tamaño, el peso y el volumen finales del sistema, lo que se traduce en una disminución de costos de fabricación y en una adaptabilidad a mayor número de aplicaciones. Además, el modo interweave permite una administración adecuada del espectro sin la necesidad de hacer análisis de protocolo para respetar las especificaciones particulares de cada sistema de comunicación primario encontrado en la banda; ello ya que no siempre es necesario, como se puede leer por ejemplo en [28], donde se justifica el despliegue de tecnologías como los sistemas CR en algunas zonas urbanas como la de Bogotá ya que se demuestra que dentro del rango de frecuencias de 54 MHz a 6 GHz el espectro está altamente subutilizado por parte de los usuarios primarios y también que existen vastos espacios en blanco en el mismo rango. Por todo lo anterior, es viable la propuesta de diseñar y fabricar antenas eléctricamente reconfigurables en frecuencia, integradas (esto es, que el elemento radiante sea común a ambas antenas), con un tamaño comparativamente pequeño y con una



**Figura 2-11:** Parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$  de la antena MIMO reconfigurable en frecuencia presentada en [40].

cantidad importante de estados reconfigurables, y evaluar su desempeño en un sistema CR en modo interweave.

## 2.3. Radio Definido por Software (SDR)

### 2.3.1. Definición de SDR

Radio Definido por Software (SDR, por sus siglas en inglés) es un paradigma de diseño para dispositivos de comunicaciones inalámbricas. Fue ideado en 1992 por Joseph Mitola, quien definió el término para una clase de radios que podían ser reprogramados y reconfigurados a través de herramientas de software, permitiendo así que el mismo hardware puede usarse para crear muchos tipos de radios para diferentes estándares de comunicación ya que el software puede ser reemplazado fácilmente en el sistema de radio, logrando de esta manera que el SDR pueda ser usado para una variedad de aplicaciones. El SDR ideal propuesto por Mitola consta de una antena y un convertidor digital analógico (ADC) en la recepción, y un convertidor analógico digital (DAC) y otra antena en la transmisión, dejando el manejo de

las demás funciones a los procesadores reprogramables [25]. En la figura 2-12 se muestra la arquitectura ideal de un SDR.

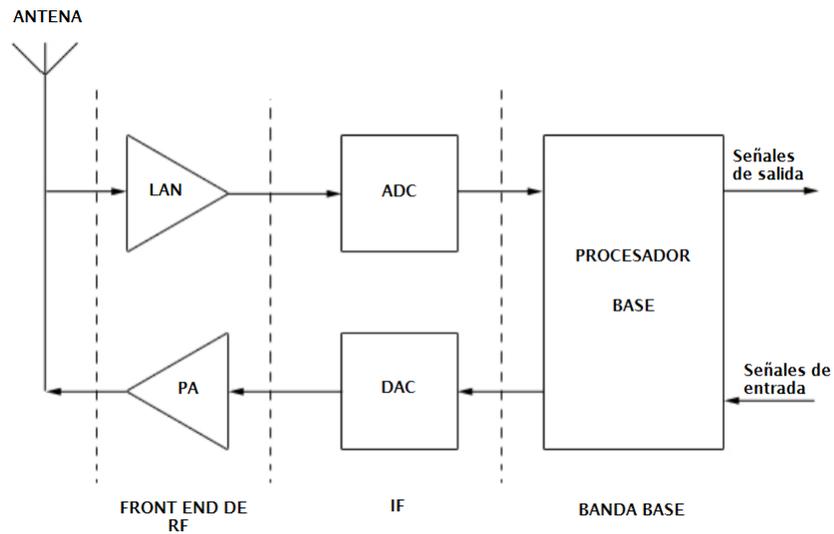


Figura 2-12: Arquitectura ideal del SDR [25].

En términos un poco más amplios, un SDR es un sistema de radio que realiza el procesamiento de señal requerido en el software en lugar de utilizar circuitos integrados dedicados en el hardware [5]. En la figura 2-13 se muestra la arquitectura práctica de un SDR.

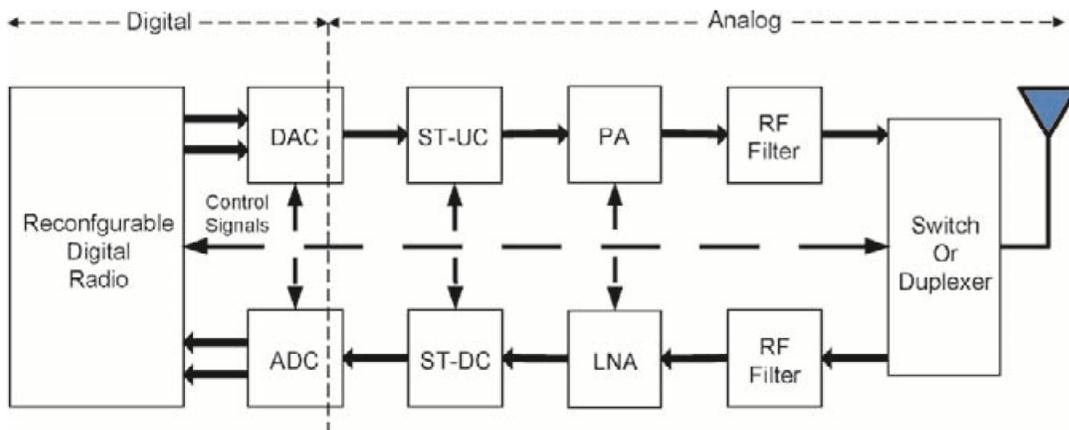


Figura 2-13: Arquitectura práctica de un SDR [5].

### 2.3.2. Herramienta de software

#### GNU Radio

Es un conjunto de herramientas de desarrollo de software libre y de código abierto que proporciona bloques de procesamiento de señal para implementar radios de software. Se puede usar con hardware externo de RF de bajo costo para crear radios definidas por software, o sin hardware en un entorno parecido a la simulación. Es ampliamente utilizado en entornos de investigación, industria, academia, gobierno y aficionados para apoyar la investigación de comunicaciones inalámbricas y sistemas de radio del mundo real [10].

GNU Radio realiza todo el procesamiento de la señal y puede ser usado para escribir aplicaciones para recibir y transmitir datos con hardware de radio, o para crear aplicaciones totalmente basadas en simulación. GNU Radio tiene filtros, códigos de canal, elementos de sincronización, ecualizadores, demoduladores, decodificadores y muchos otros tipos de bloques que normalmente se encuentran en los sistemas de procesamiento de señales [10].

Además de esto, la herramienta también permite gestionar el flujo de datos entre los bloques a través de un método de conexión que considera el tipo y tamaño de los datos, y también se pueden crear y agregar con mucha facilidad bloques adicionales si son necesarios, estos nuevos bloques se pueden escribir en lenguaje de programación C++ o Python. La ruta de procesamiento de señal crítica para el rendimiento se implementa en C++ usando extensiones de coma flotante donde estén disponibles lo que permite al usuario implementar sistemas de radio de alto rendimiento en tiempo real en un entorno de desarrollo de aplicaciones rápidas y fácil de usar [10].

Los bloques de procesamiento de señales están escritos en C++, mientras que Python se usa como lenguaje de scripts para unir los bloques y formar el diagrama de flujo. El generador de interfaz SWIG (Simplified Wrapper and Interface Generator) se utiliza como el compilador de interfaz que permite la integración entre lenguaje C++ y Python. En la figura 2-14 se muestra la estructura de GNU Radio y del SDR USRP.

### 2.3.3. Herramienta de hardware

En la actualidad existe una cantidad importante de plataformas SDR en el mercado. Una de las más conocidas es la familia USRP (Universal Software Radio Peripheral) [7], línea de productos de Ettus Research que es usada para implementar varios esquemas de SDR, esta línea tiene varias versiones diferentes según el uso previsto. Entre otras plataformas están Wireless Access Access Research Platform (WARP) de la Universidad de Rice [2], o la línea de transmisores y receptores SDR de FlexRadio [8].

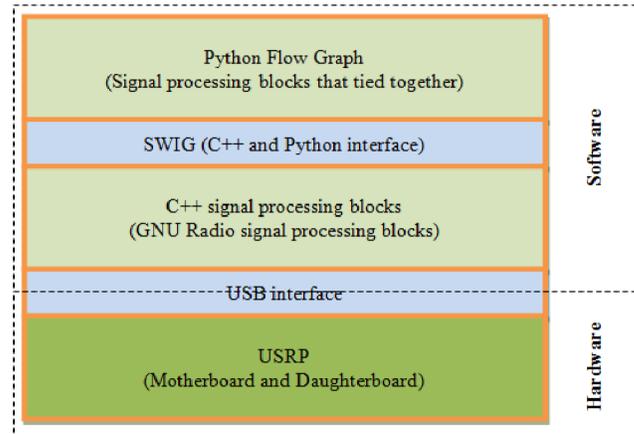


Figura 2-14: Estructura de GNU Radio y la USRP [10].

## Universal Software Radio Peripheral (USRP)

- USRP N2x0 y tarjetas hijas

Esta serie es el producto más conocido de USRP. Está diseñada para conectar con un PC host a través de un enlace Gigabit Ethernet (GbE) que a su vez conecta a un núcleo blando en un FPGA. Cuenta con una FPGA de la serie Xilinx Spartan 3A-DSP, para el modelo N200 es la 3A-DSP1800 y para el modelo N210 la 3A-DSP3400, allí se programa toda la lógica y el control del sistema. La placa base contiene dos convertidores analógicos digitales (ADC) de 100 MSPS y dos convertidores digitales analógicos (DAC) de 400 MSPS. Soporta hasta 25 MHz de 16 bits en datos en fase (I) y cuadratura (Q) para el host sobre su conexión GbE. También tiene un puerto MIMO que permite conectar varias USRP a la vez [7].

Esta USRP contiene el software y el lenguaje de descripción de hardware necesarios para implementar un SDR, así como también los ADC y los DAC para recibir y transmitir. Sin embargo, el front end de RF fue removido a tarjetas hijas para permitir que un mismo dispositivo pueda soportar diferentes escenarios de uso. Estas tarjetas hijas pueden ser solo tarjetas de recepción o de transmisión y recepción (transceptores), y pueden ser de banda angosta, diseñadas para aplicaciones específicas, o de banda ancha, para uso general, o incluso, también pueden ser creadas a la medida por el usuario ya que todos los archivos de origen y los esquemas son públicos [7]. En la figura 2-15 se muestra la USRP N210.

- USRP B210



**Figura 2-15:** USRP N210 [7].

Esta USRP es completamente integrada y de una sola placa con cobertura de frecuencia continua de 70 MHz a 6 GHz que fue diseñada para experimentación de bajo costo. Combina el transceptor de conversión directa RFIC AD9361 que proporciona hasta 56 MHz de ancho de banda en tiempo real, un FPGA Spartan 6 abierto y reprogramable, y una rápida conectividad a través de una conexión USB 3.0. El soporte completo para el software USRP Hardware Driver (UHD) permite comenzar a desarrollar de inmediato con GNU Radio.

La interfaz de RF de esta USRP está diseñada con el AD9361, que es un transceptor de conversión directa de un solo chip, capaz de transmitir hasta 56 MHz de ancho de banda de RF en tiempo real. Esta USRP utiliza ambas cadenas de señales del AD9361, lo que proporciona capacidad MIMO coherente. El procesamiento y control de la señal a bordo del AD9361 se realiza mediante un FPGA Spartan6 XC6SLX150 conectado a una PC host. La API del software UHD (USRP Hardware Driver) es compatible con todos los productos USRP y permite desarrollar aplicaciones de manera eficiente y luego realizar una transición sin problemas entre las plataformas a medida que se amplían los requisitos [7]. En las figuras **2-16** y **2-17** se muestra la USRP B210 junto con su arquitectura.



**Figura 2-16:** USRP B210 [7].

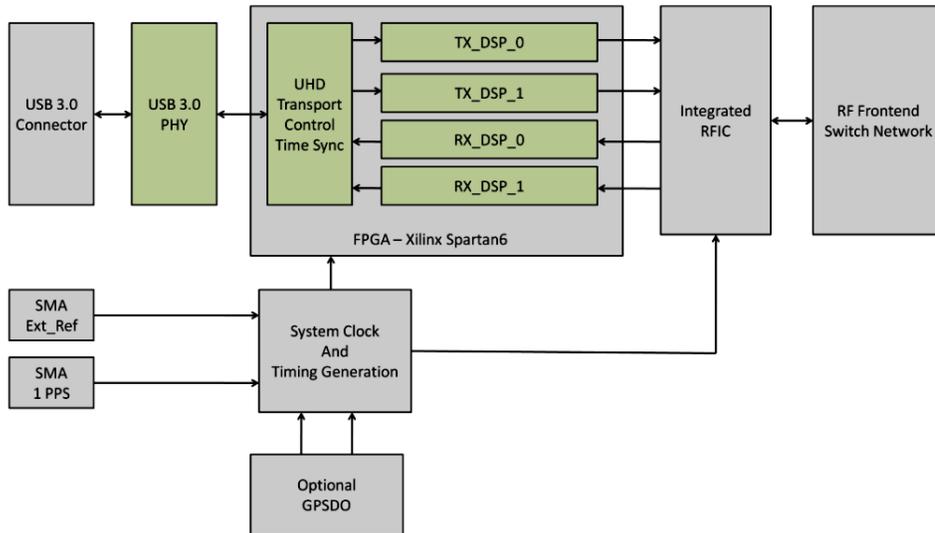


Figura 2-17: Arquitectura de la USRP B210 [7].

## 2.4. Detección de espectro

Para lograr un sistema de radio cognitiva completo existen dos grandes retos: contar con recursos de hardware que sean capaces de tomar decisiones inteligentes en función de su propio entorno local y desarrollar tecnologías SDR para permitir una completa reconfigurabilidad; sin embargo, estas condiciones pueden no lograrse en mucho tiempo [19]. En todo caso, puede que no se necesite una cognición muy compleja ni tecnologías de radio completamente flexibles porque, por ejemplo, una inteligencia más simple en la capa física junto a niveles más bajos de procesamiento de señal inteligente podría generar beneficios significativos respecto a los tipos de radio tradicionales.

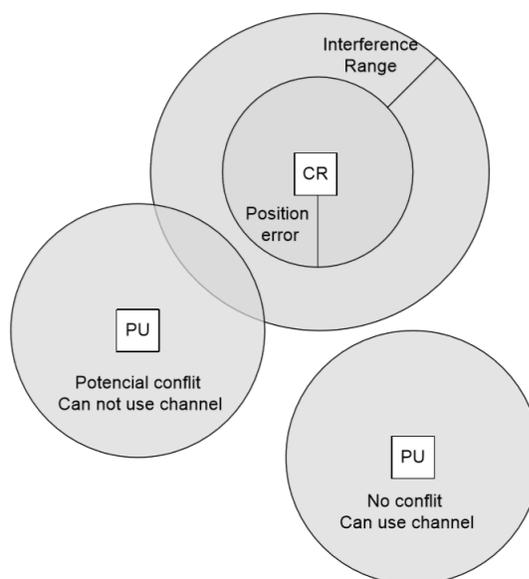
Realizar una adecuada detección de espectro es un paso fundamental para lograr un sistema RC completo, por lo que la función de detección de espectro es un objetivo importante aunque no es un problema fácil de resolver. Un diseño de algoritmo de detección debe optimizar la complejidad de implementación, la medición de interferencia, la absorción de potencia y también debe abordar otros problemas específicos de los sistemas de comunicaciones, como el desvanecimiento por trayectos múltiples, que normalmente interferiría con las señales entre el objetivo bajo detección y CR, por lo que es difícil de entender si una señal no existe o si está reducida por un canal defectuoso, este problema es conocido como Usuario Primario Oculto porque un usuario secundario podría transmitir en un aparente espacio en blanco de espectro que en realidad oculta una señal de un usuario primario [30].

