

# **IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE CONTROL DE POTENCIA BASADO EN TEORÍA DE JUEGOS EN REDES WLAN**



**ÁLVARO JAVIER PABÓN ANDRADE  
CAMILO ERNESTO CAICEDO RAMÍREZ**

**Director:  
Víctor Fabián Miramá Pérez.**

**Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo de Radio e Inalámbricas - GRIAL  
Popayán, 2018**

# **IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE CONTROL DE POTENCIA BASADO EN TEORÍA DE JUEGOS EN REDES WLAN**



**Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de  
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**ÁLVARO JAVIER PABÓN ANDRADE  
CAMILO ERNESTO CAICEDO RAMÍREZ**

**Director:  
Víctor Fabián Miramá Pérez.**

**Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo de Radio e Inalámbricas - GRIAL**

Popayán, 2018.

# TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO .....	3
1.1 CONCEPTOS GENERALES SOBRE REDES WLAN.....	3
1.1.1 Arquitectura.....	3
1.1.2 Topologías y configuraciones.....	5
1.1.3 Modelo en capas de IEEE 802.11 .....	6
1.1.4 Principales problemas y desafíos en las redes WLAN .....	13
1.2 CONTROL DE POTENCIA.....	16
1.2.1 Control de potencia en lazo abierto.....	17
1.2.2 Control de potencia en lazo cerrado.....	17
1.2.3 Control de potencia en el enlace ascendente.....	18
1.2.4 Control de potencia en el enlace descendente.....	18
1.3 NOCIONES BÁSICAS DE TEORÍA DE JUEGOS .....	18
1.3.1 Definición formal de teoría de juegos .....	19
1.3.2 Tipos de juegos .....	21
1.3.3 Acciones y estrategias de un jugador.....	26
1.3.5 Conceptos de solución de un juego .....	26
1.4 APRENDIZAJE REFORZADO .....	28
2. DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y PLAN DE PRUEBAS. ....	30
2.1. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS .....	30
2.2. DISEÑO .....	31
2.2.1 Resumen de las características relevantes de los algoritmos de control de potencia basados en teoría de juegos.....	31
2.2.2 Selección del tipo de algoritmo y juego .....	33
2.2.3 Modelo del sistema .....	34
2.2.4 Modelo de control de potencia basado en teoría de juegos .....	35
2.2.5 Elección de los componentes hardware .....	39

2.2.6 Elección de las herramientas de desarrollo software .....	43
2.3. IMPLEMENTACIÓN .....	44
2.3.1 Representación del escenario WLAN con dispositivos SDR .....	44
2.3.2 Características de los USRPs B210. ....	45
2.3.3 USRP Hardware Driver .....	47
2.3.4 GNU Radio .....	47
2.3.5 Implementaciones SDR IEEE 802.11 desarrolladas en GNURadio .....	50
2.4. PLAN DE PRUEBAS .....	64
2.4.1 Parámetros de configuración de los dispositivos utilizados en la .....	
implementación. ....	65
3. PRUEBAS, ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	68
3.1. MODIFICACIÓN DE LA TASA DE APRENDIZAJE .....	68
3.2 ESCENARIO 1: ESCENARIO CON BAJA INTERFERENCIA. ....	70
3.2.1 Caso 1: STA sin movilidad .....	71
3.2.2 Caso 2: STA con movilidad .....	74
3.3. ESCENARIO 2 Y ESCENARIO 3: ESCENARIOS CON INTERFERENCIA	75
3.3.1 Caso 1: STA 1 y STA 2 sin movilidad.....	77
3.3.2 Caso 2: STA1 con movilidad, STA 2 estática .....	84
3.3.3. Caso 3: Con interferencia generada por el inhibidor de señal.....	86
4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	95
4.1. CONCLUSIONES .....	95
4.1.1 Conclusiones de la revisión bibliográfica y del estado del arte.....	95
4.1.2 Conclusiones de la fase de implementación .....	95
4.1.3 Conclusiones de la fase de evaluación y análisis.....	95
4.2. TRABAJOS FUTUROS .....	96

# LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1	Arquitectura de WLAN. ....3
Figura 1.2	Configuración Ad-Hoc o IBSS.....5
Figura 1.3	Configuración en modo infraestructura o BSS.....6
Figura 1.4	Arquitectura de la capa MAC.....7
Figura 1.5	Procedimiento de control de acceso aleatorio al medio.....8
Figura 1.6	Formato de la trama MAC.....9
Figura 1.7	Disposición de canales no superpuestos utilizados en DSSS.. ..... 12
Figura 1.8	Interferencia co-canal.. ..... 14
Figura 1.9	Interferencia entre canales vecinos.. ..... 15
Figura 1.10	Representación de un juego en forma normal o estratégica.....22
Figura 1.11	Representación de un juego en forma extensa.. ..... 23
Figura 1.12	Modelo de aprendizaje reforzado.. ..... 29
Figura 2.1	Modelo lineal secuencial. ....30
Figura 2.2	Escenario de red WLAN. ....35
Figura 2.3	RSSI y SNR en redes WLAN.....36
Figura 2.4	Diagrama del algoritmo de PC basado en GT. ....39
Figura 2.5	Tarjeta USRP B210.. .....42
Figura 2.6	Antena VERT 2450.....43
Figura 2.7	Escenario de implementación.....45
Figura 2.8	Estructura del USRP B210. ....46
Figura 2.9	Trayectoria de la señal a través del USRP.. .....47
Figura 2.10	Tipos de bloques de GNU Radio. ....48
Figura 2.11	Estructura de GNU Radio. ....49
Figura 2.12	Etapas de implementación.....52
Figura 2.13	Puertos de radiofrecuencia del USRP B210.....54
Figura 2.14	Implementación del sistema semiduplex en GNU Radio. ....54
Figura 2.15	Promedio de tramas perdidas vs coeficiente de autocorrelación.....56
Figura 2.16	Diagrama de flujo del algoritmo de PC basado en GT.....57
Figura 2.17	Correspondencia de elementos del vector de probabilidades y el vector de valores discretos de potencia.....58
Figura 2.18	Puerto de salida de la estrategia elegida por el algoritmo. ....59
Figura 2.19	Implementación de la asignación dinámica de potencia. ....60
Figura 2.20	Algoritmos de verificación MAC.....61
Figura 2.21	Mecanismo de realimentación de la SNR desde el AP a la STA.....62
Figura 2.22	Caracterización de la potencia de transmisión del USRP B210. ....63
Figura 3.1	Comportamiento inicial de la tasa de aprendizaje. ....68
Figura 3.2	Variación de la probabilidad de potencia con movilidad de la STA, sin reinicialización de la tasa de aprendizaje. ....69

Figura 3.3	Comportamiento final de la tasa de aprendizaje. ....	69
Figura 3.4	Variación de la probabilidad de potencia con movilidad de la STA, con reinicialización de aprendizaje. ....	70
Figura 3.5	Escenario de pruebas 1. ....	71
Figura 3.6	Variación de la probabilidad de potencias. ....	72
Figura 3.7	Variación de la SNR. ....	72
Figura 3.8	Variación de probabilidades para la STA 1 a diferentes distancias. ....	73
Figura 3.9	Comportamiento de la SNR y probabilidades con variabilidad del escenario para STA a 20 m. ....	74
Figura 3.10	Variación de la probabilidad de potencia para STA con movilidad. ....	75
Figura 3.11	Variación de la SNR para STA con movilidad. ....	75
Figura 3.12	Escenario de pruebas 2. ....	76
Figura 3.13	Variación de probabilidades para la STA a diferentes distancias. ....	78
Figura 3.14	Variación de la probabilidad y SNR para la STA ubicada a 5 m del AP. ....	79
Figura 3.15	Comparación de la variación de Probabilidad y SNR para la STA 1 a una distancia de 5 m en la banda de 5 GHz y 2,4 GHz. ....	80
Figura 3.16	Variación de la probabilidad para STA 1 a diferentes distancias. ....	81
Figura 3.17	Probabilidad vs número de iteraciones para la STA 1 y la STA 2 a distancias iguales. ....	82
Figura 3.18	SNR vs número de iteraciones para la STA 1 y la STA 2 a distancias iguales. ....	83
Figura 3.19	Probabilidad vs número de iteraciones para la STA 1 y la STA 2 a diferentes distancias. ....	83
Figura 3.20	Variación de la probabilidad de potencia para STA 1. ....	84
Figura 3.21	Variación de la SNR para STA 1. ....	85
Figura 3.22	Variación de la probabilidad de potencia para STA 1 con movilidad. ....	86
Figura 3.23	Variación de la SNR para STA 1 con movilidad. ....	86
Figura 3.24	Variación de la probabilidad y SNR para la STA con interferencia del inhibidor de señal. ....	87
Figura 3.25	Potencia de transmisión vs distancia para escenarios interiores y exteriores. ....	88
Figura 3.26	Ahorro de energía para escenarios interiores y exteriores. ....	89
Figura 3.27	Variación de la SNR considerando movilidad de la STA sin control de potencia. ....	90
Figura 3.28	Variación de la SNR considerando movilidad de la STA con control de potencia. ....	90
Figura 3.29	FER obtenida por las dos STAs con PC y sin PC en interiores y exteriores. ....	92
Figura 3.30	Throughput alcanzado por las dos STAs considerando el MCS 0, con PC y sin PC en interiores y exteriores. ....	94



# LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Campos de la trama MAC.....	10
Tabla 1.2 Subcampos del campo Frame Control.....	10
Tabla 1.3 Resumen de velocidades de transmisión de datos para técnicas DSSS, FHSS y OFDM. ....	13
Tabla 2.1 Resumen de las características de los algoritmos de control de potencia basados en teoría de juegos. ....	32
Tabla 2.2 Comparación de los aspectos más relevantes de los juegos cooperativos y no cooperativos. ....	33
Tabla 2.3 Series de USRPs comerciales ofrecidas por National Instruments. .	41
Tabla 2.4 Características del software de configuración del USRP.....	43
Tabla 2.5 Estructura en carpetas de un módulo de GNU Radio. ....	50
Tabla 2.6 Resultados de la variación del Coeficiente de autocorrelación.....	56
Tabla 2.7 Características técnicas de los equipos portátiles utilizados en las pruebas.....	65
Tabla 2.8 Parámetros de configuración de los dispositivos. ....	65

# LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>ACK</b>	<i>Acknowledgement</i> , Acuse de Recibo.
<b>ADC</b>	<i>Analog-to-Digital Converter</i> , Conversor Analógico a Digital.
<b>AI</b>	<i>Artificial Intelligence</i> , Inteligencia Artificial.
<b>AP</b>	<i>Access Point</i> , Punto de Acceso.
<b>BEE2</b>	<i>Berkeley Emulation Engine</i> , Motor de Emulación de Bekerley.
<b>BER</b>	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
<b>BPSK</b>	<i>Binary Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria.
<b>BR</b>	<i>Best Response</i> , Mejor Respuesta.
<b>BSS</b>	<i>Basic Service Set</i> , Conjunto de Servicios Básicos.
<b>BSSID</b>	<i>Basic Service Set Identifier</i> , Identificador de Conjunto de Servicios Básicos.
<b>CCA</b>	<i>Clear Channel Assessment</i> , Evaluación de Canales Libres.
<b>CCK</b>	<i>Complementary Code Keying</i> , Codificación de Código Complementario.
<b>CDMA</b>	<i>Code Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Código.
<b>CP</b>	<i>Coordination Point</i> , Punto Coordinador.
<b>CRC</b>	<i>Cyclic Redundancy Check</i> , Verificación de Redundancia Cíclica.
<b>CSMA/CA</b>	<i>Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance</i> , Acceso Múltiple por Detección de Portadora y Prevención de Colisiones.
<b>CTS</b>	<i>Clear to Send</i> , Listo para Enviar.
<b>DA</b>	<i>Destination Address</i> , Dirección de Destino.
<b>DAC</b>	<i>Digital-to-Analog Converter</i> , Conversor Digital a Analógico.

<b>DC</b>	<i>Direct Current</i> , Corriente Directa.
<b>DCF</b>	<i>Distributed Coordination Function</i> , Función de Coordinación Distribuida.
<b>DIFS</b>	<i>DCF Interframe Space</i> , Intervalo entre Tramas de la DCF.
<b>DL</b>	<i>Down Link</i> , Enlace Descendente.
<b>DS</b>	<i>Distribution System</i> , Sistema de Distribución.
<b>DSP</b>	<i>Digital Signal Processor</i> , Procesador Digital de Señal.
<b>DSSS</b>	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado por Secuencia Directa.
<b>ESS</b>	<i>Extended Service Set</i> , Conjunto de Servicios Extendidos.
<b>ETSI</b>	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> , Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones.
<b>FCC</b>	<i>Federal Communications Commission</i> , Comisión Federal de Comunicaciones.
<b>FER</b>	<i>Frame Error Rate</i> , Tasa de Error de Tramas.
<b>FHSS</b>	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia.
<b>FPGA</b>	<i>Field Programmable Gate Array</i> , Arreglo de Compuertas Programable.
<b>FSC</b>	<i>Frame Check Sequence</i> , Secuencia de Verificación de Trama.
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i> , Sistema de Posicionamiento Global.
<b>GT</b>	<i>Game Theory</i> , Teoría de Juegos.
<b>IBSS</b>	<i>Independent Basic Service Set</i> , Conjunto de Servicios Básicos Independiente.
<b>IFS</b>	<i>Interframe Spacing</i> , Espaciamiento entre Tramas.
<b>IoT</b>	<i>Internet of Things</i> , Internet de las Cosas.

<b>KUARK</b>	<i>Kansas University Agile Radio</i> , Radio Ágil de la Universidad de Kansas.
<b>M2M</b>	Machine to Machine, Máquina a Máquina.
<b>MAC</b>	<i>Media Access Control</i> , Control de Acceso al Medio.
<b>MPDU</b>	<i>MAC Protocol Data Unit</i> , Unidad de datos de Protocolo de la capa MAC.
<b>NAV</b>	<i>Network Allocation Vector</i> , Vector de Asignación de Red.
<b>NE</b>	<i>Nash Equilibrium</i> , Equilibrio de Nash.
<b>NIC</b>	<i>Network Interface Card</i> , Tarjeta de Interfaz de Red.
<b>OFDM</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal.
<b>OSI</b>	<i>Open System Interconnection</i> , Interconexión de Sistemas Abiertos.
<b>PC</b>	<i>Power Control</i> , Control de Potencia.
<b>PCF</b>	<i>Point Coordination Function</i> , Función de Punto de Coordinación.
<b>PDR</b>	<i>Packet Delivery Ratio</i> , Relación de Entrega de Paquetes.
<b>PHY</b>	<i>Physical Layer</i> , Capa Física
<b>PIFS</b>	<i>PCF Interframe Space</i> , Intervalo entre Tramas del PCF.
<b>PLCP</b>	<i>Physical Layer Convergence Procedure</i> , Procedimiento de Convergencia de la Capa Física.
<b>PMD</b>	<i>Physical Medium Dependent</i> , Dependiente del Medio Físico.
<b>QPSK</b>	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura.
<b>RA</b>	<i>Receiver Address</i> , Dirección del Receptor.
<b>RFIC</b>	<i>Radio Frequency Integrated Circuit</i> , Circuito Integrado de Radiofrecuencia .
<b>RL</b>	<i>Reinforced Learning</i> , Aprendizaje Reforzado.

<b>RRM</b>	<i>Radio Resource Management</i> , Gestión de Recursos Radio.
<b>RSSI</b>	<i>Received Signal Strength Indicator</i> , Indicador de Intensidad de Señal Recibida.
<b>RTS</b>	<i>Request to Send</i> , Peticion para Enviar.
<b>SA</b>	<i>Source Address</i> , Dirección de Origen.
<b>SDR</b>	<i>Software Defined Radio</i> , Radio Definido por Software.
<b>SE</b>	<i>Satisfaction Equilibrium</i> , Equilibrio de Satisfacción.
<b>SINR</b>	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido más Interferencia.
<b>SNR</b>	<i>Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido.
<b>SSID</b>	<i>Service Set Identifier</i> , Identificador de Conjunto de Servicios.
<b>STA</b>	<i>Station</i> , Estación.
<b>TA</b>	<i>Transmitter Address</i> , Dirección del Transmisor.
<b>TCP</b>	<i>Transmission Control Protocol</i> , Protocolo de Control de Transmisión.
<b>TDD</b>	<i>Time Division Duplexing</i> , Duplexacion por División de Tiempo
<b>TPC</b>	<i>Transmission Power Control</i> , Control de Potencia de Transmisión.
<b>UHD</b>	<i>USRP Hardware Driver</i> , Controlador del Hardware USRP.
<b>UL</b>	<i>Up Link</i> , Enlace Ascendente.
<b>USB</b>	<i>Universal Serial Bus</i> , Bus Serial Universal.
<b>USRP</b>	<i>Universal Software Radio Peripheral</i> , Periférico Universal de Radio Software.
<b>VCS</b>	<i>Virtual Carrier Sense</i> , Censado Virtual de Portadora.
<b>WARP</b>	<i>Wireless Open Access Research Platform</i> , Plataforma de Investigación Inalámbrica de Acceso Abierto.
<b>WIFI</b>	<i>Wireless Fidelity</i> , Fidelidad Inalámbrica

- WIME**      *Wireless Measurement and Experimentation*, Experimentación y Medidas Inalámbricas.
- WLAN**      *Wireless Local Area Network*, Red de Área Local Inalámbrica.
- WoLF**      *Win or Learn Fast*, Ganar o Aprender Rápido.



## INTRODUCCIÓN

Actualmente, las redes inalámbricas constituyen una de las áreas de mayor crecimiento en el sector de las comunicaciones. Específicamente las Redes de Área Local Inalámbricas (WLAN, *Wireless Local Area Network*), serán las encargadas de manejar la mayor cantidad de tráfico de datos de los diferentes servicios que implican el despliegue del Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*) y se proyectan como una buena alternativa para proporcionar conectividad a los usuarios. Fidelidad Inalámbrica (WIFI, *Wireless Fidelity*) nombre comercial del estándar IEEE 802.11 es una de las tecnologías encargadas de dar soporte a nuevas implementaciones como IoT, comunicaciones Máquina a Máquina (M2M, *Machine to Machine*) y comunicaciones en procesos industriales. Debido a la ubicuidad y el gran despliegue de este tipo de redes, los problemas de interferencia entre sistemas adyacentes son cada vez más críticos llevando el desempeño de estas redes a un nivel muy por debajo de los límites óptimos alcanzables. El principal inconveniente de IEEE 802.11 se debe al limitado número de canales ortogonales en las bandas de frecuencia en que opera esta tecnología, esto apoyado en el hecho de que estas bandas de frecuencia son no licenciadas y por ende las implementaciones de WLAN con este estándar se hacen de manera no coordinada [1].

El despliegue masivo de estas redes, la aparición de nuevos servicios y el crecimiento del tráfico multimedia, requieren el adecuado diseño, planificación y despliegue de las redes inalámbricas. Los sistemas de comunicaciones inalámbricos incluyen técnicas de Gestión de Recursos Radio (RRM, *Radio Resource Management*) dentro de sus procesos de control para lograr un uso eficiente de los recursos de comunicación disponibles en una red [2], [3]. Una de las técnicas más sobresalientes dentro de los mecanismos de RRM es el Control de Potencia de Transmisión (TPC, *Transmission Power Control*) [4], [5], [6] y [7], el cual ha demostrado ser una técnica que permite incrementar la eficiencia energética, aumentar la vida útil de las baterías de los dispositivos inalámbricos, mejorar el desempeño de la red y optimizar la reutilización del número finito de canales lo que reduce notablemente la interferencia gracias a la asignación del valor de potencia de transmisión, acorde a las condiciones del escenario de despliegue y de las características de Calidad del Servicio (QoS, *Quality of Service*).



Una técnica que se ha demostrado beneficiosa para realizar control de potencia es la Teoría de Juegos (GT, *Game Theory*) [8]. La GT es una herramienta adecuada y flexible para modelar escenarios en los cuales los participantes interactúan estratégicamente por acceder a determinado recurso o beneficio [9], [10]. Investigaciones previas se enfocan en el análisis teórico complementado con simulaciones software a nivel de sistema de algoritmos de control de potencia aplicando GT. Existen limitados trabajos que implementan de manera práctica en escenarios reales mecanismos de control de potencia [1] y lo hacen sin aplicar GT. El propósito del actual trabajo de grado es aportar al desarrollo de la investigación, mediante la implementación de un algoritmo de control de potencia basado en GT en una red WLAN.

Los resultados de esta investigación demuestran que el algoritmo hace más eficiente el uso de la energía mientras reduce los problemas de interferencia propios de la implementación. La reducción de interferencia mejora el desempeño general de la red, disminuyendo la Tasa de Error de Tramas (FER, *Frame Error Rate*) y aumentando la velocidad de datos. Además, las pruebas realizadas en escenarios con condiciones de movilidad de los dispositivos en la red permiten evidenciar que el algoritmo adapta la potencia de transmisión de estos dispositivos en estas condiciones.

Este documento consta de cuatro capítulos: en el primero se presentan los conceptos generales de las redes WLAN, control de potencia y teoría de juegos; en el segundo capítulo se presenta el desarrollo metodológico del proceso de diseño; implementación y plan de pruebas del algoritmo de control de potencia; En el tercer capítulo se muestran las pruebas realizadas y el análisis de los resultados; finalmente, en el cuarto capítulo se resumen las conclusiones y los trabajos futuros.



# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 CONCEPTOS GENERALES SOBRE REDES WLAN

Una WLAN es una red en la cual varios dispositivos se comunican entre sí en zonas geográficas limitadas, aproximadamente en un rango de hasta 100 m, utilizando frecuencias sin licencia en la banda de 2,4 GHz y 5 GHz. Este tipo de redes utiliza ondas electromagnéticas como medio de transmisión de la información, minimizando la necesidad de tendido de cable entre los terminales de usuario. La gran ventaja de esta tecnología es que ofrece gran movilidad al usuario por medio de una instalación muy sencilla [11], [12].

### 1.1.1 Arquitectura.

La arquitectura IEEE 802.11 define distintos tipos de sistemas inalámbricos y distintas formas de asociarse entre ellos, convirtiéndose en una arquitectura muy flexible que soporta desde pequeñas redes hasta grandes redes permanentes o semipermanentes [13].

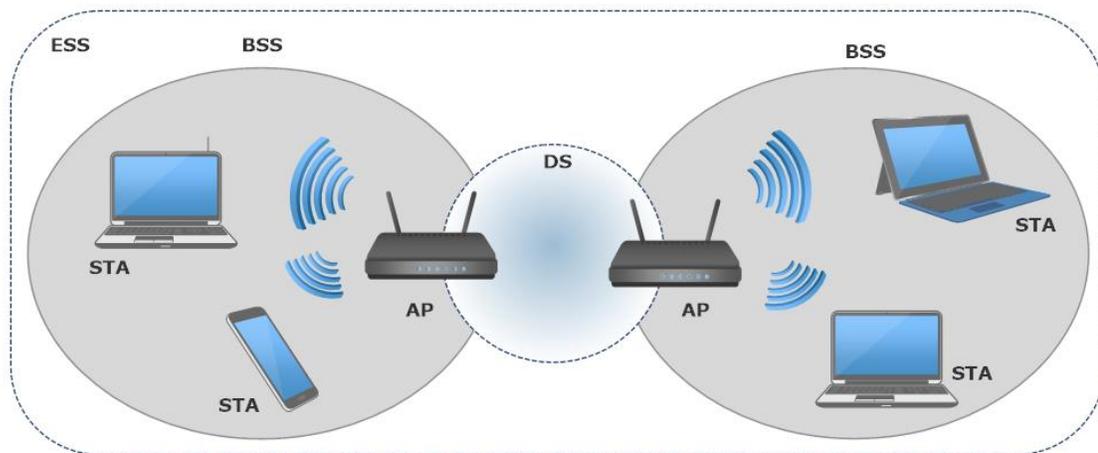


Figura 1.1 Arquitectura de WLAN. Por los autores.

La arquitectura IEEE 802.11 mostrada en la figura 1.1, comprende los siguientes componentes:

**Estación (STA, Station):** es cualquier dispositivo dotado de una Tarjeta de Interfaz de Red (NIC, *Network Interface Card*) que le permite tener conectividad inalámbrica y usar la red para comunicarse. La STA puede ser fija, móvil o portable [13], [14].



**Punto de Acceso (AP, Access Point):** dispositivo que coordina la transmisión entre STAs o nodos inalámbricos que se conectan a él y que hace las veces de puente entre la red cableada y la red inalámbrica [13].

**Conjunto de Servicios Básicos (BSS, Basic Service Set):** es el bloque básico de una red IEEE 802.11, constituido por un conjunto de STAs que se pueden comunicar entre sí dentro de un área de cobertura determinada y un AP central que sirve como punto de contacto único para cada dispositivo que desee utilizar o hacer parte del BSS. Toda la información debe pasar a través del AP antes de llegar a su destino. El AP anuncia la existencia del BSS para que las STAs puedan identificarlo a través de un Identificador de Conjunto de Servicios Básicos (BSSID, *Basic Service Set Identifier*) que es la dirección de Control de Acceso al Medio (MAC, *Media Access Control*) del AP y un Identificador de Conjunto de Servicios (SSID, *Service Set Identifier*), el cual es un nombre lógico que puede ser entendido por las personas. A esta configuración también se le llama modo infraestructura.

Por lo general, una red inalámbrica aprovecha los APs para la organización, el control y la escalabilidad. En algunas ocasiones, especialmente en situaciones improvisadas no es deseable depender de un AP para comunicarse, en estos casos, el estándar permite que dos o más STAs se comuniquen entre si formando un Conjunto de Servicios Básicos Independiente (IBSS, *Independent Basic Service Set*) o red *Ad-Hoc*.

**Sistema de Distribución (DS, Distribution System):** el papel del AP en el centro del BSS no sólo se limita a la gestión de ella, también gestiona la comunicación entre miembros que no pertenecen al mismo BSS. El sistema de distribución es la infraestructura cableada o inalámbrica que permite la interconexión y el envío de información entre distintos APs que proporcionan cobertura a la misma red.

**Conjunto de Servicios Extendidos (ESS, Extended Service Set):** en muchas ocasiones un único AP no es suficiente para cubrir toda el área donde están ubicados los dispositivos de los usuarios. Para cubrir una mayor área se necesitan agregar más APs y distribuirlos geográficamente. Los APs comunican y coordinan sus operaciones a través de una infraestructura conmutada formando un conjunto de BSS denominado ESS.

El mismo SSID que se define en un AP debe ser definido en todos los APs dentro de un ESS para que el usuario no necesite reconfigurarse cada vez que se mueve a una celda diferente, por lo tanto, independientemente de la ubicación de un cliente dentro del ESS, el SSID permanecerá igual, pero el cliente siempre podrá distinguir un AP de otro ya que el BSSID difiere para cada celda [11].



## 1.1.2 Topologías y configuraciones

La versatilidad y flexibilidad de las redes inalámbricas permiten una gran variedad de configuraciones que ayudan a este tipo de redes a adaptarse casi a cualquier necesidad. Estas configuraciones se pueden dividir en dos grandes grupos, la configuración *Peer to Peer* y la configuración en modo infraestructura [15].

### 1.1.2.1 Configuración *Peer to Peer (Ad-Hoc)*

En esta configuración coexisten solo los elementos necesarios para una comunicación inalámbrica, estos elementos pueden ser terminales de usuario que cuentan con adaptadores inalámbricos. Por ende, esta configuración no hace uso de APs como se muestra en la figura 1.2. En este tipo de redes, el único requisito es que una STA esté dentro del rango de cobertura radioeléctrica de otra STA, para llevar a cabo el proceso de comunicación. Además, es una configuración que permite una fácil implementación y no requiere de ningún tipo de gestión administrativa [16].

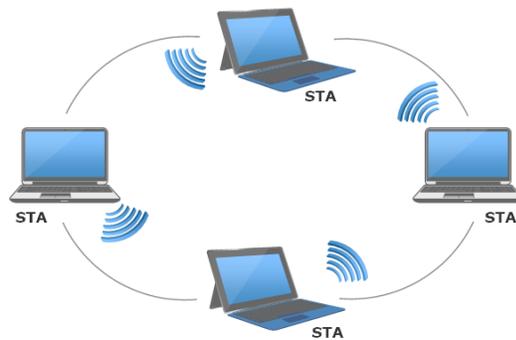


Figura 1.2 Configuración Ad-Hoc o IBSS .Por los autores.