Otra consideración importante de un sistema de radio cognitiva es el tiempo de detección, que debe ser tan rápido como sea posible, así que el método de detección debería ser capaz

de reconocer un UP dentro de un tiempo determinado. Asimismo, debido a que el sistema consta de múltiples US y UP pueden producirse interferencias entre un US de modo que el sistema de detección no sea confiable, por lo que podría ser útil utilizar detección cooperativa como la solución más acertada [15].

### 2.4.1. Métodos de identificación de espacios en blanco

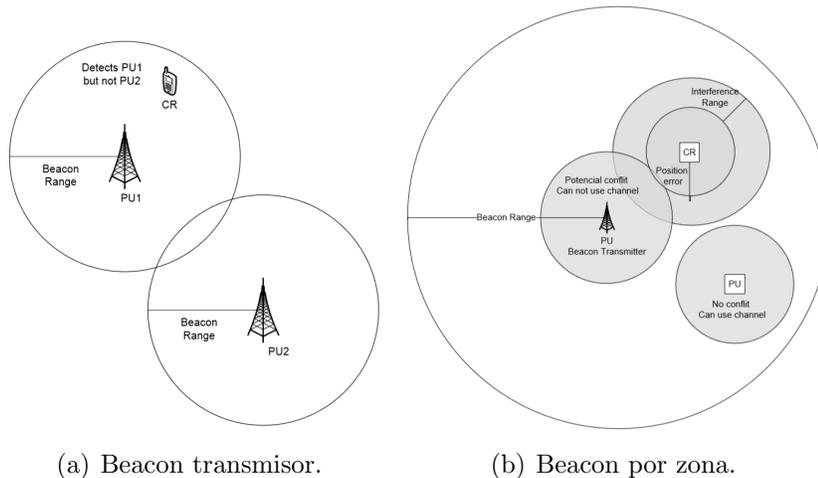
Para que una radio cognitiva pueda usar espacios en blanco, primero debe detectar las fracciones de espectro disponibles. Existen tres técnicas principales para detectar el uso del canal: el uso de una base de datos, el uso de señales *beacon* (broadcast) y la detección de espectro. En cuanto al uso de base de datos, el usuario verifica su ubicación y luego consulta en dicha base de datos para conocer el uso de los canales cercanos. Luego, a partir de la estimación de su posición, error de posición y rango de interferencia, el usuario no licenciado puede decidir si el canal es utilizable o no [1]. Esto se muestra en la figura 2-18.



**Figura 2-18:** Identificación de espacios en blanco usando base de datos [1].

Este método tiene la desventaja de que el CR necesita un esquema de geolocalización. Además, un CR necesita acceder a la base de datos que limita la independencia de la red y se requieren cambios en los sistemas heredados, ya que la base de datos debe actualizarse con la información del canal. Adicional a esto, es necesario que se proporcione el servicio de base de datos [14].

En el método de identificación que usa señales *beacon*, el usuario primario transmite señales conocidas al CR y el sistema utiliza esta señal para decidir sobre la usabilidad del canal. Estos beacons se pueden transmitir en un beacon por transmisor o en un beacon por zona. En el primero, si el CR recibe un beacon no usará el canal y así el beacon transportará información sobre los canales usados en el área, similar a una base de datos con acceso inalámbrico [1]. Ambas métodos son representados en la figura 2-19.

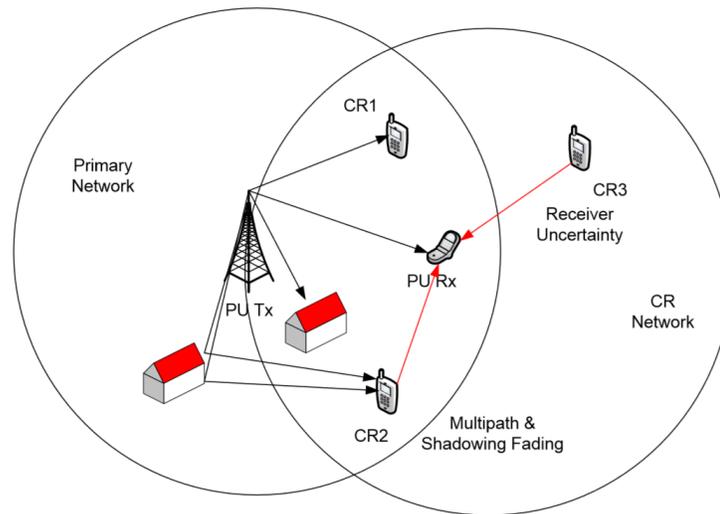


**Figura 2-19:** Identificación de espacios en blanco usando beacons [1].

En el método de detección de espectro, el transmisor sin licencia observa el ancho de banda y detecta las transmisiones hechas por los UP's en su operación normal. Si se detecta una transmisión, entonces el canal está en uso y el CR no asigna frecuencias de operación a los usuarios secundarios. La principal ventaja de este método es que no requiere cambios en las redes heredadas, una característica muy deseable. Por otro lado, la mayor desventaja es que el CR debe ser capaz de detectar señales con una relación señal a ruido (SNR) muy baja para no crear interferencia perjudicial con los UP's, como sucede con el problema del nodo oculto, que ocurre cuando un CR puede interferir con el receptor de un usuario licenciado, pero le cuesta detectar el transmisor de dicho licenciado, ya sea por fading (desvanecimiento), shadowing (desvanecimiento lento) o porque está lejos del transmisor, pero cerca del receptor [21]. Esto se muestra en la figura 2-20.

## 2.4.2. Métodos de detección de espectro

El método de detección de espectro debe enfrentarse a varios problemas que dificultan la detección, como lo son la baja relación señal a ruido (SNR) en las transmisiones, el fading y las multitrayectorias, la necesidad de un tiempo de detección bajo, la inestabilidad en el



**Figura 2-20:** Problema de Nodo Oculto [21].

nivel de ruido del canal, entre otros factores. Existen muchos métodos de detección, pero no todos son suficientemente eficaces.

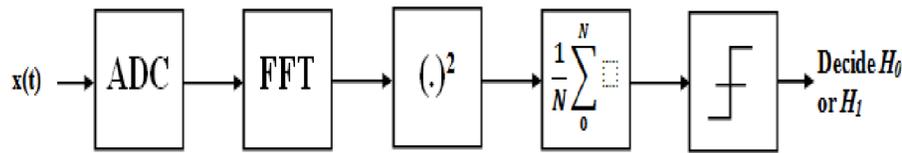
### Filtro acoplado

La mejor forma de detectar señales con SNR máxima es usar un receptor de filtro acoplado [33]. Su ventaja más relevante es el corto tiempo de ejecución, pero es necesario conocer algunas propiedades de la señal. Este método debe incluir la demodulación de la señal, lo que implica que el receptor debe estar sincronizado con la fuente, estimar las condiciones del canal y conocer la naturaleza de la señal.

### Detección de energía

Este es un método básico para la detección de espectro ya que es de baja complejidad computacional y de ejecución, consiste en establecer un umbral de acuerdo con el piso de ruido y compararlo con la energía del flujo de datos en la entrada. Este detector, que se muestra en la figura 2-21, solo requiere información mínima, como el ancho de banda de la señal y la frecuencia de la portadora. La implementación digital de este método utiliza la Transformada Rápida de Fourier (FFT), así que el valor de las muestras es elevado al cuadrado e integrado sobre la banda de observación [36].

De esta manera, luego de comparar la salida del integrador con el umbral, se puede detectar la presencia o ausencia del usuario primario. En esta arquitectura, el tamaño de FFT proporciona el ancho de banda de resolución y por tanto es crítico en la calidad de detección de



**Figura 2-21:** Detector de Energía [31].

señales de banda estrecha, lo que implica un costo importante: una gran FFT necesita muchos recursos de hardware y un tiempo prolongado de detección. Además, el umbral depende del nivel de ruido, por lo que es muy difícil modificarlo en condiciones dinámicas. Adicional a esto, en este tipo de detección no se reconocen las señales moduladas de las frecuencias de interferencia o alto nivel de ruido [31].

### DetECCIÓN DE FUNCIONES

La mayoría de las señales tienen propiedades estadísticas que varían periódicamente con el tiempo, que se denominan características cicloestacionarias. Por lo tanto, se puede lograr una detección más precisa explotando la periodicidad inherente de la función de autocorrelación de las señales. En este caso, se define una función de correlación espectral:

$$S_x^\alpha(f) = \lim_{\substack{t \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow \infty}} \frac{1}{\Delta t} \int_{-\Delta t}^{+\Delta t} \frac{1}{T} X_T(t, f + \frac{\alpha}{2}) X_T^*(t, f - \frac{\alpha}{2}) dt \quad (2-4)$$

donde  $X_T(f)$  es la transformada de Fourier y  $\alpha$  la frecuencia de ciclo, lo que significa la separación de frecuencia de las componentes espectrales correlacionadas. Las señales moduladas tienen una función de correlación espectral con características específicas, por lo que al compararlas con una lista de características típicas la detección sería posible. Sin embargo, este método necesita una gran complejidad computacional y el conocimiento de algunos parámetros de señal de la señal bajo prueba como la frecuencia de la portadora [15].

### Comparación

Cada método presentado tiene ventajas y desventajas en la detección de señal. Estos se resumen en la tabla **2-1** donde varios aspectos de los métodos son comparados y clasificados entre 1 y 5, donde 1 es una baja dependencia y 5 una alta dependencia al aspecto en cuestión. Los aspectos considerados son los siguientes:

1. **Inmunidad al ruido:** se refiere a la capacidad del método para no dejarse afectar por ruido blanco.
2. **Complejidad computacional:** es la capacidad de cómputo necesaria para detectar la señal.

Tabla 2-1: Comparación de métodos de detección.

	Inmunidad al ruido	Complejidad computacional	Inmunidad a interferencias	Tiempo de ejecución	Conocimiento previo
<b>Filtro acoplado</b>	3	2	5	4	5
<b>Detección de energía</b>	2	2	2	5	1
<b>Detección de funciones</b>	5	5	5	2	3

3. **Inmunidad a interferencias:** la capacidad del método para blindarse ante perturbaciones distintas al ruido blanco.
4. **Tiempo de ejecución:** el detector de señal ideal debería funcionar en tiempo real, por lo tanto el tiempo de ejecución debe ser el menor posible.
5. **Conocimiento previo:** se refiere a la cantidad de información que necesita el método para detectar la señal, se espera que en CR esta información sea la mínima posible.

# 3 Planteamiento del problema y Objetivos

## 3.1. Descripción del problema

El diseño de antenas para aplicaciones de CR es un tema de alto interés en la implementación de este tipo de sistemas. El énfasis se ha centrado en el diseño de una antena comunicaciones reconfigurable, utilizando interruptores de microondas como diodos PIN, MEMS y/o varactores, con una antena de detección UWB en la banda de interés. Sin embargo, aún son extensos los esfuerzos pendientes relacionados con la obtención de sistemas de antenas más compactas, con una cantidad significativa de estados reconfigurables, que sean integradas y que ambas puedan reconfigurarse.

El objetivo principal de este trabajo es el diseño, la construcción y la evaluación del desempeño de antenas reconfigurables en frecuencia para un sistema CR en modo interweave y para operar en la banda de 5150 a 5850 MHz. Para lograr esto fue necesario caracterizar elementos de conmutación en radiofrecuencia, realizar simulaciones y optimizaciones evolutivas de estructuras electromagnéticas, construir prototipos de antenas de detección y comunicación reconfigurables de acuerdo con los resultados obtenidos en las simulaciones y optimizaciones previas y, finalmente, validar los prototipos construidos, evaluando su desempeño dentro del sistema CR y comparándolo con el de antenas convencionales reportadas en la literatura.

La elección de la banda para la cual inicialmente se estaba diseñando el sistema (5150 a 5850 MHz) obedecía a razones de factibilidad y no de aplicabilidad, ya que es en este rango en el que se encuentra la mayor cantidad de bandas libres según el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, MinTIC, y la Agencia Nacional del Espectro, ANE [6]; se quisiera poder evaluar el sistema en bandas licenciadas, pero ello no está permitido por la legislación colombiana.

## **3.2. Objetivos**

### **3.2.1. Objetivo General**

Diseñar, construir y evaluar el desempeño de antenas reconfigurables en frecuencia para un sistema de radio cognitiva en modo interweave para comunicaciones en la banda de 5150 a 5850 MHz.

### **3.2.2. Objetivos Específicos**

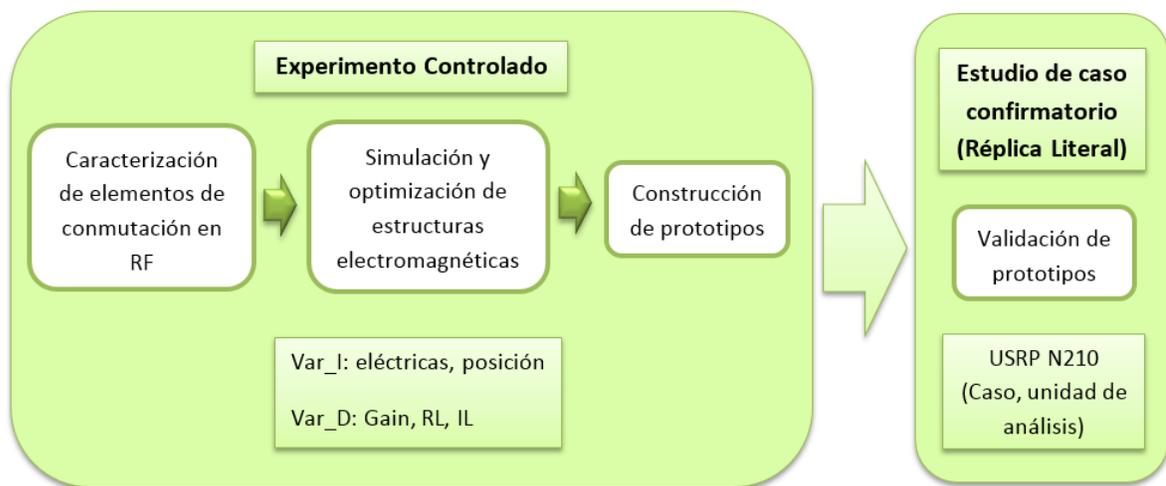
1. Caracterizar elementos de conmutación en radiofrecuencia.
2. Realizar simulación y optimización evolutiva de estructuras electromagnéticas.
3. Construir prototipos de antenas de detección y comunicación reconfigurables de acuerdo a los resultados obtenidos en las simulaciones y optimizaciones previas.
4. Validar los prototipos construidos, evaluando su desempeño dentro del sistema CR y comparándolo con el de antenas convencionales.

## 4 Sistema de radio cognitiva en modo interwave

Para el desarrollo adecuado de este proyecto se realizó un experimento controlado y un estudio de caso confirmatorio (réplica literal) [18]. Se partió de la hipótesis de que el desempeño de antenas para CR (midiéndolo en parámetros como pérdidas de retorno, ganancia, ancho de banda o frecuencias de resonancia) puede ser mejorado utilizando elementos de conmutación en radiofrecuencia y estructuras electromagnéticas adecuadamente optimizadas. Para verificar la hipótesis se establecieron las variables de control dependientes e independientes a usar: en las variables independientes están las eléctricas, tanto analógicas como digitales, que controlarán las antenas (particularmente su reconfiguración) y su posición espacial; en las dependientes se utilizan la frecuencia (estableciendo los estados reconfigurables), la ganancia del sistema, las pérdidas de retorno y la inserción encontradas en los elementos de conmutación en radiofrecuencia que sean utilizados.

En términos más detallados, primero fue necesario indagar por elementos de conmutación en radiofrecuencia para establecer cuál o cuáles son los más adecuados para lograr la reconfiguración en la frecuencia de las antenas, comparando las pérdidas de retorno e inserción, los tiempos de conmutación, el tamaño, los requerimientos (Bias-T u otros elementos discretos adicionales) y la frecuencia de operación; luego se estableció la mejor técnica de optimización de estructuras electromagnéticas que se puede utilizar en este caso, para así realizar una simulación y optimización de las estructuras que conformaron las antenas y enseguida se construyeron los prototipos de acuerdo con la caracterización y la optimización previas.