### 1.1.2.2 Configuración en modo infraestructura

La figura 1.3 presenta la configuración en modo infraestructura, en la cual se adiciona un AP que permite incrementar el alcance de una red Ad-Hoc, debido a que actúa como un repetidor entre las STAs. Además, brinda a la red inalámbrica otras posibilidades como el *roaming* o itinerancia, es decir que los terminales pueden moverse entre celdas sin sufrir cortes en la comunicación.

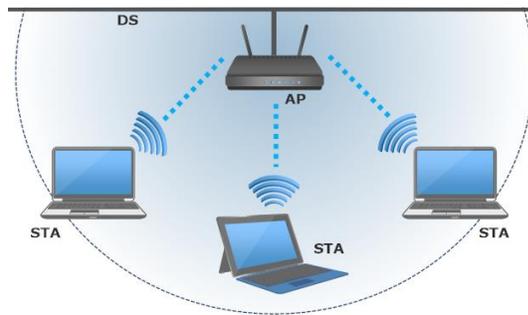


Figura 1.3 Configuración en modo infraestructura o BSS. Por los autores.

### 1.1.3 Modelo en capas de IEEE 802.11

El estándar IEEE 802.11 se divide en dos capas principales: la capa *MAC* y la capa Física (*PHY*, *Physical*), que corresponden estrechamente con las capas más bajas del modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (*OSI*, *Open System Interconnection*). Estas dos capas permiten hacer una separación funcional del estándar y lo que es más importante, que un único protocolo de datos pueda usarse con distintos métodos de transmisión [15], [17].

#### 1.1.3.1 Capa MAC

El diseño de un protocolo de acceso al medio para las redes inalámbricas es mucho más complejo en comparación con las redes cableadas, ya que deben tenerse en cuenta las diferentes topologías de red inalámbrica y aspectos como: interferencias, variaciones en la potencia de la señal, conexiones y desconexiones repentinas en la red, *roaming* o itinerancia. A pesar de todo esto, la norma IEEE 802.11 define una única capa MAC para todas las redes físicas. La principal función de esta capa es coordinar de una forma eficiente el acceso al medio de transmisión de las distintas estaciones que lo comparten, realizando funciones como cifrado, encriptación, gestión de alimentación eléctrica, sincronización y soporte de *roaming* entre múltiples APs [13], [15].

La arquitectura MAC se compone de dos funcionalidades básicas: la Función de Coordinación Distribuida (*DCF*, *Distributed Coordination Function*) y la Función de Coordinación Puntual (*PCF*, *Point Coordination Function*) como se muestra en la figura 1.4.

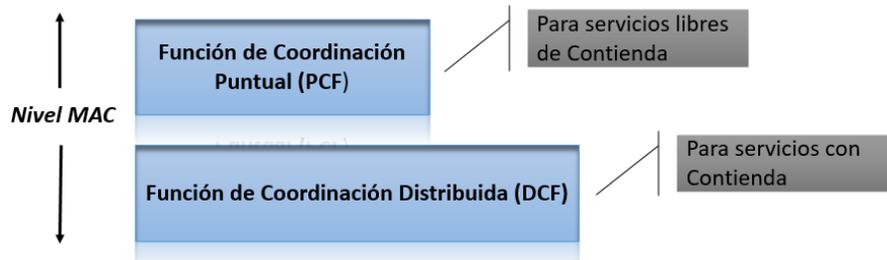


Figura 1.4 Arquitectura de la capa MAC. Tomada de [16].

- **Función de Coordinación Distribuida - DCF**

La DCF distribuye a todos los dispositivos de la red las funciones realizadas para acceder al canal inalámbrico. Esta función se encuentra en la capa inferior de la subcapa MAC, su funcionamiento se basa en técnicas de acceso aleatorio al medio. El tráfico que se transmite bajo esta funcionalidad es de carácter asíncrono ya que estas técnicas de contienda introducen retardos aleatorios, los cuales no son predecibles ni tolerados por los servicios síncronos [18].

La DCF utiliza el método de Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Prevención de Colisión (CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance*) que se muestra en la figura 1.5. Inicialmente una STA antes de transmitir información verifica si el medio inalámbrico está libre u ocupado. Si el medio se encuentra libre, la STA ejecuta una espera adicional de un periodo de tiempo llamado Espacio entre Tramas (IFS, *Interframe Space*) utilizadas para procesamiento y sincronización. Si durante este intervalo temporal o desde el principio, el medio se determina ocupado, entonces la STA debe esperar hasta el final de la transmisión que se está llevando a cabo en ese momento. Finalizada la transmisión, cada STA ejecuta el algoritmo de *backoff* que determina una espera aleatoria, la cual permite reducir la probabilidad de colisión y evitar el uso del canal simultáneamente cuando hay varios clientes listos para transmitir, ya que el contador de tiempo de *backoff* es diferente en cada STA.

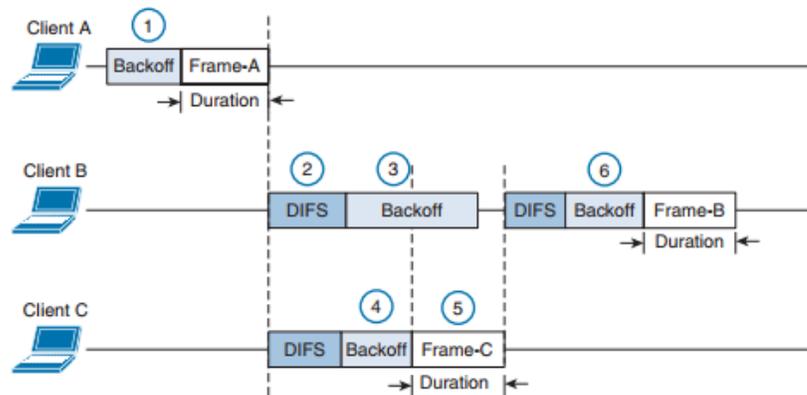


Figura 1.5 Procedimiento de control de acceso aleatorio al medio. Tomada de [11].

Sin embargo, CSMA/CA tiene dos situaciones particulares que disminuyen el desempeño de la red, estas situaciones son:

- ✓ **Nodos Ocultos:** una STA cree que el canal está libre, pero en realidad está siendo ocupado por un nodo que la STA no alcanza a escuchar.
- ✓ **Nodos expuestos:** una STA cree que el canal está ocupado, pero en realidad está libre ya que el nodo que está ocupando el canal no interfiere en su transmisión.

La solución es usar un segundo método de detección de portadora llamado Detección Virtual de Portadora (VCS, *Virtual Carrier Sense*) que permite a un nodo reservar el canal por un determinado período de tiempo usando tramas Solicitud para Enviar (RTS, *Request to Send*) y Listo para Enviar (CTS, *Clear to Send*). Antes de transmitir, el nodo emisor envía un RTS al AP especificando en el campo Duración/ID, el tiempo que solicita reservar para la transmisión. Esta información es guardada por los demás nodos dentro del alcance del AP en un temporizador llamado Vector de Asignación de Red (NAV, *Network Allocation Vector*). El AP responde con un CTS que contiene el tiempo asignado para la reserva y este es recibido por todos los nodos al alcance del AP, los cuales actualizan su NAV de acuerdo a la información suministrada y esperan el tiempo requerido, resolviendo así el problema del nodo oculto[16], [19].

Además de RTS y CTS, también se utilizan otras tramas de control a nivel MAC: la trama de Acuse de Recibo (ACK, *Acknowledgement*) y la trama *Ps-Poll*. La trama ACK se utiliza para confirmar que la trama ha sido recibida correctamente y la *Ps-Poll* se usa para que una STA solicite al AP las tramas pendientes por transmitir después de salir de un estado de ahorro de energía [13].



- **Función de Coordinación Puntual - PCF**

La PCF proporciona transferencia de tramas libre de contienda usando un Punto Coordinador (CP, *Coordination Point*), el cual opera en el AP del BSS, para detectar una portadora y determinar qué STA tiene derecho a transmitir en cada momento. El CP está planteado para alternar periodos libres de contienda con periodos de contienda, es decir, DCF y PCF pueden funcionar alternativamente. Al final de un periodo DCF, el CP puede generar un nuevo periodo libre de contienda, asignando el canal de forma determinista gracias a que el Intervalo entre Tramas de la PCF (PIFS, *PCF Interframe Space*) es menor que el Intervalo entre Tramas de la DCF (DIFS, *DCF Interframe Space*).

- **Formato de la trama MAC**

En la figura 1.6 se presenta el formato de la trama MAC. Esta trama está conformada por los siguientes campos:

- **Encabezado MAC:** conformado por la información de control de trama, duración y control de secuencia.
- **Datos:** puede contener información de control, gestión o datos, su longitud es variable.
- **Secuencia de Verificación de Trama (FCS, Frame Check Sequence):** este campo contiene la Verificación de Redundancia Cíclica (CRC, *Cyclic Redundancy Check*) de 32 bits [19].



Figura 1.6 Formato de la trama MAC. Adaptada de [17].

En las tablas 1.1 y 1.2 se explican los campos y subcampos de la trama MAC presentada en la figura 1.6.



Tabla 1.1 Campos de la trama MAC

Campo	Significado
<b>Frame Control</b>	Se explica en la tabla 1.2.
<b>Duración/ID</b>	Se utiliza para indicar la duración del periodo de transmisión que ha reservado una STA.
<b>Address 1- 4</b>	Contiene direcciones de 48 bits el cual incluye la Dirección de Destino (DA, <i>Destination Address</i> ), la Dirección de Origen (SA, <i>Source Address</i> ), la Dirección de la STA de Transmisión (TA, <i>Transmitter Address</i> ) y la Dirección de la STA de Recepción (RA, <i>Receiver Address</i> ).
<b>Sequence Control</b>	Contiene tanto el número de secuencia como el número de fragmento de la trama que se está enviando. No está presente en las tramas de control.
<b>Data</b>	Varía según el tipo de trama enviada, generalmente contiene datos provenientes de capas superiores.
<b>FCS</b>	Contiene el campo de verificación de trama.