Para la validación del prototipo se implementó un sistema de comunicación de CR en una tarjeta USRP B210, que hizo las veces de caso y unidad de análisis para la recolección de datos en el marco de una réplica literal de un estudio de caso confirmatorio [18]. Cuando se implementó el sistema y se corroboró mediante pruebas estándar que se desempeña adecuadamente, se procedió a validar las antenas construidas evaluando su desempeño en función de las variables mencionadas anteriormente, y comparando estos resultados con algunos encontrados en la literatura [39], [20], [41]. En la figura 4-1 se muestra un diagrama de bloques con la síntesis de la metodología utilizada.



**Figura 4-1:** Metodología utilizada.

**Tabla 4-1:** Comparación de algunos interruptores de conmutación en RF consultados.

Switch	Dimensión (mm*mm)	Tipo	IL (dB) 3Ghz	RL (dB) 3GHz	Máx. Freq (GHz)	N pines
HMC550	3*3	SPST GaAs	-0.7	-20	6	6
PE4246	3*3	SPST CMOS	-1	-22	5	6
RF1126	2*1.3	SPDT GaAs	-0.4	-20	3.5	6
$\mu$ PG2157T5F	3*3	SPDT GaAs	-0.6	-20	5.85	12
$\mu$ PG2176T5N	1.5*1.5	SPDT GaAs	-0.55	-15	5.85	6

## 4.1. Elemento conmutador para reconfiguración en frecuencia de la antena

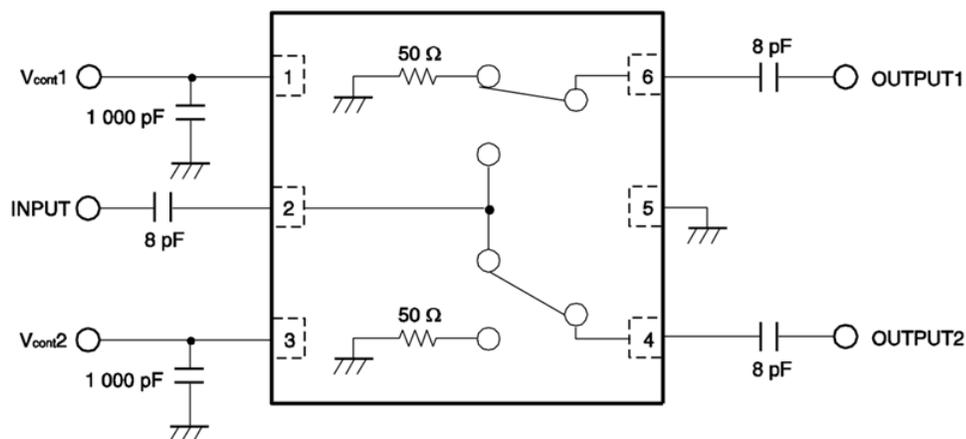
### 4.1.1. Comparación de distintas tecnologías

Para elegir el mejor elemento conmutador de los disponibles en el mercado, se compararon algunos interruptores de conmutación en RF. Como factores de decisión principales se han elegido su tamaño, por ser crítico a la hora de determinar las dimensiones finales de la antena; el tipo de conmutación, si es SPST o SPDT (donde P es la cantidad de polos que define cuántos circuitos separados puede controlar el interruptor, y T define a cuántas posiciones se puede conectar cada uno de los polos del interruptor) así como el material y tecnología, importantes para determinar cuantos grados de libertad se tendrán para reconfigurar la antena; las pérdidas de inserción y de retorno, que se esperan bajas en interruptores que conmuten en estados marcadamente distintos; la máxima frecuencia de operación, fundamental para tener la certeza de hasta qué frecuencia podrá operar la antena y el número de pines, una característica importante para el diseño de la PCB. En la tabla 4-1 se resume esta información.

### 4.1.2. Interruptor elegido

En función de lo anterior, se eligió el interruptor  $\mu$ PG2176T5N, que es un interruptor MMIC (circuito integrado monolítico de microondas) de GaAs de  $50 \Omega$  con tipo de terminación SPDT de alta potencia desarrollado para WiMAX. Este dispositivo puede operar frecuencias de 2.3 a 5.85 GHz, teniendo una baja pérdida de inserción y alto aislamiento. Está encapsulado en un paquete de plástico TSON (Thin Small Out-line Non-leaded) de 6 pines,

útil para montaje en superficie de alta densidad. En la figura 4-2 se muestra la configuración circuital recomendada por el fabricante para su correcto funcionamiento [9].



**Figura 4-2:** Circuito recomendado por el fabricante para el interruptor de conmutación elegido [9].

### Diseño de la PCB

En el proceso de caracterización del interruptor se utilizó el sustrato RO4003C de Rogers Corporation, con constante dieléctrica de 3.55, grosor de 0.813 mm y revestimiento de cobre de 35  $\mu m$ . Los capacitores de desacople de RF usados fueron de 2.2 pF de la marca Johanson Technology (de acuerdo a las especificaciones del fabricante, en la banda de interés la capacitancia efectiva del capacitor aumentaba a cerca de 8 pF, que era la sugerida) y los capacitores de desacople de DC de 1000 pF de Johanson Dielectric.

En la figura 4-3 se presenta uno de los primeros diseños de PCB generados para el interruptor. En este las pistas se asumen suficientemente cortas para no ser consideradas líneas de transmisión así que se diseñan muy delgadas. El plano de tierra estará en una segunda capa del sustrato y parcialmente en la primera para la conexión a tierra del interruptor. En la figura 4-4 se observa la tarjeta fabricada lista para ser medida, las medidas se realizaron con un analizador vectorial de redes de Rohde & Schwarz FSH8, que opera desde 100 kHz hasta 8 GHz, y consistieron inicialmente en la observación de los parámetros de dispersión de la tarjeta, los resultados al respecto no fueron satisfactorios ya se que observaron múltiples reflexiones causadas por ondas evanescentes al interior del sustrato y resonancias indeseadas ya que la dimensión total de la placa es comparable a  $\frac{\lambda}{2}$  para la frecuencia máxima de operación.

Después de varios cambios en el diseño de la tarjeta se obtiene el prototipo final, que se observa en la figura 4-5. Las principales modificaciones involucraron la consideración de

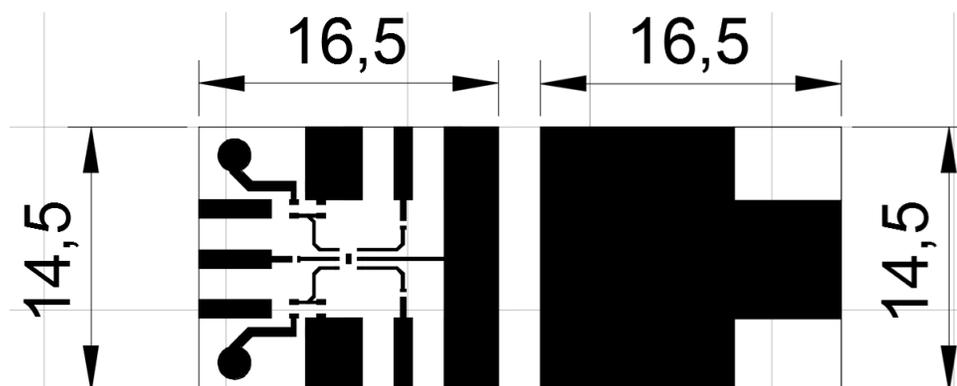


Figura 4-3: Diseño de interruptor de conmutación propuesto inicialmente.

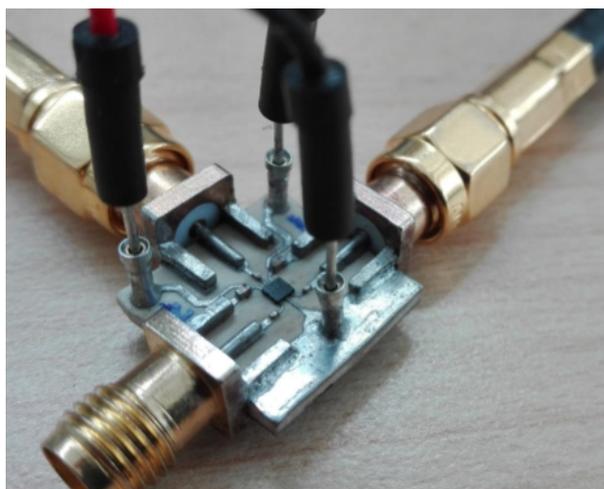
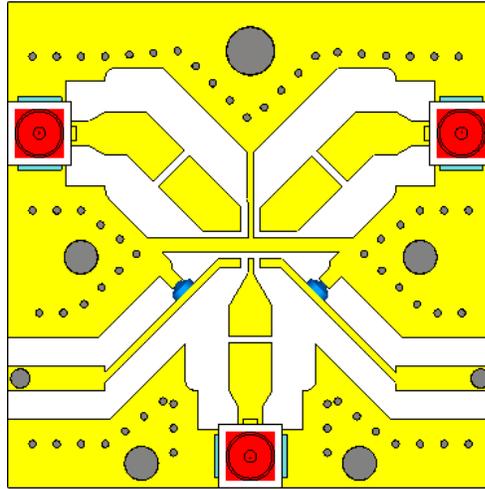


Figura 4-4: Pruebas iniciales realizadas con el interruptor.

las pistas como líneas de transmisión, para lo cual se optó por un diseño de guía de onda coplanar aterrizada (CPWG) con impedancia característica de  $50 \Omega$  en las líneas de RF, el uso de vías entre las dos capas de la tarjeta, para unir la tierra presente en las dos y además minimizar el efecto de las ondas evanescentes y eventuales nuevas resonancias indeseadas, y el cambio de los conectores de RF SMA por conectores U.F.L ya que los segundos, al ser considerablemente más pequeños, no sometían a la tarjeta a esfuerzos mecánicos excesivos como anteriormente estaba sucediendo, lo que también pudo ser una causa de los malos resultados observados.

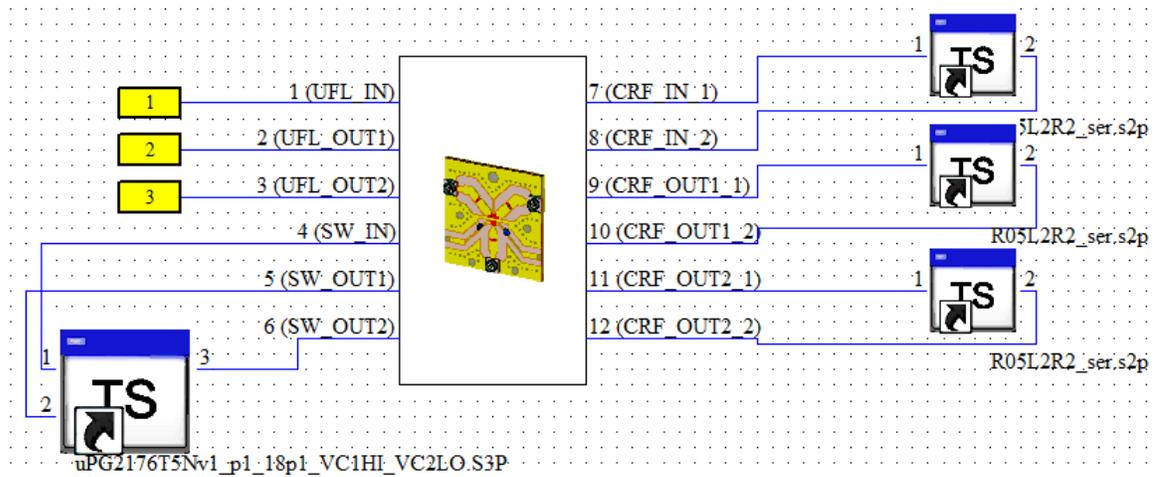
### Simulaciones y mediciones realizadas

La estructura se modeló en la herramienta de software CST MicroWave Studio, en donde además de la construcción CAD del diseño se incluyó toda la información relacionada con los tipos de materiales utilizados, el rango de frecuencia en el cual se evaluaría el diseño



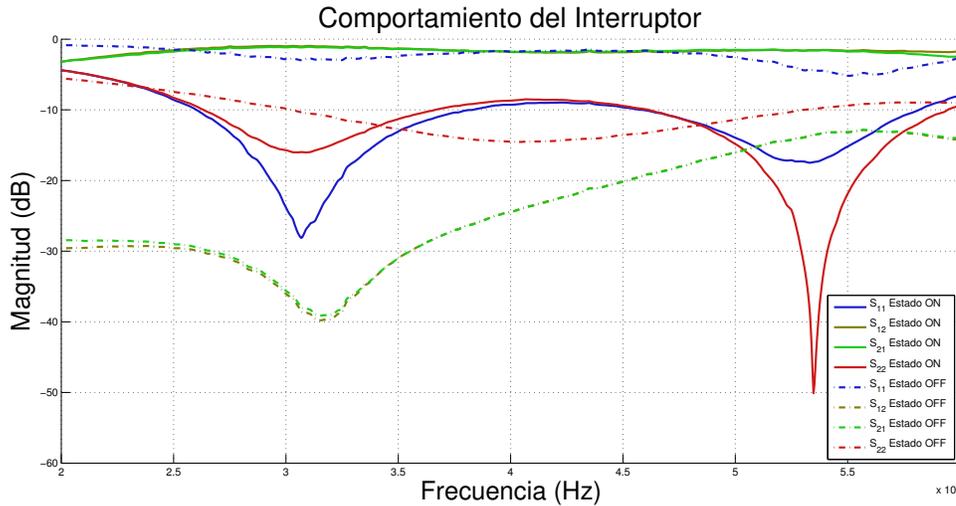
**Figura 4-5:** Diseño final del interruptor de conmutación elegido.

y los parámetros de simulación, en donde se escogió Time Domain como el solver para la simulación. Después de esta simulación *full wave*, este resultado se implementó como un bloque al cual se conectaron los archivos *touchstone* de los capacitores de RF y del interruptor utilizado, proporcionados por los fabricantes, para obtener el comportamiento más preciso posible. La simulación en mención se muestra en la figura 4-6, y en figura 4-7 se observan los parámetros de dispersión obtenidos, los cuales son consistentes con el comportamiento esperado: bajas reflexiones ( $-9$  dB o inferior) y alta transmisión entre puertos (mayor a  $-2$  dB) para el estado ON, y baja transmisión (inferior a  $-12$  dB) y mayores reflexiones (superiores a  $-1$  dB en algunos casos) para el estado OFF.



**Figura 4-6:** Simulación en bloques de la estructura luego de la simulación *full wave*.

Después de verificar que los resultados de las simulaciones realizadas fueron correctos, se fabricó la tarjeta con ayuda de los equipos del Laboratorio de Electrónica de Altas Frecuen-



**Figura 4-7:** Resultados de simulación obtenidos para el diseño final.

cias y Telecomunicaciones del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (CMUN) y luego se midió con ayuda de un analizador vectorial de redes de cuatro puertos de Rohde & Schwarz ZVB 20, que opera desde 10 MHz hasta 20 GHz, del Laboratorio de Servicios Electrónicos (ML-013) de la Universidad de los Andes. El interruptor fue conmutado para registrar ambos estados, los cuales son los mostrados en las figuras 4-8 y 4-9 para encendido y apagado respectivamente en dos de las tarjetas medidas, encontrándose que el resultado es repetible ya que es el mismo en ambas, y además que después de 5 GHz la transmisión entre puertos no es superior a -5 dB mientras que las reflexiones ya alcanzan este mismo nivel y por tanto esto hace que los dos estados del interruptor no puedan ser claramente diferenciados en este rango, por lo que se hace necesario cambiar la banda de operación por aquella en la que el interruptor tuvo el mejor comportamiento: entre 3 GHz y 4 GHz (es importante resaltar que se aumentó el ancho de banda de operación respecto al propuesto originalmente).