Tabla 1.2 Subcampos del campo Frame Control

Campo	Significado
<b>Protocol Version</b>	Para todos los estándares vigentes el valor 0, este campo cambiará solo cuando exista una incompatibilidad fundamental entre una nueva versión y la edición anterior de la norma [17].
<b>Type</b>	Identifica si la trama es de tipo de datos, control o gestión.
<b>Subtype</b>	Las tramas de datos, control o gestión pueden ser de diferentes tipos definidos en el campo <i>subtype</i> .
<b>From DS / To DS</b>	Identifica si la trama se envía o se recibe hacia o desde el sistema de distribución. En redes ad-hoc, tanto <i>ToDS</i> como <i>FromDS</i> tienen el valor de cero. El caso más complejo contempla el envío entre dos STAs a través del sistema de distribución, en tal caso <i>ToDS</i> y <i>FromDS</i> se configuran con el valor de 1.
<b>More Frag</b>	Se activa si se usa fragmentación.
<b>Retry</b>	Se activa si la trama es de retransmisión.
<b>Power Management</b>	Indica el modo de administración de energía de una STA, se configura con el valor de 1 si la STA utiliza el modo de economía de energía o <i>Power Save</i> .
<b>More Data</b>	Se activa si la STA tiene tramas pendientes en un punto de acceso.
<b>WEP</b>	Se activa si se usa el mecanismo de autenticación y encriptado.
<b>Order</b>	Se utiliza con el servicio de ordenamiento estricto.



### 1.1.3.2 Capa PHY

La capa PHY se divide en 2 subcapas:

- Procedimiento de Convergencia de la Capa Física (*PLCP, Physical Layer Convergence Procedure*): tiene la función de adaptar las capacidades del subnivel inferior a los servicios MAC. PLCP define la forma de mapear las Unidades de Datos de Protocolo de la subcapa MAC (MPDU, *MAC Protocol Data Unit*) a un formato de tramas adecuado para ser enviadas y recibidas por el medio de transmisión inalámbrico [17], [19].
- Dependiente del Medio Físico (*PMD, Physical Medium Dependent*): tiene la función de definir las características y métodos de transmisión y recepción de datos a través del medio inalámbrico entre dos o más STAs y además permite realizar la Evaluación de Canales Libres (CCA, *Clear Channel Assessment*) para detectar las portadoras que se encuentran en el medio y así considerar el canal libre u ocupado [11], [17].

### 1.1.3.3 Técnicas de transmisión

Para dar soporte a las velocidades de datos requeridas en las redes WLAN, se utilizan técnicas de transmisión de espectro ensanchado como Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia (FHSS, *Frequency Hopping Spread Spectrum*), Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*) y técnicas multiportadora como Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

**A. Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia - FHSS:** la versión original del estándar 802.11 utiliza FHSS logrando una velocidad de transmisión de datos máxima de 2 Mbps en la banda de 2,4 GHz. Esta técnica consiste en transmitir una parte de la información en determinada frecuencia durante un intervalo de tiempo inferior a 400 ms, al terminar este tiempo, se selecciona otra frecuencia para continuar con el proceso de transmisión, de esa manera la información se transmite en distintas frecuencias. El orden en los saltos de frecuencia que el emisor debe realizar está determinado por una secuencia aleatoria que el receptor también debe conocer para sintonizar siempre la frecuencia correcta en un momento dado. Para esto, la banda de frecuencia utilizada se divide en un conjunto de canales que dependen de la zona geográfica y pueden llegar hasta 79 canales de 1 MHz en algunos países. Esta técnica proporciona alta inmunidad a interferencias y al ruido ambiente, pero tiene las siguientes limitaciones:



- Limitado ancho de banda de canal (1 MHz), restringiendo la velocidad a 1 y 2 Mbps
- Los transmisores en un área podrían ocasionar colisiones e interferir sobre otros en canales iguales.

Por esta razón, la técnica FSSS fue reemplazada por DSSS [11], [16].

**B. Espectro Ensanchado por Secuencia Directa - DSSS:** esta técnica estandarizo la capa física para soportar velocidades de transmisión de datos de hasta 11 Mbps, sin embargo, la versión del estándar que utiliza esta técnica es 802.11b. Esta técnica consiste en la generación de una secuencia pseudoaleatoria o señal de *chip* por cada bit de datos. Cada bit correspondiente a un 1 es substituido por una secuencia de bits específica y el bit igual a 0 es substituido por su complemento. [20]. Esta secuencia está diseñada para proteger a la señal contra errores por ruido o interferencia. DSSS utiliza pocos canales, los cuales son fijos y con mayor ancho de banda que los utilizados en la técnica FHSS, además puede soportar esquemas de modulación de mayor orden y velocidades de transmisión de datos escalables.

La banda de 2,4 GHz está formada por 14 canales como se indica en la figura 1.7. Cada canal tiene un ancho de 22 MHz, y las frecuencias centrales están separadas una de otra por 5 MHz, sin embargo, no todos los canales se pueden utilizar en todos los países. Por ejemplo, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, *Federal Communications Commission*) limita la banda hasta el canal 11, el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*) permite el uso de los canales 1 hasta el 13, Japón permite que se utilicen los 14 canales, pero con algunas restricciones para el canal 14. A fin de evitar problemas de interferencia en el sistema, la separación entre las frecuencias centrales de los canales debe ser como mínimo de 25 MHz, de este modo solo se pueden utilizar 3 canales independientes, la disposición más común es usar los canales 1, 6 y 11.

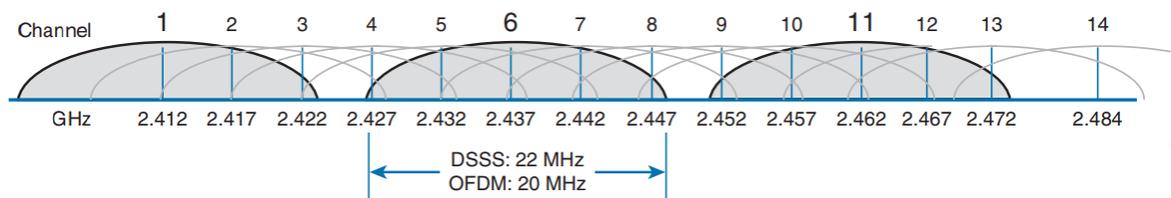


Figura 1.7 Disposición de canales no superpuestos utilizados en DSSS. Tomada de [11].



**C. Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal - OFDM:** las versiones del estándar que utilizan esta técnica son IEEE 802.11a/g/n/ac. OFDM divide una portadora de datos de alta velocidad en varias subportadoras de menor velocidad, a través de las cuales se transmiten datos en paralelo. Cada canal de 20 MHz se divide en 64 subportadoras, 48 de datos, 4 subportadoras piloto y 12 de guarda que no se transmiten, solo sirven para lograr un espaciamiento entre los canales. Para evitar los problemas de interferencia y hacer más eficiente el uso del espectro, todas las subportadoras se superponen con las demás de forma ortogonal. Esto permite ofrecer diferentes velocidades de datos a través de varios esquemas de modulación como BPSK, QPSK y 16-QAM y 64-QAM, estas velocidades se muestran en la tabla 1.3 junto con un resumen de velocidades de transmisión de datos para las técnicas de transmisión de espectro ensanchado.

*Tabla 1.3 Resumen de velocidades de transmisión de datos para técnicas DSSS, FHSS y OFDM.*

Modulación	Codificación	FHSS (Mbps)	DSSS (Mbps)	OFDM (Mbps)
<b>GFSK 2 Niveles</b>	2 desviaciones de frecuencia	1	--	--
<b>GFSK 4 Niveles</b>	4 desviaciones de frecuencia	2	--	--
<b>DBPSK</b>	Códigos Barker	--	1	--
<b>QPSK</b>	Códigos Barker	--	2	--
<b>CCK 4</b>	Códigos Barker	--	5,5	--
<b>BPSK</b>	1/2	--	--	6
<b>BPSK</b>	3/4	--	--	9
<b>CCK 8</b>	Códigos Barker	--	11	--
<b>QPSK</b>	1/2	--	--	12
<b>QPSK</b>	3/4	--	--	18
<b>16-QAM</b>	1/2	--	--	24
<b>16-QAM</b>	3/4	--	--	36
<b>16-QAM</b>	2/3	--	--	48
<b>64-QAM</b>	3/4	--	--	54

#### 1.1.4 Principales problemas y desafíos en las redes WLAN

##### A. Seguridad en la red

La transmisión de información por el medio inalámbrico es más vulnerable a ataques de usuarios no autorizados en comparación con tecnologías cableadas, es por ello



que se debe prestar especial atención a la seguridad. Los atacantes buscan redes WLAN inseguras con el propósito de robar la información sensible de los usuarios.

### **B. Instalación y diseño**

No todos los sitios de cobertura se crean de igual manera, incluso sitios que parecen similares, pueden requerir diferentes configuraciones, por lo tanto, se necesita un enfoque diferente para la instalación en cada sitio.

Los problemas más críticos que influyen en el desempeño de la red y que a su vez serán abordados en el presente trabajo de grado son:

### **C. Administración de energía**

El consumo de energía siempre será un reto en las WLAN, ya que los dispositivos móviles o STAs funcionan con baterías, las cuales tienen una capacidad de vida limitada. Por lo tanto, para maximizar la duración de la batería, el consumo de energía de los dispositivos de una red de este tipo debe ser bajo y debe permitir conservar tanta energía como sea posible [19].

### **D. Interferencia.**

La interferencia se puede describir por la forma en que se superponen las señales:

- **Interferencia Co-canal:** se produce cuando dos o más transmisores utilizan el mismo canal de forma simultánea como se muestra en la figura 1.8, en esta situación, las señales se superponen completamente y la velocidad de transmisión de datos del canal se afecta ya que la superposición de las señales genera pérdidas de datos, obligando a la retransmisión de la información perdida y ocasionando retardos en la comunicación.

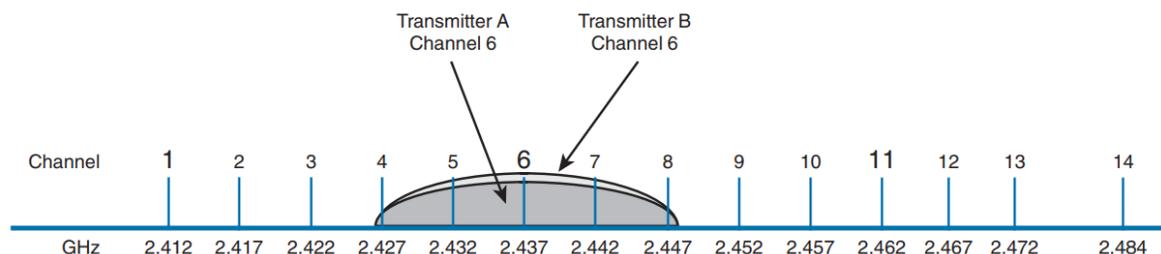


Figura 1.8 Interferencia co-canal. Tomada de [11].



Debido a que la banda de 2,4 GHz ofrece solo 3 canales no superpuestos, el hecho de que haya muchos transmisores en una misma área obliga a que estos transmitan en el mismo canal, la solución es realizar una planificación cuidadosa en la cual un transmisor comparta un canal con otros transmisores que estén suficientemente alejados y que su RSSI este por lo menos 19 dBm por encima de cualquier otra señal, para que la Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) obtenida tenga un nivel aceptable [11].

- **Interferencia de canal vecino<sup>1</sup>**: se produce cuando dos transmisores están transmitiendo en dos canales diferentes, pero sin el suficiente espaciamiento, de tal manera que las señales se superponen entre sí generando interferencia parcial de los canales, tal como se muestra en la figura 1.9.

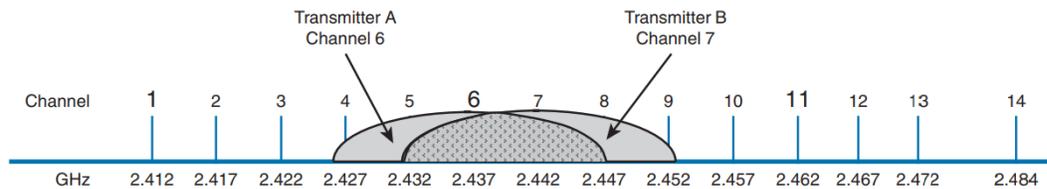


Figura 1.9 Interferencia entre canales vecinos. Tomada de [11].

Una solución es planificar previamente la configuración de cada transmisor para que cada uno de ellos utilice uno de los tres canales adyacentes de la banda de 2,4 GHz [11], sin embargo, si hay más de 3 transmisores, los problemas continúan. Otra solución es configurar adecuadamente la potencia de transmisión de los dispositivos.

Para hacer frente a estos problemas críticos de las redes WLAN, una de las técnicas más sobresalientes dentro de los mecanismos de RRM es el Control de Potencia (PC, *Power Control*). Esta técnica ha sido ampliamente estudiada generando buenos resultados en aspectos relacionados con: optimizar el uso de la energía, mejorar el desempeño de la red, reducir notablemente los problemas de interferencia y permitir la reutilización de frecuencias.

<sup>1</sup> La interferencia entre canales vecinos comúnmente se llama interferencia de canal adyacente. El estándar 802.11 define los canales adyacentes como canales no superpuestos, por ejemplo, los canales 1,6 y 11. Por lo tanto, por definición, es imposible que los canales adyacentes se superpongan e interfieran.



## 1.2 CONTROL DE POTENCIA

El control de potencia permite incrementar el desempeño de los sistemas de comunicación mediante el ajuste de la potencia de transmisión de los dispositivos. Esta técnica permite básicamente 3 funciones dentro de un sistema de comunicación inalámbrica: gestión de la interferencia, gestión de la energía y gestión de la conectividad [21], [22] .

- **Gestión de interferencia:** aunque las técnicas de transmisión y de acceso al medio evitan en gran medida los problemas de interferencia, la naturaleza de las comunicaciones inalámbricas hace que las señales interfieran entre sí. Los efectos de la interferencia son críticos cuando un gran número de redes coexisten en el mismo lugar o cuando hay gran cantidad de dispositivos conectados a una red. La interferencia genera colisiones entre tramas, pérdida de datos y retardos en la transmisión de la información debido a la necesidad de retransmisión de datos. En este sentido, el control de potencia permite hacer una reutilización espectral eficiente al reducir las zonas de cobertura, al mismo tiempo que incrementa el desempeño total de la red y mejora la QoS para los usuarios.

- **Gestión de la energía:** en WLAN, el gasto energético es un aspecto muy limitante, ya que la mayoría de los dispositivos en estas redes usan baterías. El control de potencia disminuye la cantidad de ciclos de carga y descarga de las baterías y se reducen los gastos innecesarios de energía, contribuyendo a la disminución de los costos totales de la red e incrementando duración de la batería de los dispositivos.

- **Control de conectividad:** debido a la incertidumbre y la variación en tiempo de los canales inalámbricos, incluso cuando no hay interferencia ni limitaciones respecto a la energía, el receptor debe mantener un nivel mínimo de señal recibida para que pueda mantenerse conectado con el transmisor y estimar el estado del canal. El control de potencia ayuda a mantener la conectividad lógica para un esquema de procesamiento de señal dado.

Los tipos de control de potencia más comunes en redes inalámbricas son: control de potencia en lazo abierto, lazo cerrado, en enlace ascendente y en enlace descendente. Estos tipos de control de potencia se implementan en sistemas de comunicación móvil celular y no en WIFI. Para IEEE 802.11 se implementan mecanismos de control de potencia como obligar a que las STAs entren en un modo de ahorro de energía o *Power Save* mientras no hay transmisión de datos y el mecanismo TPC, el cual utiliza el Indicador de Intensidad de Señal Recibida (RSSI,



*Received Signal Strength Indicator*) de los APs para adecuar la potencia de transmisión de los APs y evitar los problemas de interferencia [11] .

### **1.2.1 Control de potencia en lazo abierto**

Este mecanismo de control de potencia no requiere de realimentación entre la entidad receptora y la entidad transmisora. Para ello, el transmisor se encarga de estimar las pérdidas de propagación de la señal en el canal inalámbrico. Con esta estimación, el transmisor ajusta su nivel de potencia de transmisión a un nivel de potencia que le permita alcanzar a la entidad receptora.

La estimación del canal se hace sobre la señal recibida en la entidad transmisora proveniente de la entidad receptora. De esta forma, si la potencia de la señal recibida es baja, la entidad transmisora asume que la entidad receptora está lejos y por ende incrementa su potencia de transmisión. En caso de percibir un nivel de potencia alto, la entidad transmisora asume que la entidad receptora está cerca, con lo cual reduce su nivel de potencia de transmisión. Sin embargo, esta estimación sólo considera las pérdidas ocasionadas por la distancia por lo que la estimación del canal es imprecisa y más aún en enlaces con frecuencias de subida y bajada diferentes, ya que los desvanecimientos en dichas frecuencias son procesos independientes. Por esta razón, este mecanismo de control de potencia no es muy eficiente [21], [23].

### **1.2.2 Control de potencia en lazo cerrado**

En este mecanismo de control de potencia se realimenta información de control desde la entidad que recibe la señal hacia la entidad que transmite la señal. En este caso, la entidad receptora se encarga de calcular la potencia de la señal recibida y enviar comandos a la entidad transmisora a fin de indicarle si debe incrementar o disminuir la potencia de transmisión. Este proceso se repite hasta que la entidad transmisora emita con un nivel de potencia adecuado.

El proceso de realimentación garantiza que la estimación de canal sea más precisa en comparación con la estimación realizada con control de potencia en lazo abierto, debido a que la estimación se hace sobre el canal en el cual se aplica el control de potencia. De esta forma, se consideran otras pérdidas propias del escenario como las generadas por desvanecimiento multirayecto. Sin embargo, el procedimiento es más lento y tiene mayor complejidad de implementación [21], [24].



### **1.2.3 Control de potencia en el enlace ascendente**

Este tipo de control de potencia se implementa en sistemas de comunicación móvil celular. Desde la estación base se envían comandos al móvil indicándole que debe incrementar o disminuir su potencia de transmisión para alcanzar el nivel de QoS deseado. Su principal beneficio es la reducción del nivel de interferencia presente en el sistema al enfrentar el problema cerca/lejos (*near/far*). Además, evita que la potencia de transmisión tome valores arbitrariamente grandes, prolongando así el tiempo de vida de las baterías. En redes WLAN, el control de potencia en enlace ascendente permitiría ajustar la potencia de transmisión de todas las STAs conectadas a un AP. El AP sería el encargado de indicarle a cada STA si debe aumentar o disminuir la potencia, de esta forma las señales enviadas por STAs alejadas del AP no serán enmascaradas por las señales enviadas por STAs cercanas al AP [25].