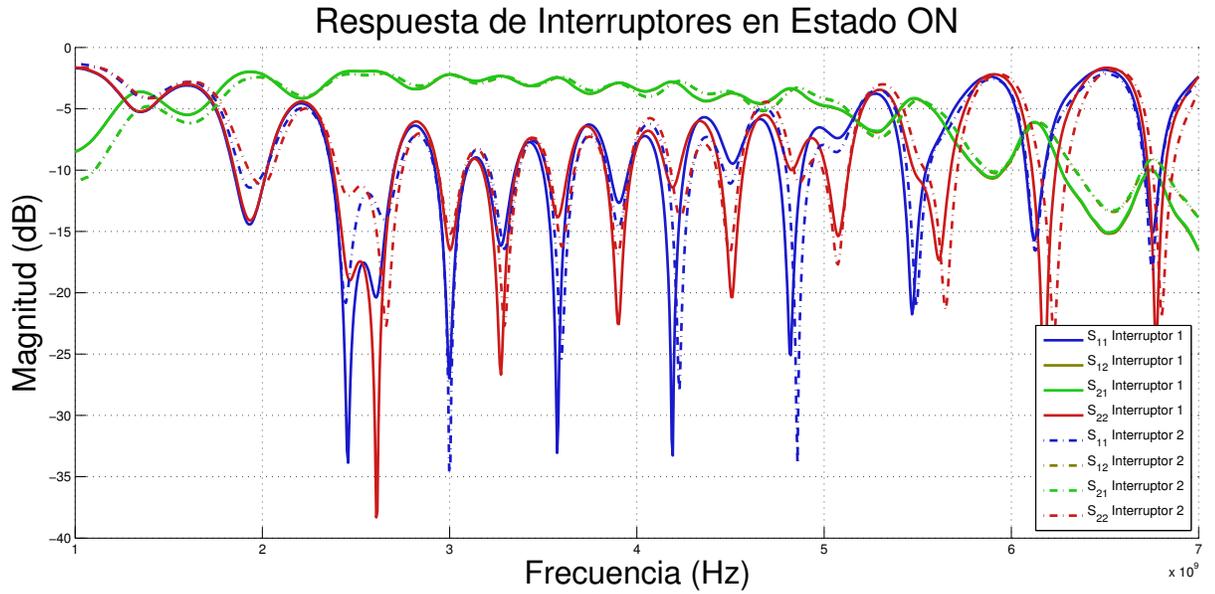


Figura 4-8: Resultados de medición del interruptor en su estado encendido.

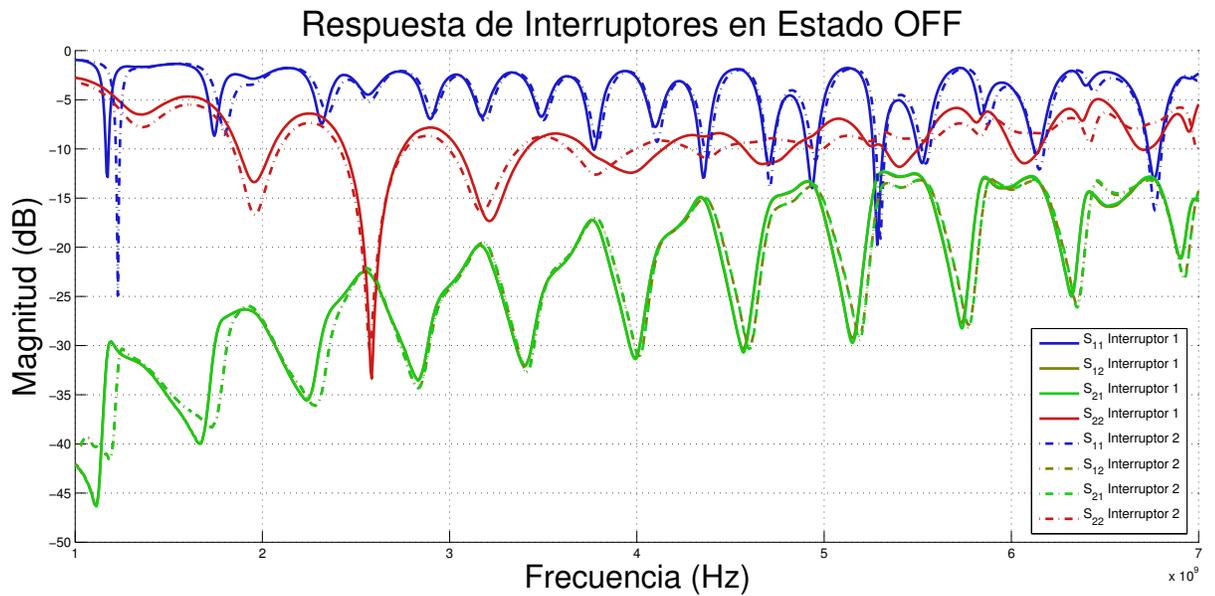


Figura 4-9: Resultados de medición del interruptor en su estado apagado.

## 4.2. Software de optimización de antenas y Antena obtenida

### 4.2.1. Software utilizado

Todo el proceso de optimización se realiza utilizando el algoritmo de MATLAB presentado en [3] y utilizado posteriormente en otros trabajos como en [4], en el cual se utiliza el algoritmo para realizar comunicación *dúplex*. De acuerdo a este algoritmo la optimización se divide en 4 pasos: modelamiento CAD de la estructura base, cálculo de la matriz MoM, y optimizaciones global y local. Los grados de libertad por su parte se dividen en dos tipos: los relacionados con la geometría de la estructura conductora y los relacionados con los estados de los interruptores para una estructura dada. Con este método los grados de libertad geométricos están directamente relacionados con el número de triángulos presentes en el malla computacional restringido solo para asegurar una descripción electromagnética exacta de la geometría deseada. Con la discretización empleada, cada celda en el espacio de búsqueda está representada por una cadena de bits, donde se encuentra, entre otros, información acerca de los straps y representación de secciones cuadradas del parche. El valor de cada bit representa la presencia de una característica dada, por lo que durante el proceso de evolución de la optimización se pueden quitar algunos segmentos de metal de filas y columnas de la estructura base para así obtenerse la matriz MoM.

La optimización global se realiza a través de un algoritmo genético que empieza generando una población aleatoria de individuos codificada por cromosomas binarios con cada bit representando la presencia o ausencia de una característica dada, la población es evaluada a través de la función de fitness representando el comportamiento por un número simple, luego el algoritmo aplica los operadores GA estándar: selección, cruce y mutación para así obtener la siguiente generación en la cual evalúa el fitness de los individuos originados y guarda los mejores globalmente para recuperaciones posteriores. El algoritmo se detendrá después de realizar un número predefinido de generaciones, por que se alcanzaron metas propuestas en el fitness o porque se detuvo el algoritmo manualmente. En la figura 4-10 se resume esta optimización.

En la optimización local y debido al carácter binario de la cadena que describe el espacio de búsqueda, se realiza una búsqueda en una vecindad de un bit. En cada iteración los bits de la solución son conmutados uno a la vez calculando la función de costo resultante. El bit cambia y se retiene la mejor optimización, luego se repite la iteración hasta que la conmutación de los interruptores no genere mejoras. Al final del refinamiento local la estructura completa podrá presentar modificaciones.

Después de ajustar todos los parámetros de entrada al optimizador, como el número de

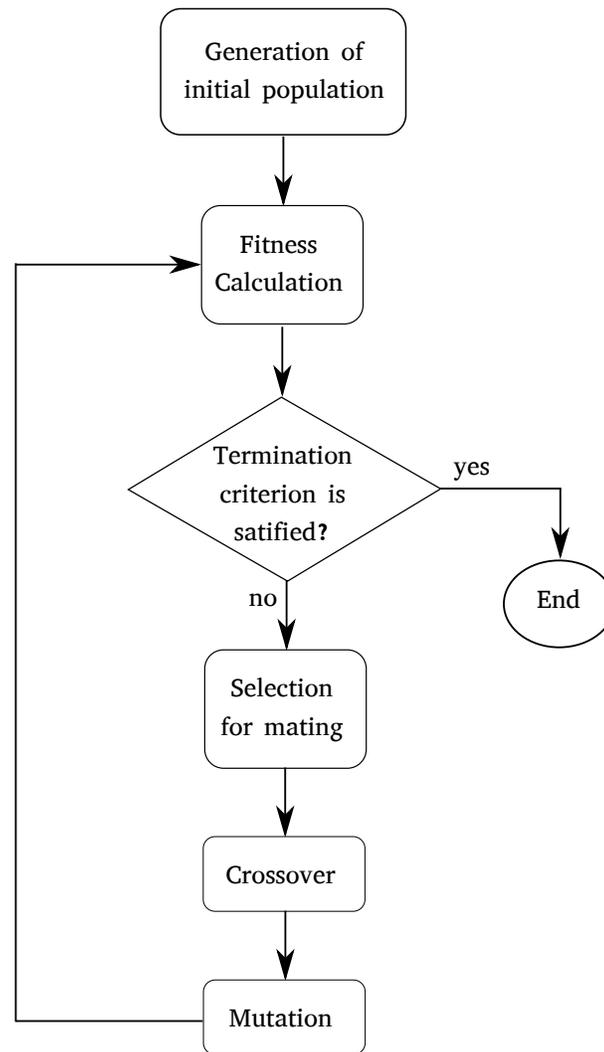


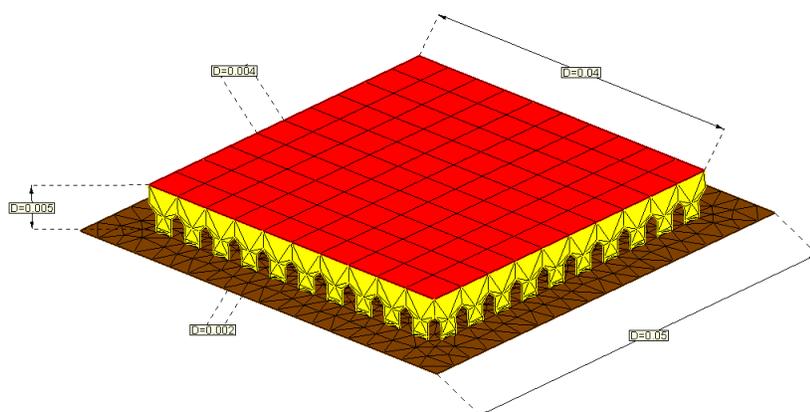
Figura 4-10: Optimización Global: algoritmo genético [3].

generaciones y de individuos, el número de variables por individuo (que se logra modificando la estructura base), la tasa de mutación y de generación aleatoria, así como el número mínimo y máximo de elementos de conmutación posibles, y luego de esperar a que el proceso culmine, que en el caso de mayor refinamiento alcanzó a demorarse alrededor de 48 horas ejecutándose en una *workstation*, se obtiene finalmente la geometría que permite que una estructura electromagnética reproduzca este comportamiento.

#### 4.2.2. Estructura base propuesta y optimización elegida

En la figura 4-11 se puede observar la estructura base propuesta para la generación y optimización de la antena, cuyas dimensiones son de  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  para el elemento radiador y de  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 0,813\text{ mm}$  para la PCB de la tierra de la antena y de

los elementos de conmutación de la misma. Esta estructura fue realizada en GID, en donde se dispuso su geometría en un mallado de rectángulos y triángulos según se clasificara cada zona de la estructura para ser susceptible de modificación o no.



**Figura 4-11:** Estructura base realizada en GID.

En el proceso de búsqueda de una estructura que cumpliera con las condiciones de operación esperadas (esto es, que los dos puertos lograran buen aislamiento entre sí mientras cada uno se reconfiguraba de manera independiente del otro en puntos específicos de frecuencia), se propuso inicialmente buscar cinco puntos de frecuencia para operar en la banda propuesta, lo cual se traduciría en 25 combinaciones distintas entre los dos puertos. Sin embargo, este primer escenario debió modificarse, primero debido a las limitaciones de operación del interruptor en la banda de frecuencia inicial, y segundo porque lograr el objetivo de encontrar 25 estados reconfigurables no resultó una tarea sencilla para el optimizador y por tanto lograrlo requeriría mucho más tiempo del presupuestado.

Así las cosas, se optó por buscar una antena que operara en la banda de 3 GHz a 4 GHz (un ancho de banda superior al propuesto, que era de 700 MHz) y se reconfigurara en tres puntos de frecuencia distinto (3 GHz, 3.5 GHz y 4 GHz) para obtener un total de nueve combinaciones de operación distintas entre puertos. Si bien la banda utilizada es distinta a la propuesta para el desarrollo del trabajo de tesis, este escenario permitiría validar la hipótesis planteada y lograr una estructura con prestaciones similares en la banda original es cuestión de escalamiento. En la tabla 4-2 se detallan los nueve escenarios en los que la antena debe operar.

Después de realizar la optimización local de cerca de un centenar de antenas variando los diferentes parámetros de entrada se encontró una estructura que inicialmente tenía seis interruptores y cuya geometría se muestra en la figura 4-12.

Tabla 4-2: Escenarios de operación de la antena.

		Puerto 2			
		f (GHz)	3	3.5	4
Puerto 1	3	1	2	3	
	3.5	4	5	6	
	4	7	8	9	

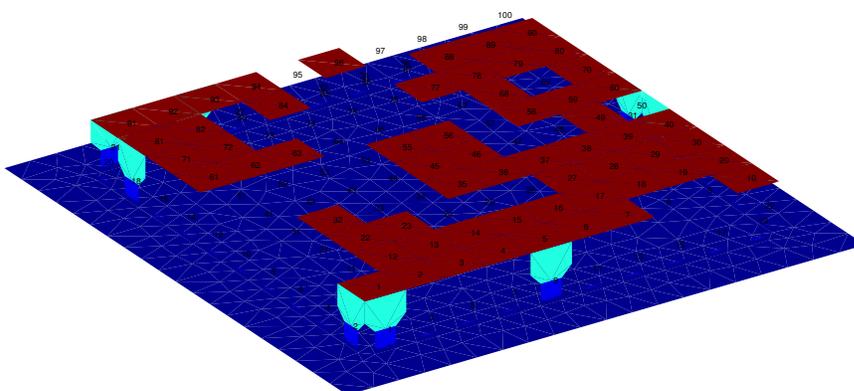
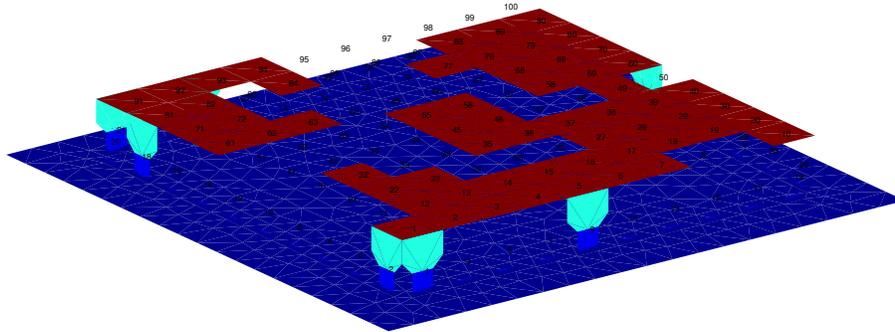


Figura 4-12: Geometría original obtenida en la optimización.

Allí se puede observar que uno de los interruptores estaría conectado a la estructura metálica solamente a través de un vértice y no de una arista como los demás, lo que podría ser problemático desde el punto de vista del desempeño de la antena ya que en el proceso de fabricación sería muy difícil representar dicho escenario y cualquier variación dimensional allí sería crítica. Por esta razón se verificó el comportamiento de la antena en ausencia del interruptor en mención encontrándose que las variaciones en el desempeño eran mínimas (el valor de la función de costo varió menos del 4%, así como los valores del peor parámetro de dispersión y el valor medio estimados), por lo cual se decidió prescindir de dicho interruptor y además se realizaron otras modificaciones adicionales menores tendientes a simplificar la geometría, lo que se traduciría en simplificar la fabricación, verificando de nuevo que no afectaban significativamente el desempeño encontrado previamente. La estructura final se muestra en la figura 4-13.

### 4.2.3. Simulación Fullwave

Para tener seguridad del adecuado funcionamiento, la estructura se simuló también con la herramienta de software CST Microwave Studio en *fullwave*, en donde el par de puertos y



**Figura 4-13:** Geometría final modificada.

cada interruptor se modeló como un puerto discreto. Posteriormente, para obtener el efecto de la conmutación de los interruptores, en el modo *esquemático* del software se conectaron a dichos puertos los archivos *touchstone* que contienen los resultados de las mediciones finales de los interruptores de microondas (los dos puertos de la antena se etiquetaron como las conexiones externas) y se conmutaron adecuadamente para representar la combinación de estados que permiten obtener el comportamiento deseado en cada escenario. La estructura simulada se muestra en la figura 4-14, los parámetros de dispersión obtenidos en las figuras 4-15 a 4-17, y los patrones de radiación por puerto y medidos a 3.5 GHz en las figuras 4-18 a 4-21. Respecto a los parámetros obtenidos se observa que en general, según el escenario, cada puerto de la antena se adapta a una de las tres frecuencias esperadas (aunque no se obtenga la máxima adaptación allí) y además el aislamiento entre puertos es alto en todos los casos, sin embargo, para el puerto 1 en los escenarios 1 a 6 se presentan corrimientos en frecuencia (los parámetros de reflexión son mayores a -10 dB), aunque con un error que no es superior al 1%; en cuanto a los patrones de radiación se hace evidente que la dirección de mayor radiación es hacia la parte superior de la antena, un patrón muy parecido al esperado en un antena *microstrip*.

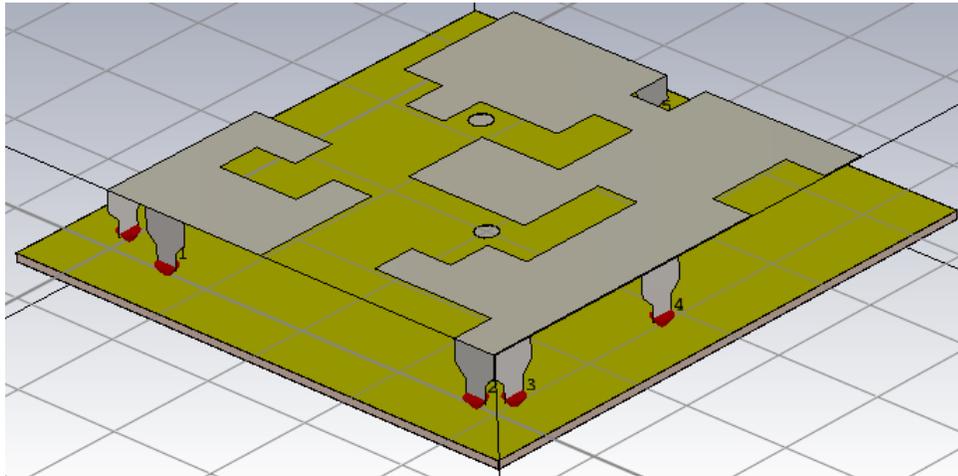


Figura 4-14: Estructura de la antena simulada en CST.

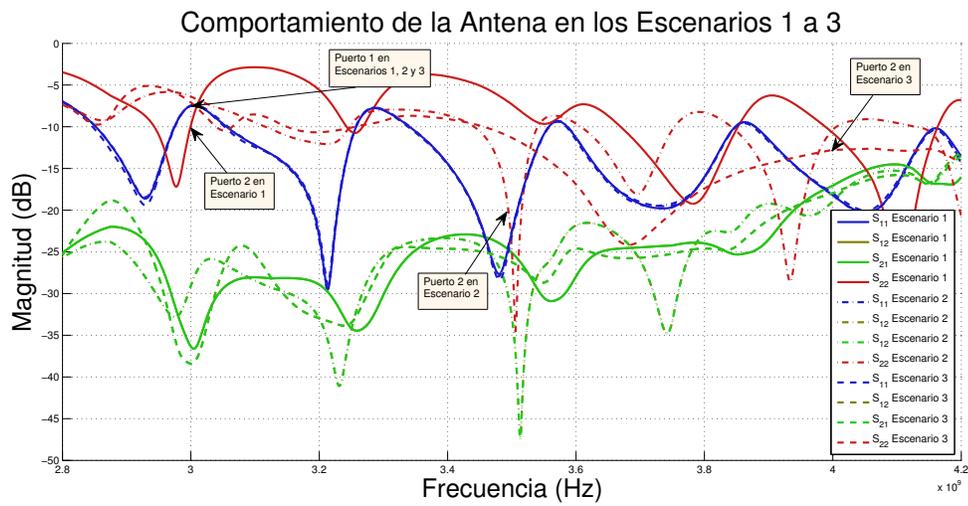


Figura 4-15: Simulación de los escenarios 1 a 3.

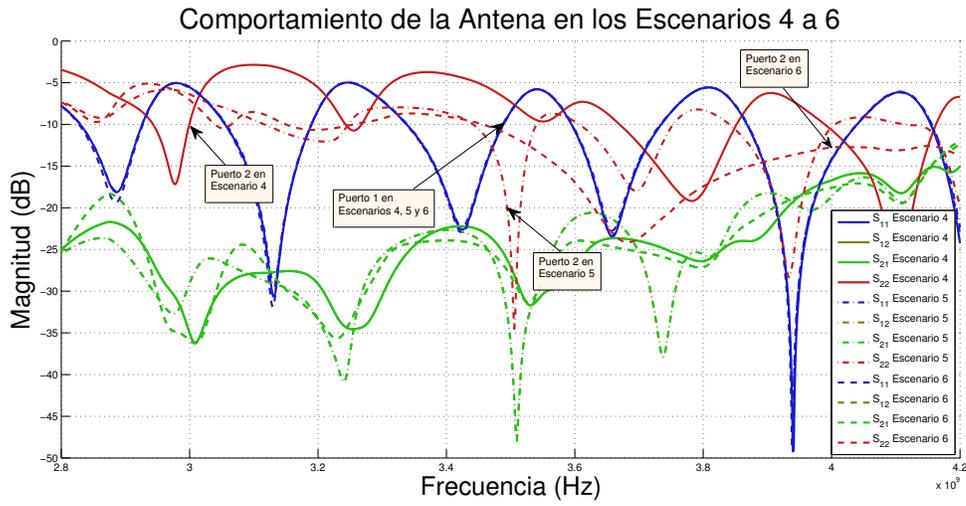


Figura 4-16: Simulación de los escenarios 4 a 6.

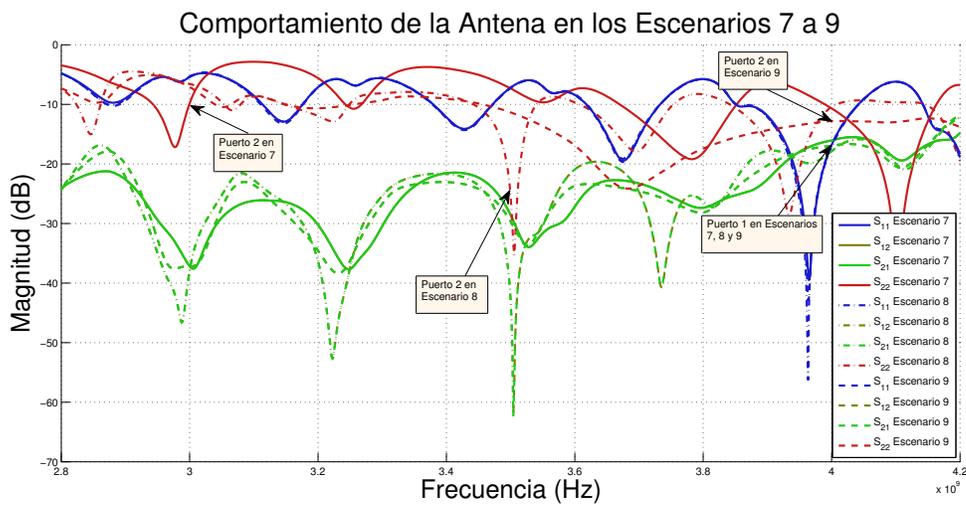
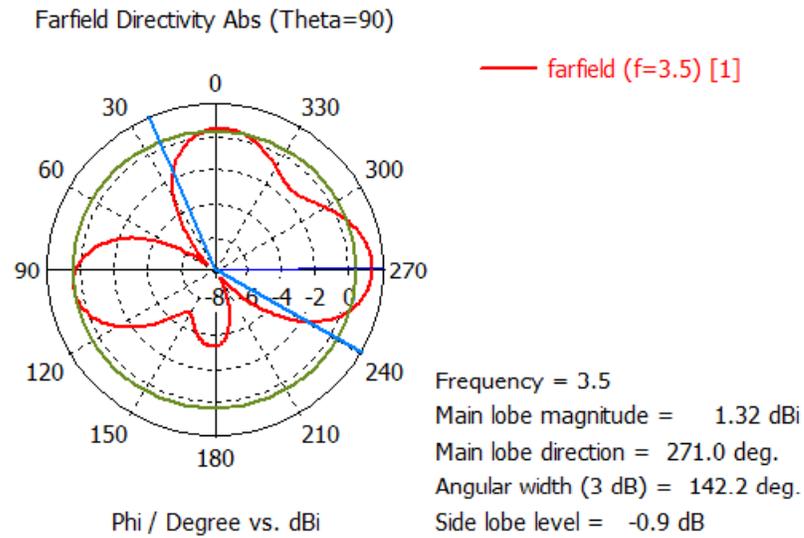
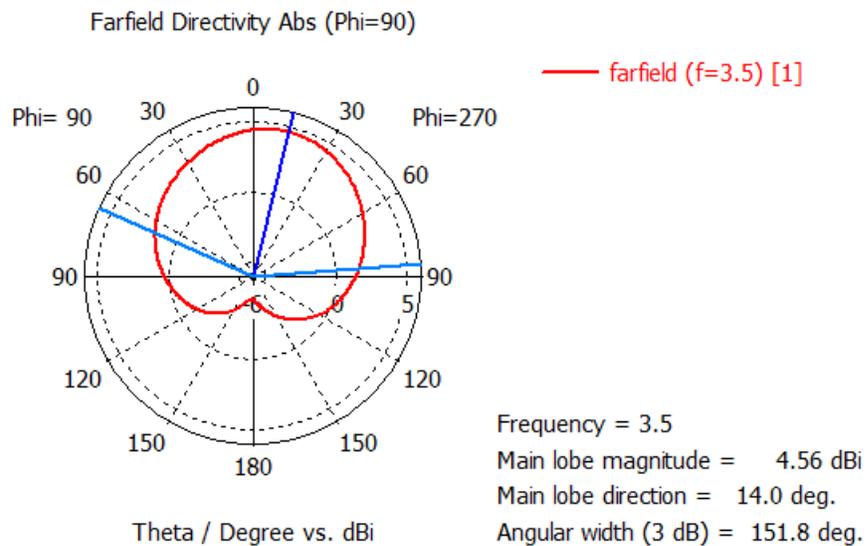


Figura 4-17: Simulación de los escenarios 7 a 9.



**Figura 4-18:** Patrón de radiación de la antena alimentando el puerto 1 con  $\theta = 90^\circ$ .



**Figura 4-19:** Patrón de radiación de la antena alimentando el puerto 1 con  $\phi = 90^\circ$ .

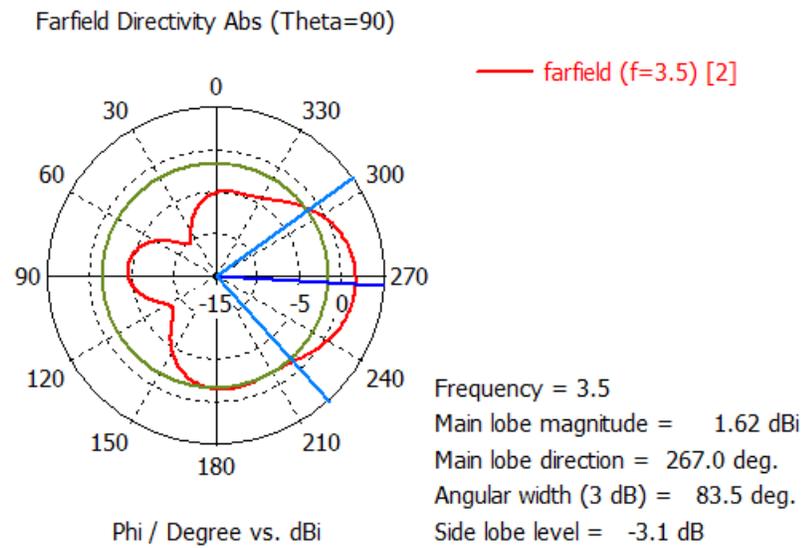


Figura 4-20: Patrón de radiación de la antena alimentando el puerto 1 con  $\theta = 90^\circ$ .

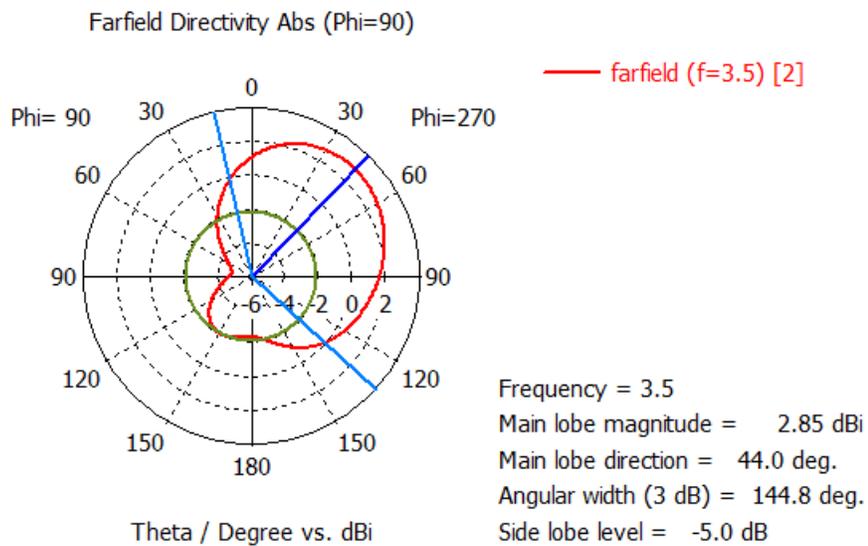


Figura 4-21: Patrón de radiación de la antena alimentando el puerto 2 con  $\phi = 90^\circ$ .

## 4.3. Detección de espectro

### 4.3.1. Detector de señal

El sistema RC necesita de hardware de banda ancha para usar diferentes bandas y canales al mismo tiempo y software flexible para elaborar diferentes tipos de señales y modulaciones. Para esto el sistema utiliza dos herramientas: la detección de espectro para detectar agujeros espectrales y para utilizar de manera oportunista estas bandas de frecuencia sin causar interferencia nociva para los usuarios primarios, y la clasificación de señal en un escenario en el que varias tecnologías y servicios pueden estar presentes al mismo tiempo. Ambas funcionalidades necesitan un dispositivo capaz de detectar el espectro y de estimar la presencia de señal, el detector de señal hace esto dando una salida binaria, siendo 0 cuando el clasificador encuentra una banda de frecuencia no utilizada y 1 cuando detecta una señal, si la banda analizada es libre, el detector habilita la transmisión para US.

El detector de señal, que se implementó en una plataforma de radio genérica (USRP B210), es un bloque funcional con una interfaz de usuario y una interfaz de sistema; en la figura 4-22 se presenta un diagrama de su estructura. A través de la primera interfaz, el usuario interactúa con el método de detección de modo que puede establecer algunos parámetros para configurarlo; en la segunda interfaz el método de detección recibe el flujo de datos bajo prueba y le entrega al usuario la información sobre las condiciones de transmisión.