### **1.2.4 Control de potencia en el enlace descendente**

También es un mecanismo de control de potencia empleado en sistemas de comunicación móvil celular. El control se hace sobre la potencia de transmisión de la señal enviada por la estación base, esto determina el área de cobertura de la estación base, incrementando o reduciendo la misma para equilibrar el tráfico. Otro beneficio es la compensación de pérdidas de propagación y de desvanecimiento causadas por el escenario y la velocidad de desplazamiento de los móviles. Para WLAN, este tipo de control se aplicaría a la potencia de transmisión de los APs para reducir la interferencia entre ellos, reutilizar los canales de frecuencia e incrementar la capacidad del canal en términos de velocidad de transmisión de datos [25].

## **1.3 NOCIONES BÁSICAS DE TEORÍA DE JUEGOS**

Frecuentemente es fácil encontrar situaciones en las que sujetos luchan por acceder a determinado beneficio, esta actividad competitiva en la que los participantes o jugadores se enfrentan según un conjunto de reglas se denomina juego. Los juegos han existido en la naturaleza y las sociedades humanas durante mucho tiempo, sin embargo, no siempre se logra obtener los mejores resultados para todos los participantes [26].

La GT se presenta como una alternativa de solución a situaciones entre participantes con intereses en común y ha sido aplicada a muchas ciencias como la economía, la biología, la informática, la genética y la política, garantizando óptimos resultados en cada una de estas. Actualmente los estudios de GT se enfocan en los problemas presentes en las telecomunicaciones, y efectivamente han demostrado



que la GT es una herramienta muy potente y versátil para la solución de problemas de distribución de recursos dentro de un sistema de comunicación [27].

Puntualmente en redes inalámbricas, la GT facilita los procesos de RRM como asignación del espectro y control de potencia. Las recientes investigaciones de GT enfocadas en sistemas inalámbricas motivan a la utilización de esta técnica en escenarios reales donde los problemas por la limitación de recursos son cada vez más complejos, influyendo en el desempeño total de los sistemas. La GT promete grandes cambios dentro de las telecomunicaciones inalámbricas, por tanto, su estudio es cada vez más necesario e importante para el desarrollo y evolución de los sistemas inalámbricos actuales en busca de mejorar la QoS.

### **1.3.1 Definición formal de teoría de juegos**

La GT es un conjunto de herramientas analíticas diseñadas para ayudar a entender los fenómenos relacionados con la toma de decisiones por parte de individuos que interactúan dentro de un escenario definido por cierta cantidad de reglas [28]. La GT se aplica a sistemas descentralizados en donde no existe un único nodo central, por el contrario, todos los nodos se conectan entre sí sin que tengan que pasar obligatoriamente por uno o varios nodos de la red. Las funciones en una red descentralizada se distribuyen sobre todos los nodos, de este modo, no hay nodos que sean imprescindibles. La GT no se aplica a sistemas centralizados ya que una de las características principales de la GT es la racionalidad de los individuos que participan en el juego, de modo que, si todas las funciones de un sistema recaen sobre un nodo central, el sistema no puede ser modelado por teoría de juegos ya que los nodos periféricos no tienen la capacidad de tomar decisiones de forma racional [29].

La comprensión del comportamiento interactivo de los participantes dentro de una situación se logra a partir de la definición de modelos, similarmente como ocurre en otras ciencias. Un modelo es una abstracción que se usa para entender las observaciones y experiencias dentro de un escenario o un sistema. El desarrollo de un modelo permite generar cierta simplicidad aislando los parámetros menos relevantes y considerando los más importantes para garantizar un mejor entendimiento de los escenarios de estudio [26].

#### **1.3.1.1 Modelo en teoría de juegos**

Un modelo en teoría de juegos son expresiones precisas de ideas que pueden ser presentadas verbalmente. El modelado de teoría de juegos sigue los siguientes pasos:



1. Abstracción de los aspectos más relevantes presentes en la interacción de los tomadores de decisiones.
2. Análisis del modelo para descubrir sus implicaciones. Este proceso debe ser bastante lógico y objetivo debido a que los resultados obtenidos a partir de este, pueden sugerir que el modelo está errado [26].
3. Caracterización de los diferentes tipos de resultados posibles para la situación interactiva, con el fin de predecir una o más soluciones generadas a partir de suposiciones de información y de comportamiento.
4. Diseño de buenas estrategias para lograr mejores resultados según el escenario de estudio.

### 1.3.1.2 Definición de juego

En GT, un juego se define como una situación de decisión caracterizada por una interdependencia estratégica entre los participantes que comparten las mismas reglas y buscan un resultado en particular. La interacción estratégica descrita por el juego se modela formalmente empleando una base lógica y matemática definida en la GT [30].

### 1.3.1.3 Elementos de un juego

- **Jugadores:** son todos los agentes racionales que participan en el juego. Un jugador puede ser una persona, una máquina, un autómata, un animal o una planta. En el campo de las telecomunicaciones inalámbricas los jugadores son dispositivos que hacen parte del sistema de comunicación y que actúan según sus intereses particulares.
- **Estrategias:** son el conjunto de decisiones que un jugador puede elegir durante el desarrollo del juego. Las estrategias definen el comportamiento del jugador dentro del juego, en cierta forma ayudan a determinar el plan de acción de un jugador en instantes específicos.
- **Función de utilidad:** también llamada función objetivo o recompensa, corresponde a los beneficios que un jugador alcanza dentro del juego, se asocia con la pregunta ¿qué quiere conseguir un jugador? y ¿qué tanto valora la obtención de ese beneficio?
- **Información disponible:** se relaciona con el conocimiento que cada jugador tiene sobre los datos de juego del resto de jugadores. El juego es de información completa si todos los jugadores conocen las funciones objetivo del resto. Si al menos un jugador no tiene información completa de las funciones objetivo de alguno de los jugadores, se dice que el juego es de información incompleta.



### 1.3.2 Tipos de juegos

Generalmente en la GT se consideran dos grandes tipos de juegos, los cooperativos y los no cooperativos. Sin embargo, los juegos tienen multiplicidad de clasificaciones teniendo en cuenta diferentes aspectos como la forma de representación, el número de jugadores, el orden en que se desarrollan las acciones y la información disponible para los jugadores. La variedad en la clasificación radica en que la GT está en proceso de evolución en diferentes campos.

#### 1.3.2.1 Juego cooperativo

Un juego es cooperativo si los jugadores seleccionan su acción o estrategia teniendo en cuenta su beneficio y el alcanzado por los demás jugadores [31]. En este tipo de juego se forman acuerdos vinculantes con el fin de mejorar los beneficios obtenidos por todos los jugadores, por esta razón, los participantes en el juego no compiten, al contrario, todos se esfuerzan para lograr obtener el mejor resultado para todo el conjunto, es decir, un resultado puede ser positivo o negativo para todos los jugadores y no para un jugador en particular [32], [33].

#### 1.3.2.2 Juego no cooperativo

Un juego se define como no cooperativo si de manera egoísta e independiente, cada jugador busca obtener el máximo beneficio sin tener en cuenta el estado de los demás jugadores [31]. En este tipo de juegos no hay transferencia de la función de utilidad, por ende, ningún jugador hace acuerdos previos con otros jugadores. Aunque el sentido de estos juegos es en cierta forma egoísta, las acciones o estrategias que elige un participante con el fin de obtener el máximo beneficio, no siempre van a influir negativamente en los demás jugadores, indirectamente las decisiones de un jugador pueden “cooperar” al estado de otro jugador [33].

#### 1.3.2.3 Tipos de juego según su representación

Según la forma de representación, los juegos pueden ser:

**Forma normal o estratégica:** en este tipo de juegos, los participantes pueden cambiar sus estrategias de forma simultánea, es decir las decisiones de cada jugador pueden ser tomadas al mismo tiempo. Es la forma de representación más utilizada debido a que el análisis matemático es menos complejo. La representación se hace por medio de matrices en las cuales se describen las estrategias y beneficios que tiene o puede obtener cada jugador. La forma normal da la cantidad mínima de información necesaria para describir un juego, enumera los jugadores,



las estrategias disponibles, y los resultados finales para cada jugador. Este tipo de juego se basa en la existencia de una función de utilidad que permite asignar un valor numérico medible a la(s) característica(s) del(os) objetivo(s) de cada jugador. Un campo de acción de este tipo de juego son las comunicaciones inalámbricas, en donde generalmente se conoce parámetros del sistema como potencia, velocidad de transmisión de datos, Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*), SNR, Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*) o el RSSI [27].

Un juego de forma estratégica está definido matemáticamente por la ecuación 2.1.

$$G = (K, \{S_i\}_{i \in K}, \{U_i\}_{i \in K}) \quad (2.1)$$

Donde  $K = \{1, \dots, K\}$  es el conjunto de jugadores,  $S_i = \{S_{i_1}, \dots, S_{i_q}\}$  es el conjunto de estrategias del jugador  $i$ ,  $U = \{U_1, \dots, U_K\}$  corresponde al conjunto de funciones de utilidad para cada jugador. El conjunto de estrategias de todos los jugadores se conoce como perfil estratégico y se representa como  $S = \{S_1, \dots, S_K\}$ , la función de utilidad para el jugador  $i$  se define como  $U_i = U_i(S_1, \dots, S_K)$ , donde  $S_1, \dots, S_K$  es el conjunto de estrategias de todos los participantes en el juego, es decir la función de utilidad depende de las estrategias tomadas por el jugador  $i$  y por los demás jugadores. La figura 1.10 ilustra un juego representado en forma normal para dos jugadores:

		JUGADOR 2	
		Estrategia 1	Estrategia 2
JUGADOR 1	Estrategia 1	$(x_1, y_1)$	$(x_3, y_2)$
	Estrategia 2	$(x_2, y_3)$	$(x_4, y_4)$

Figura 1.10 Representación de un juego en forma normal o estratégica. Adaptada de [34].