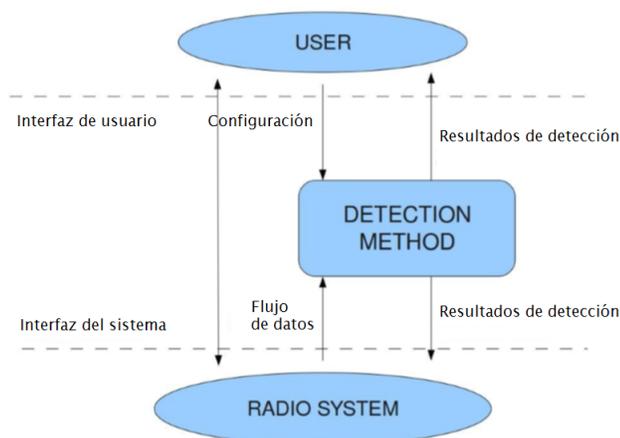


Figura 4-22: Interfaz del detector de señal.

Los datos producto de la detección son clasificados y dependiendo del resultado se habilita la transmisión para los US. Sin embargo, aunque no se encuentren espacios en blanco, este resultado puede ser usado también para otros fines como caracterizar el comportamiento del espectro en el tiempo y de esta manera dar nuevas instrucciones al sistema para mejorar

el rendimiento de la transmisión, lo que finalmente se traduce en lograr que el sistema CR pueda aprender.

El algoritmo del método de detección, que es el bloque fundamental del detector de señal, debe ser flexible, preciso y de ejecución rápida, por lo que el objetivo es hacer una buena compensación entre la complejidad computacional y el conocimiento previo del espectro bajo prueba. Es por esto que de acuerdo a la comparación expuesta en la tabla **2-1**, se ha elegido el método de detección de energía por ofrecer una baja complejidad computacional así como un bajo conocimiento previo para detectar señales.

Este método, sin embargo, ofrece también baja inmunidad al ruido blanco y a otros tipos de interferencia y además tiempos de ejecución relativamente altos, problemas en los que se ha trabajado para reducirlos al máximo. La inmunidad a interferencias se aumentó con un protocolo de calibración que permite caracterizar adecuadamente el piso de ruido existente a través del promedio de mediciones sucesivas para cada punto de frecuencia usando una carga acoplada que sustituya a la antena del sistema y de esta manera se garantice que las señales observadas son generadas al interior del SDR y puedan descartarse. Para minimizar el tiempo de ejecución se ha optimizado al máximo el algoritmo, evitando asignaciones dinámicas de memoria y utilizando indexado lógico.

### 4.3.2. Flujo de proceso en GNU Radio

El detector de energía es un *detector subóptimo*, ya que no puede detectar señales desconocidas sin el conocimiento previo de la forma de onda transmitida, como sí lo hace el filtro adaptado (*detector óptimo*). La figura **4-23** representa el diagrama de bloques de un detector de energía. Un ADC se usa para convertir la señal recibida a tiempo discreto, después de esto se representa en el dominio espectral a través de la transformada rápida de Fourier (FFT) y luego se calcula la magnitud cuadrada de la señal digitalizada. Para hacer la medición más precisa, en un bloque de adquisición de datos se toman N número de muestras y el valor promedio de las muestras se usa para tomar la decisión de si la señal está presente o no al compararla con el umbral.

El diseño del detector de energía fue realizado en lenguaje Python haciendo uso de la plataforma GNU Radio y su diagrama de flujo está basado en el analizador de espectro presentado como ejemplo en la herramienta de software, que está disponible en el paquete de instalación. La figura **4-24** muestra el diagrama de flujo del detector de energía utilizado para esta investigación. La señal de radiofrecuencia (RF) es detectada y convertida a frecuencia de banda base (DC) por el front end de la USRP B210 y luego es recibida por el módulo UHD.

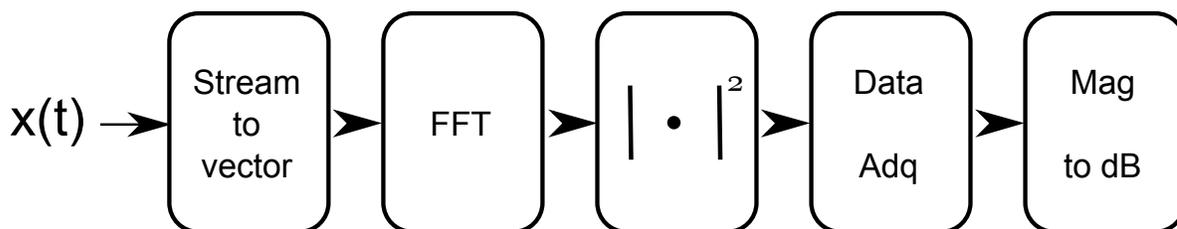


Figura 4-23: Diagrama de bloques del detector de energía.

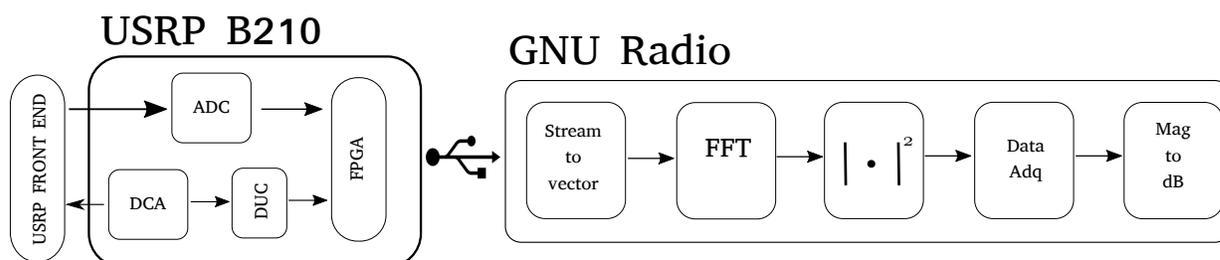


Figura 4-24: Implementación del detector de energía en GNU Radio.

Sí bien el detector se implementó completamente en python, se importaron varias clases de la plataforma GNU Radio que minimizaron considerablemente la programación, la tasa de muestreo utilizada fue de 2 MHz y el tamaño de la FFT de 1024. El proceso del detector comienza cuando la señal es recibida desde la USRP en formato de flujo de datos a través del bloque *uhd.usrp\_source*, después se convierte a formato I/Q (vector) mediante el bloque llamado *gr.stream\_to\_vector*, que toma la secuencia de elementos y la transforma en una secuencia de bloques que contiene *nitems\_per\_block* (que es del tamaño de la FFT utilizada: 1024).

En seguida esta señal se procesa en un bloque que implementa la FFT de numpy, *FFT\_Numpy*, un bloque propio construido a partir de la clase para definir bloques de python embebido de GNU Radio. En este bloque se utiliza una ventana (función matemática) para optimizar el resultado de la FFT, al evitar las discontinuidades al principio y al final de los bloques de señal muestreados minimizando con esto los efectos de borde que darían como resultado una fuga espectral y aumentaría la resolución espectral.

La salida compleja del bloque FFT se conecta al bloque llamado *gr.complex\_to\_mag\_squared*, en donde se toman los números complejos recibidos y se entregan sus magnitudes elevadas al cuadrado (en formato flotante). Después de esto los datos son enviados a un segundo bloque propio llamado *Dat\_Adq* para lograr la adquisición de los datos y su posterior manipulación. Ya contando con los datos, se comparan con el piso de ruido para encontrar espacios en blanco (aquellos puntos en frecuencia cuya señal no supere en 7 dB al piso de ruido). Después de esto se cambia la frecuencia central del frente de radio para continuar con la observación de las

siguientes frecuencias de interés (en cada frecuencia se observa un ancho de banda de 2 MHz).

# 5 Pruebas experimentales y Resultados

Luego de obtener resultados adecuados en cada uno de los bloques del proyecto: elementos de conmutación, antena y software de validación, se procedió a realizar la fabricación de la antena junto con los cinco interruptores de control para realizar la implementación y evaluación de desempeño del sistema completo.

## 5.1. Proceso de fabricación

Este proceso se dividió en dos partes: generación de PCB y estructura radiante, y ensamble de los elementos. La generación completa del circuito impreso y la antena se realizó en el Laboratorio de Electrónica de altas Frecuencias y Comunicaciones y el ensamble de los elementos se realizó con equipos de prototipado en el Laboratorio de Mecatrónica. En la fabricación de la tarjeta para los cinco interruptores necesarios se optó por un diseño de PCB más sencillo respecto al utilizado en la caracterización teniendo en cuenta que en este caso el tamaño de la tarjeta ya no tenía dimensiones comparables a  $\frac{\lambda}{2}$ , que ya no se tenían tres conectores U.F.L en cada interruptor sino solo dos para los dos puertos de la antena y que por tanto se podían acercar más los elementos entre sí. En la figura 5-1 se muestran algunos de los equipos utilizados en el proceso, entre los que se encuentran un photoplotter *Bungard filmstar fp8000*, una insoladora *Bungard Hellas*, un splash center de *Bungard*, un microscopio y un horno de soldadura.

En la figura 5-2 se muestran las máscaras fotolitográficas utilizadas para la impresión de las tarjetas junto con las tarjetas fabricadas, y en la figura 5-3 se observa el prototipo final obtenido luego del ensamble completo de las piezas.

## 5.2. Control de los elementos conmutadores y reconfigurabilidad de la antena

La conmutación de los interruptores se realizó utilizando una tarjeta *Arduino Mega 2560* que envía las señales de control de los cinco interruptores a través de sus salidas digitales (diez salidas en total, dos por cada interruptor). Se estableció comunicación serial entre la tarjeta y el computador, el cual envía desde la ejecución en python un valor entre 1 y 9



**Figura 5-1:** Photoplotter, Insoladora y Splash Center, algunos de los equipos utilizados para la fabricación de la antena.

para indicar el estado reconfigurable requerido (escenario de operación de la antena) y la tarjeta lo decodifica para obtener la combinación de salidas de control correspondiente para conmutar los interruptores. En las figuras 5-4 a 5-6 se observan los parámetros de dispersión medidos de la antena que corresponden a los nueve estados reconfigurables. Se hace evidente que el desempeño de la antena es en general el esperado ya que los puertos muestran un alto desacople (por debajo de  $-18$  dB en la mayoría de la banda de interés según el caso) y alta resonancia en cada estado (de  $-10$  dB o inferior). No obstante, es importante resaltar que en la implementación práctica algunos de los estados de reconfiguración fueron cambiados respecto a los que se tenían en simulación ya que se observó mejor desempeño en otros; además de esto, de nuevo se presentan corrimientos en frecuencia en algunos casos, sin que el error sea superior al 3%.

Del comportamiento observado se puede decir también que respecto a la mayoría de las antenas reportadas en la literatura como [39], [20], [41], el elemento radiador de esta antena cuenta con un área comparativamente menor (aunque las demás son antenas impresas en su mayoría), integra las dos antenas, de comunicación y de observación, en una sola estructura y logra un número importante de estados reconfigurables (más de los esperados porque en varias de las combinaciones de interruptores restantes se obtuvieron resonancias en frecuencias como 3.8 GHz, que no son mostradas aquí). Además, de las antenas encontradas en ninguna se habla de técnicas de optimización para encontrar la geometría adecuada, lo que sugiere que diseñar antenas en otras condiciones de operación, como el ancho de banda y cantidad de estados reconfigurables, podría no ser tarea fácil.

Respecto a otras antenas está la estructura reportada en [27], que a pesar de no ser reconfigurable logra muy buen desempeño con un tamaño muy reducido, integrando en la misma tarjeta cinco antenas muy compactas, cuatro de estas de banda angosta y una de banda ancha (la antena de observación); sin embargo, la necesidad de tener cinco puertos distintos



**Figura 5-2:** Proceso de fabricación de la antena y el circuito de control de interruptores.

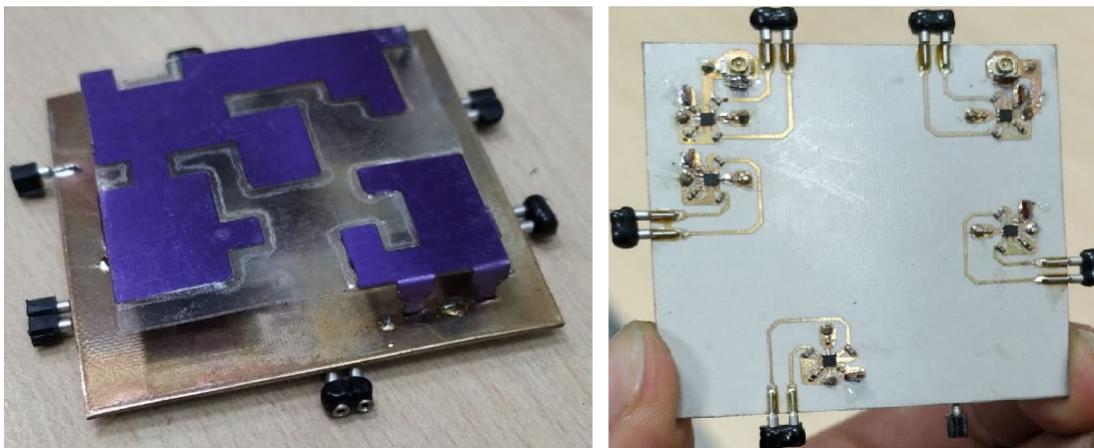
y no solo dos (cada antena de banda angosta opera en a lo sumo dos puntos de frecuencia y son necesarias varias para lograr un buen número de estados de operación) es una desventaja importante en este caso.

### 5.3. Resultados

Para establecer un proceso de comunicación en donde se pudiera evidenciar el buen funcionamiento del sistema, se transmitió un archivo de audio modulado en frecuencia en banda ancha (WBFM), y por lo tanto fue necesario agregar bloques adicionales que permitieran la correcta comunicación, los cuales se muestran en las figuras 5-7 y 5-8. En estos la tasa de muestreo utilizada fue de 4 MHz y el tamaño de la FFT de 1024, y para la validación exitosa de la presencia o ausencia de UP se promediaron 700 vectores, por lo que el tiempo de respuesta del sistema es de 0.179 s, como se describe en la ecuación 5-1; el ancho de banda de resolución en este caso es de 3.91 kHz 5-2.

$$T_{Rta} = \frac{1}{f_s} * FFT_{size} * N_{FFT} = \frac{1}{4MHz} * 1024 * 700 = 0,179s \quad (5-1)$$

$$f_{res} = \frac{f_s}{FFT_{size}} = \frac{4MHz}{1024} = 3,91kHz \quad (5-2)$$

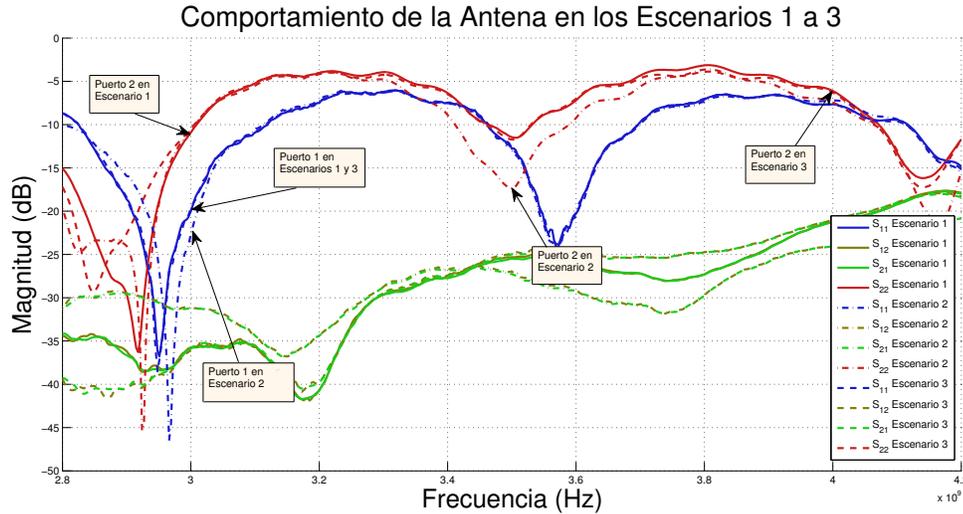


**Figura 5-3:** Prototipo final de la antena y el circuito de control de interruptores.

Para el transmisor de audio, adicional a la implementación de los bloques básicos de un modulador WBFM (la modulación FM de la señal de audio, la adecuación de la tasa de muestreo y la transmisión de la señal) se agregaron dos pulsos sinusoidales a los lados de la señal modulada y a una distancia espectral de 100 kHz para con estos identificar fácilmente al US y también para notar cuando aparece un UP ocupando el canal. De esta manera los bloques de observación del sistema pueden comparar el espectro observado con las características del US para mantener el enlace de comunicación sin alteraciones si la comparación resulta exitosa (permanecer en modo seguimiento), o, en caso de ser una comparación que arroje inconsistencias, para solicitar reconfiguración de la antena y así realizar la búsqueda de una banda libre (cambiar a modo búsqueda) y al encontrarla solicitar entonces cambio en la frecuencia de transmisión del bloque *UHD* para que la comunicación continúe en la nueva banda.

El receptor de audio es un software desarrollado en *python* capaz de establecer el enlace de comunicación con el US y reconfigurar su frecuencia para buscarlo en el evento en que este cambie de banda de operación. Tiene un detector de energía modificado que se encarga de seguir la señal del US ya que conoce su forma espectral: si al realizar la comparación del espectro observado con lo que debe ser el US no encuentra consistencia reconfigura la frecuencia de recepción del bloque *UHD* y se mueve en las tres frecuencias hasta encontrar al US. Los bloques de recepción de audio incluyen un filtro pasa bajos, un demodulador de FM, la adecuación de la tasa de muestreo y la reproducción del audio.

La configuración experimental del sistema completo consta de tres USRP y tres computadores portátiles. Uno de los computadores junto con la *USRP A* actúa como el receptor de audio, conectado a una antena *LP0965* de *Ettus* que al operar entre 850 MHz y 6.5 GHz permite que el sistema opere en las tres banda de frecuencia sin problema y con una ganancia



**Figura 5-4:** Comportamiento de la antena medidos para los escenarios 1 a 3.

de recepción de 20 dB; un segundo computador y la *USRP B* son el transmisor, en donde estará la antena reconfigurable en frecuencia fabricada que transmitirá la señal de audio y observará el espectro para verificar la presencia o no de UP y en caso de detectarlo buscará una nueva frecuencia que se encuentre libre, en donde se usa una ganancia en transmisión de 60 dB y de recepción de 10 dB; y finalmente el computador 3 y la *USRP C* serán el UP que intervendrá en el sistema haciendo que el enlace de comunicación deba cambiar su frecuencia de operación. Se establece el ancho de banda a observar entre 2800 MHz y 4200 MHz, el diagrama del experimento es mostrado en la figura 5-9, y en las figuras 5-10 y 5-11 se encuentra la implementación real.

Después de establecer el enlace de comunicación y de generar perturbaciones con el UP, se registró el espectro para todos los posibles casos (aquellos en los que UP y US no están en la misma frecuencia) a través de un analizador de espectros *R&S FSH8*. El comportamiento del sistema se muestra en las figuras 5-12 a 5-14. Cada caso muestra al US, de menor ancho de banda respecto al UP, operando una frecuencia específica mientras el UP se encuentra en alguna de las otras bandas.

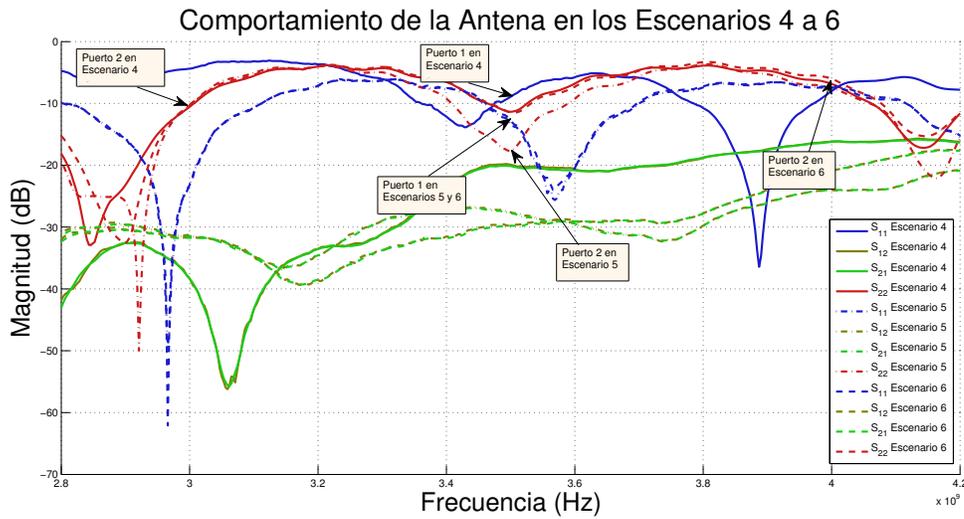


Figura 5-5: Comportamiento de la antena medidos para los escenarios 4 a 6.

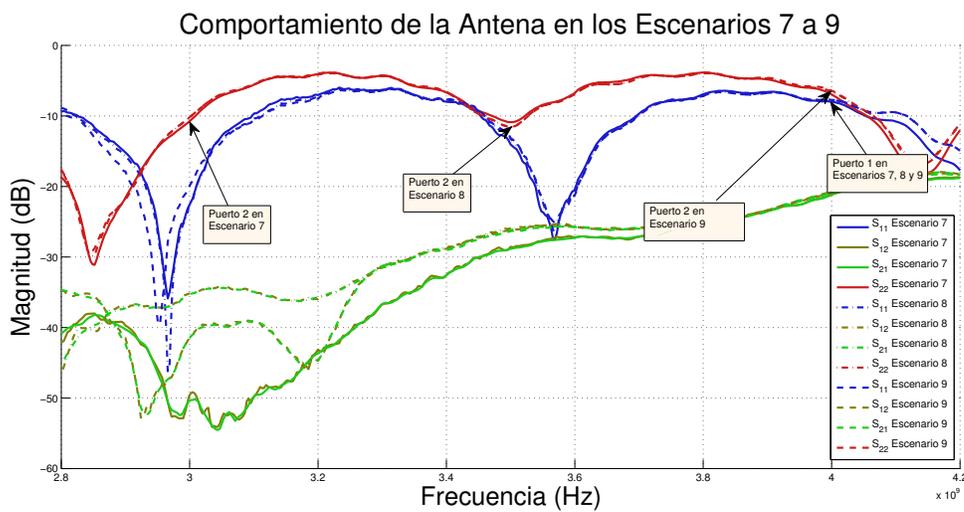


Figura 5-6: Comportamiento de la antena medidos para los escenarios 7 a 9.

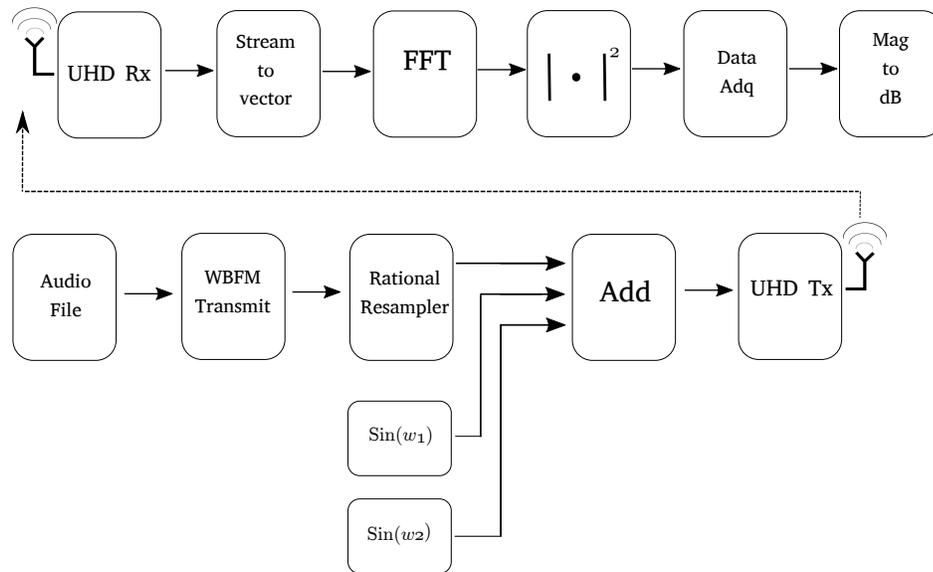


Figura 5-7: Diagrama de bloques del transmisor de audio cognitivo.

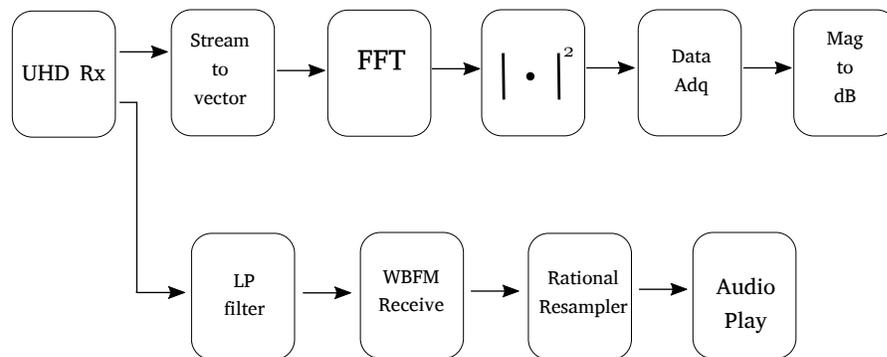


Figura 5-8: Diagrama de bloques del receptor de audio.

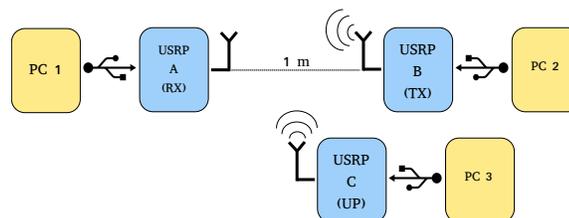


Figura 5-9: Experimento en diagrama de bloques.

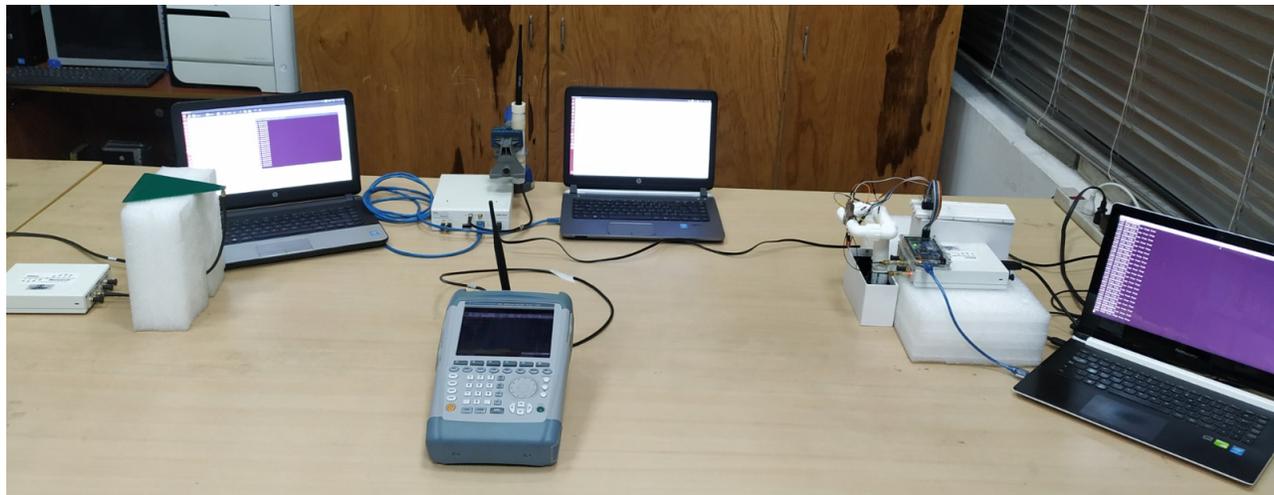


Figura 5-10: Fotografía del experimento completo.

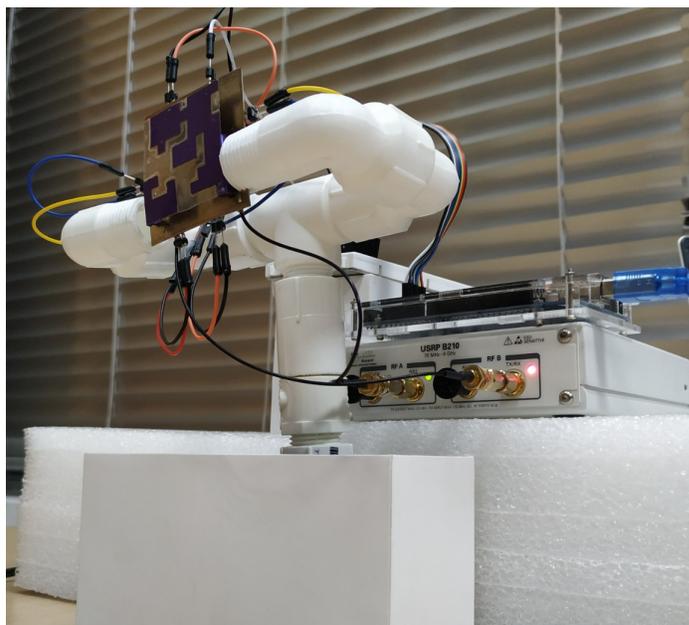


Figura 5-11: Fotografía de la antena CR con la tarjeta *Arduino Mega 2560* y una *USRP B210*.

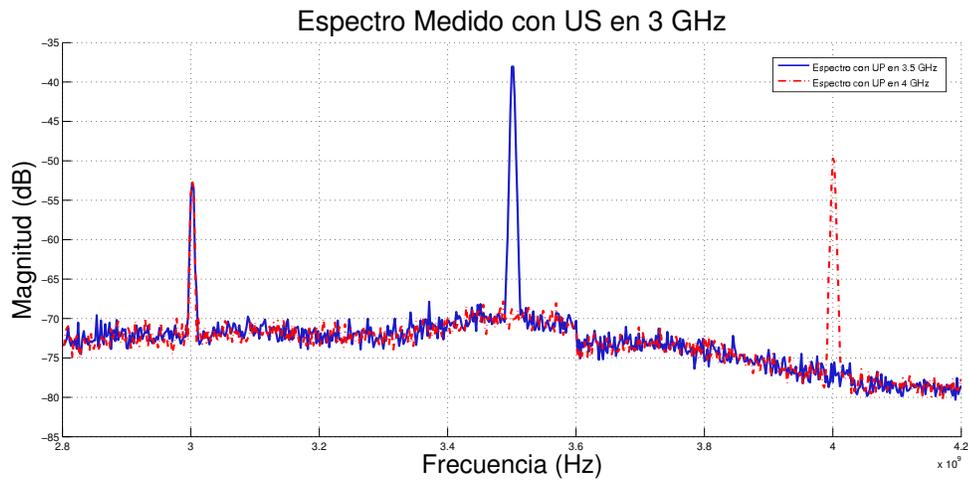


Figura 5-12: Espectro Medido con US en 3 GHz.

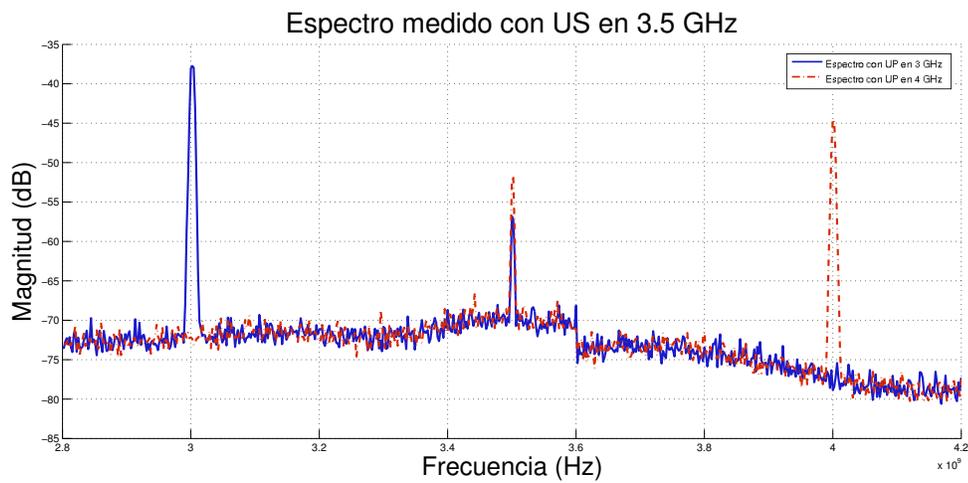


Figura 5-13: Espectro Medido con US en 3.5 GHz.

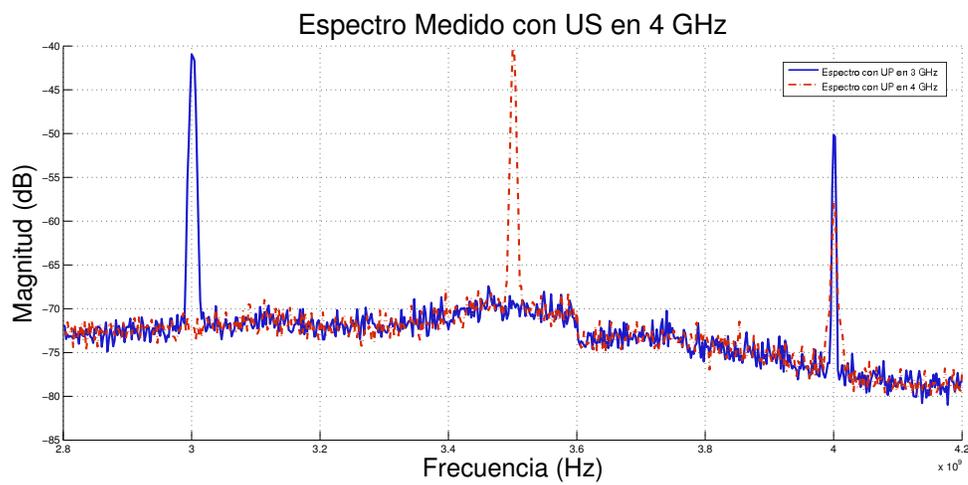


Figura 5-14: Espectro Medido con US en 4 GHz.

# 6 Conclusiones y trabajo futuro

## 6.1. Conclusiones

En este documento se presentaron los resultados del diseño la construcción y la evaluación de antenas reconfigurables en frecuencia usadas en radio cognitiva. Se pudo corroborar que el desempeño de la antena dentro del sistema fue satisfactorio ya que en presencia de un usuario primario se obtuvo la reconfiguración esperada y el enlace de comunicación (la transmisión de audio) se logró mantener. Dichos resultados también fueron corroborados a través de las mediciones de los parámetros de dispersión de la antena que mostraron que si bien se encontraron algunos escenarios en los que la frecuencia tenía un corrimiento, este error no superó el 3%.

Asimismo, se validó el comportamiento de los elementos de conmutación utilizados, encontrándose estados de conmutación con parámetros de transmisión y reflexión suficientemente diferentes, excepto para valores de frecuencia superiores a 5 GHz, en donde la transmisión entre puertos no es mayor a -5 dB mientras que las reflexiones ya alcanzan este nivel y por tanto hacen que los dos estados del interruptor no puedan ser claramente diferenciados en este rango, lo que implicó cambiar de banda de operación por aquella en la que el interruptor tuvo el mejor comportamiento: entre 3 GHz y 4 GHz, lo que aumentó el ancho de banda de operación respecto al propuesto originalmente.

Respecto al sistema de comunicación implementado a partir de radios definidos por software, se logró emular adecuadamente un sistema de radio cognitiva en el marco de las exigencias de la validación propuesta: el sistema observaba continuamente el espectro en la búsqueda de usuarios licenciados y en caso de encontrarlos modificaba las frecuencias de los frentes de radio para mantener la comunicación.

Así pues, se demuestra que utilizando alternativas de reconfiguración en las dos antenas de un sistema CR (tanto la de observación como la de comunicación), y la geometría adecuada del radiador haciendo uso de técnicas de optimización convenientes, se puede obtener un par de antenas compactas e integradas (minimizando con esto costos y volumen, principalmente), y con una cantidad importante de estados reconfigurables, permitiendo un mayor aprovechamiento de los espacios en blanco presentes en el espectro y un mejor desempeño general del sistema.

## 6.2. Trabajo futuro

Dentro del trabajo futuro que se plantea desarrollar está lograr la optimización, fabricación y evaluación de antenas aún más compactas y que se reconfiguren en anchos de banda mayores usando un número mayor de frecuencias de operación.

También se espera incrementar el desempeño del detector de espectro implementado en SDR, en el cual se pueda prescindir de una forma espectral específica para el US, se pueda aumentar la velocidad de procesamiento, se pueda hacer frente a problemas de desvanecimiento por trayectorias múltiples (Usuario Primario Oculto), se valide su funcionamiento para diferentes tipos de modulación (principalmente digitales) y en presencia de diferentes UP y US, y se pueda enseñar al sistema a caracterizar el uso del espectro en función de las experiencias pasadas junto con especificaciones de uso.

# Bibliografía

- [1] DE ALMEIDA ALVAREZ, Pedro José P.: Experimental Study on Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks. (2011)
- [2] AMIRI, K. ; SUN, Y. ; MURPHY, P. ; HUNTER, C. ; CAVALLARO, J. R. ; SABHARWAL, A.: WARP, a Unified Wireless Network Testbed for Education and Research. En: *2007 IEEE International Conference on Microelectronic Systems Education (MSE'07)*, 2007, p. 53–54
- [3] ARAQUE QUIJANO, Javier L.: *Analysis and design of compact reconfigurable antennas for mobile terminals*, Department of Electronics and Telecommunications, Politecnico di Torino, Tesis de Grado, Nov 2007
- [4] ARROYAVE, G. A. R. ; QUIJANO, J. L. A.: Dual-port reconfigurable planar antennas for diversity and duplexing applications. En: *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, 2016. – ISSN 1947–1491, p. 1247–1248
- [5] ARSLAN, Huseyin: *Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems (Signals and Communication Technology)*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2007. – ISBN 1402055412
- [6] AUTORES, Varios: *Cuadro Nacional de Atribuciones de Frecuencia*. url: [http://cnabf.ane.gov.co/cnabf/index.php?option=com\\_k2view=layout=Itemid=121s=15E6D8E4553207A9C7F7278F24E0AF113F101900](http://cnabf.ane.gov.co/cnabf/index.php?option=com_k2view=layout=Itemid=121s=15E6D8E4553207A9C7F7278F24E0AF113F101900). 2018. – – Accedido 10 – 05 – 2018
- [7] AUTORES, Varios: *Ettus Research. USRP - Ettus Research*. url: <http://www.ettus.com/>. 2018. – Accedido 20-05-2018
- [8] AUTORES, Varios. *FlexRadio*. url: <http://www.flexradio.com/commercial-products/sdr-technology-portfolio/>. 2018
- [9] AUTORES, Varios: *GaAs Integrated Circuit  $\mu$ PG2176T5N*. url: <http://www.cel.com/pdf/datasheets/upg2176t5n.pdf>. 2018. – Accedido 10-03-2018
- [10] AUTORES, Varios: *gnuradio*. url: <https://www.gnuradio.org/about/>. 2018. – Accedido 20-05-2018

- 
- [11] BERNHARD, Jennifer T.: Reconfigurable antennas and apertures: state of the art and future outlook. En: *Smart Structures and Materials 2003: Smart Electronics, MEMS, BioMEMS, and Nanotechnology* Vol. 5055 International Society for Optics and Photonics, 2003, p. 1–9
- [12] BERNHARD, Jennifer T.: Reconfigurable Antennas. En: *Synthesis Lectures on Antennas* 2 (2007), Nr. 1, p. 1–66
- [13] BROWN, E. R.: On the gain of a reconfigurable-aperture antenna. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 49 (2001), Oct, Nr. 10, p. 1357–1362. – ISSN 0018–926X
- [14] BROWN, T. X.: An analysis of unlicensed device operation in licensed broadcast service bands. En: *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005.*, 2005, p. 11–29
- [15] CABRIC, D. ; TKACHENKO, A. ; BRODERSEN, R. W.: Spectrum Sensing Measurements of Pilot, Energy, and Collaborative Detection. En: *MILCOM 2006 - 2006 IEEE Military Communications conference*, 2006. – ISSN 2155–7578, p. 1–7
- [16] CAI, Y. ; GUO, Y. J. ; BIRD, T. S.: A Frequency Reconfigurable Printed Yagi-Uda Dipole Antenna for Cognitive Radio Applications. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 60 (2012), June, Nr. 6, p. 2905–2912. – ISSN 0018–926X
- [17] CHRISTODOULOU, C. G. ; TAWK, Y. ; LANE, S. A. ; ERWIN, S. R.: Reconfigurable Antennas for Wireless and Space Applications. En: *Proceedings of the IEEE* 100 (2012), July, Nr. 7, p. 2250–2261. – ISSN 0018–9219
- [18] EASTERBROOK, Steve ; SINGER, Janice ; ANNE STOREY, Margaret ; DAMIAN, Daniela. *Selecting Empirical Methods for Software Engineering Research*. 2008
- [19] HAYKIN, S.: Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. En: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 23 (2005), Feb, Nr. 2, p. 201–220. – ISSN 0733–8716
- [20] HUSSAIN, R. ; SHARAWI, M. S.: A Cognitive Radio Reconfigurable MIMO and Sensing Antenna System. En: *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 14 (2015), p. 257–260. – ISSN 1536–1225
- [21] JOHANSSON, M. ; XIAO, L.: Cross-layer optimization of wireless networks using nonlinear column generation. En: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 5 (2006), Feb, Nr. 2, p. 435–445. – ISSN 1536–1276

- [22] WON JUNG, Chang ; JER LEE, Ming ; LI, G. P. ; FLAVIUS, F. D.: Reconfigurable scan-beam single-arm spiral antenna integrated with RF-MEMS switches. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 54 (2006), Feb, Nr. 2, p. 455–463. – ISSN 0018–926X
- [23] K JAYAWEERA, Sudharman ; CHRISTODOULOU, Christos: Radiobots: Architecture, Algorithms and Realtime Reconfigurable Antenna Designs for Autonomous, Self-learning Future Cognitive Radios. (2011), 05
- [24] MANSOUR, G. ; HALL, P. S. ; GARDNER, P. ; RAHIM, M. K. A.: Tunable slot-loaded patch antenna for cognitive radio. En: *2012 Loughborough Antennas Propagation Conference (LAPC)*, 2012, p. 1–4
- [25] MITOLA, J.: Software radios-survey, critical evaluation and future directions. En: *[Proceedings] NTC-92: National Telesystems Conference*, 1992, p. 13/15–13/23
- [26] MITOLA, J.: Cognitive Radio Architecture Evolution. En: *Proceedings of the IEEE* 97 (2009), April, Nr. 4, p. 626–641. – ISSN 0018–9219
- [27] NELLA, A. ; GANDHI, A. S.: A Five-Port Integrated UWB and Narrowband Antennas System Design for CR Applications. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 66 (2018), April, Nr. 4, p. 1669–1676. – ISSN 0018–926X
- [28] PEDRAZA, Luis F. ; FORERO, Felipe ; PATRICIA PAEZ, Ingrid: Evaluación de ocupación del espectro radioeléctrico en Bogotá-Colombia. En: *Ingeniería y Ciencia* 10 (2014), 01, p. 127 – 143. – ISSN 1794–9165
- [29] POZAR, D.M.: *Microwave Engineering, 4th Edition*. Wiley, 2011. – ISBN 9781118213636
- [30] QUAN, Z. ; CUI, S. ; POOR, H. V. ; SAYED, A. H.: Collaborative wideband sensing for cognitive radios. En: *IEEE Signal Processing Magazine* 25 (2008), November, Nr. 6, p. 60–73. – ISSN 1053–5888
- [31] RASHID, Rozeha A. ; SARIJARI, Mohd A. ; FISAL, Norsheila ; YUSOF, S. K. S. ; MAHALIN, N. H.: Spectrum Sensing Measurement using GNU Radio and USRP Software Radio Platform, 2011
- [32] RODRÍGUEZ, D. O. ; SAAVEDRA, M. A. ; RAMÍREZ, G. A. ; ARAQUE, J. L.: Realization of a compact reconfigurable antenna for mobile communications. En: *2014 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, 2014, p. 284–287
- [33] SALAH DINE, F. ; GHAZI, H. E. ; KAABOUCH, N. ; FIIHRI, W. F.: Matched filter detection with dynamic threshold for cognitive radio networks. En: *2015 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*, 2015, p. 1–6

- [34] SCHAUBERT, Daniel H. ; FARRAR, Frederick G. ; HAYES, Scott T. ; SINDORIS, Arthur R.: Frequency-Agile, Polarization Diverse Microstrip Antennas and Frequency Scanned Arrays. / DEPARTMENT OF THE ARMY WASHINGTON DC. 1983. – Informe de Investigación
- [35] SHELLEY, S. ; COSTANTINE, J. ; CHRISTODOULOU, C. G. ; ANAGNOSTOU, D. E. ; LYKE, J. C.: FPGA-Controlled Switch-Reconfigured Antenna. En: *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 9 (2010), p. 355–358. – ISSN 1536–1225
- [36] SOBRON, I. ; DINIZ, P. S. R. ; MARTINS, W. A. ; VELEZ, M.: Energy Detection Technique for Adaptive Spectrum Sensing. En: *IEEE Transactions on Communications* 63 (2015), March, Nr. 3, p. 617–627. – ISSN 0090–6778
- [37] TAWK, Y. ; CHRISTODOULOU, C. G.: A New Reconfigurable Antenna Design for Cognitive Radio. En: *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 8 (2009), p. 1378–1381. – ISSN 1536–1225
- [38] TAWK, Y. ; COSTANTINE, J. ; AVERY, K. ; CHRISTODOULOU, C. G.: Implementation of a Cognitive Radio Front-End Using Rotatable Controlled Reconfigurable Antennas. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 59 (2011), May, Nr. 5, p. 1773–1778. – ISSN 0018–926X
- [39] TAWK, Y. ; COSTANTINE, J. ; CHRISTODOULOU, C. G.: Cognitive-radio and antenna functionalities: A tutorial [Wireless Corner]. En: *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 56 (2014), Feb, Nr. 1, p. 231–243. – ISSN 1045–9243
- [40] TAWK, Y. ; COSTANTINE, J. ; CHRISTODOULOU, C. G.: Reconfigurable Filtennas and MIMO in Cognitive Radio Applications. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 62 (2014), March, Nr. 3, p. 1074–1083. – ISSN 0018–926X
- [41] TAWK, Y. ; JAYAWEERA, S. K. ; CHRISTODOULOU, C. G. ; COSTANTINE, J.: A comparison between different cognitive radio antenna systems. En: *2011 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISPACS)*, 2011, p. 1–5
- [42] WHITE, C. R. ; REBEIZ, G. M.: Single- and Dual-Polarized Tunable Slot-Ring Antennas. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 57 (2009), Jan, Nr. 1, p. 19–26. – ISSN 0018–926X