En la figura 1.10 se considera que cada jugador dispone de dos estrategias. La dupla  $(x, y)$  dentro de cada casilla corresponde a la recompensa del jugador 1 y del jugador 2 respectivamente.

**Forma Extensa:** en esta clase de juegos se presta mayor atención al momento en que las decisiones son tomadas y a la cantidad de información disponible para cada jugador cuando se tiene que tomar una decisión. Este tipo de juego proporciona más detalles de la situación en comparación a la forma de representación



normal. La representación se hace por medio de un gráfico en forma de árbol, en el cual contiene elementos como nodos, ramas y vectores de pago [29].

- **Nodos:** representa la posición en el juego donde uno de los jugadores debe tomar una decisión. La primera posición, llamada nodo inicial, es un punto abierto en el cual el jugador puede tomar cualquier decisión.
- **Ramas:** representan las alternativas que un jugador enfrenta, y corresponden a las acciones disponibles.
- **Vectores de pago:** representan la recompensa o beneficio para cada jugador, se enumeran en el orden de jugadores. Cuando se alcanza un vector de pago, el juego ha terminado.

En la figura 1.11 se muestra un juego representado en forma extensa, para 2 jugadores.

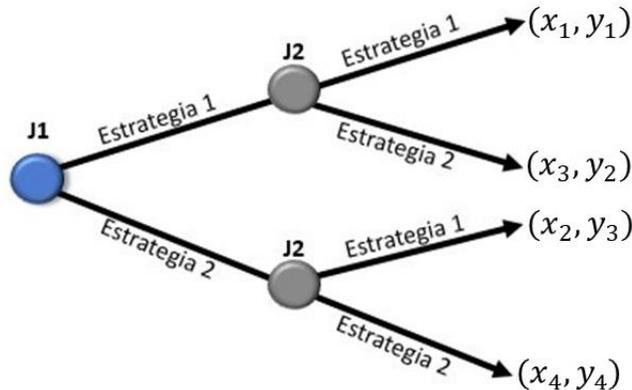


Figura 1.11 Representación de un juego en forma extensa. Tomada de [29].

El nodo de color azul representa al jugador 1, y los nodos de color gris representan al jugador 2, los conectores entre los nodos son las ramas, las cuales, representan las alternativas que tiene cada jugador en determinado instante de tiempo y las duplas  $(x, y)$  al final de las ramas, son las utilidades del jugador 1 y jugador 2 respectivamente.

La definición matemática para este tipo de juego se presenta en la ecuación 2.2.

$$G = (N, V, V_{root}, \pi, \{V_i\}_{i \in N}, \{u_i\}_{i \in N}) \quad (2.2)$$

Dónde  $N = \{1, 2, \dots, N\}$  representa el conjunto de los jugadores;  $(V, V_{root}, \pi)$  hace referencia al diagrama de árbol,  $V$  como el conjunto de nodos (o vértices del árbol),  $V_{root}$  es el identificador del nodo raíz y  $\pi$  es la función predecesora, la cual asigna



a cada nodo no inicial, la acción que lo conecta con su nodo predecesor;  $V_i$  es una partición de  $V$  que corresponde a una ruta sobre el árbol;  $u_i$  corresponde a la utilidad del jugador  $i$ -ésimo, dada por las elecciones efectuadas por los jugadores.

Además de determinar si un juego es cooperativo o no cooperativo y de definir la forma de representación del mismo, es importante caracterizarlo más detalladamente. A continuación, se describen algunas características de los tipos de juegos más comunes de acuerdo a la ocurrencia de las acciones, el conocimiento o desconocimiento de la información del estado del juego y otras características relevantes.

- **Juegos estáticos:** en esta clase de juegos, los participantes hacen sus movimientos de forma aislada, sin conocer lo que otros jugadores han hecho. La toma de decisiones de un jugador está basada en suposiciones de información y comportamiento de los demás jugadores [27], además cada jugador solo tiene una oportunidad para elegir la decisión más acertada. Un ejemplo de este tipo de juego es una subasta en sobre cerrado, en este tipo de subasta los oferentes tienen total desconocimiento de lo que los demás están dispuestos a pagar por un bien o servicio. La mecánica de esta subasta consiste en que los participantes colocan el valor de su oferta en un sobre cerrado, al final gana la persona con la oferta más alta [29].
- **Juegos dinámicos:** a diferencia de los juegos estáticos, en los dinámicos existe una secuencia en el orden del juego y los jugadores tienen la capacidad de observar parcial o totalmente los movimientos de los demás jugadores mientras el juego avanza, y de esta forma, pueden extraer cierta información antes de elegir su estrategia óptima. Un ejemplo de un juego dinámico es la llamada subasta inglesa, en este tipo de subasta, los jugadores mencionan su oferta por el bien o servicio de forma abierta para todos los participantes. De esta forma todos conocen las ofertas de todos, incluso una persona que ya ofertó, tiene la posibilidad de hacerlo nuevamente. Al final, la oferta más alta es aceptada como el precio de compra [29].
- **Juego de información completa:** en este tipo de juego, los datos del juego son de conocimiento común, por ejemplo, las estrategias disponibles para cada jugador y las funciones de utilidad. De esta forma, cualquier toma de decisiones por cualquier jugador depende inherentemente del estado del resto de jugadores y cualquier cambio en algún estado de los participantes es detectado por el conjunto de jugadores.



- **Juego de información incompleta:** también llamados juegos bayesianos, son modelos en los cuales, los jugadores solo tienen información parcial sobre el desarrollo del juego. Esto implica que un cambio en el estado de un jugador obliga a los demás jugadores a tomar decisiones basadas en el conocimiento parcial que poseen del juego. Aparentemente, los juegos con información incompleta son más realistas que los juegos con información completa, ya que, de alguna forma, tener la totalidad del conocimiento del estado del juego es muy difícil y además hace que el desarrollo del juego sea complejo [27], [32].
- **Juegos repetitivos:** básicamente es la repetición de un juego estático por un cierto número de veces, en algunos casos por infinitas veces. El objetivo de un juego repetitivo es intentar modelar el hecho de que, durante un juego, los participantes pueden interactuar más de una vez con el fin de optimizar alguna métrica de desempeño, la cual es imposible mejorar en un solo intento. En este tipo de juegos, generalmente hay más exigencias en la cantidad y calidad de la información y suposiciones de comportamiento requeridas, debido a que los juegos repetitivos apuntan a optimizar una utilidad promedio y a lograr puntos mucho más eficientes de un sistema. Este tipo de juegos presentan una gran cantidad posible de planes de acción o estrategias, en algunos casos infinitas posibilidades, esto se debe a que un jugador puede tener cierto número de estrategias posibles y este número puede incrementar en cada nueva repetición debido a la combinación con las estrategias de los demás jugadores [27].
- **Juegos estocásticos:** es un tipo de juego en el cual los diferentes estados se dan por cambios probabilísticos generalmente aleatorios o regidos por una regla de carácter estocástica. Un juego estocástico generaliza los juegos repetitivos, en estos últimos, un mismo juego se ejecuta en diferentes etapas, mientras que, en los primeros, el estado del juego en cada secuencia de etapas evoluciona respecto al tiempo. En la etapa inicial, cada jugador permanece en un estado definido aleatoriamente, en seguida cada jugador elige qué estrategias utilizar para alcanzar determinado beneficio dependiendo del estado inicial que se le asignó. El juego se desarrolla por un número indefinido de etapas, al final, la recompensa de cada jugador es la suma de las recompensas obtenidos en cada etapa [35]. En la práctica es frecuente encontrar comportamientos que pueden ser modelados como un juego estocástico. En el caso de las comunicaciones inalámbricas, muchos sistemas se caracterizan por tener estados que evolucionan con el tiempo, por ejemplo, el nivel de batería de un terminal dependiente del nivel de potencia de transmisión, la ganancia de un canal



dependiente del sentido estocástico del medio de propagación, el estado de un servidor, la asignación dinámica de espectro en redes cognitivas, entre otros [27].

### **1.3.3 Acciones y estrategias de un jugador**

En algunos juegos es necesario diferenciar el concepto de acción y estrategia, en otros casos, el significado puede ser similar. La diferencia radica en que una acción es el resultado de una estrategia, es decir, la forma como un jugador actúa después de haber decidido utilizar determinada estrategia. Las estrategias se clasifican en tres clases: estrategias puras, estrategias mixtas y estrategias dominantes [27].

#### **1.3.3.1 Estrategias puras**

Una estrategia es pura si un jugador le asigna a ésta la probabilidad de 1, esto se debe a que se considera al jugador como un sujeto completamente racional, es decir, sabe cuál es su mejor estrategia e indiscutiblemente será la que seleccionará para tratar de obtener su mayor beneficio. Puede entenderse como un plan definido con anterioridad para una situación de juego específica.

#### **1.3.3.2 Estrategias mixtas**

Una estrategia se considera mixta cuando su elección se realiza de acuerdo a una distribución de probabilidad. Esta clase de estrategias se utiliza cuando existe incertidumbre en la elección de las estrategias tomadas por otros jugadores, ya que solo se conocen algunos elementos de este comportamiento del juego. Las estrategias mixtas generalizan las estrategias puras, ya que abarcan la totalidad de las posibilidades en el juego.

#### **1.3.3.4 Estrategias dominantes**

Una estrategia dominante permite que un jugador obtenga la mayor recompensa en el juego independiente de las estrategias seleccionadas por el resto de jugadores. Cuando una situación se juega de esta forma, la solución de ese juego es generalmente trivial [34]. Si una estrategia no es dominante, entonces es dominada. Un jugador racional nunca jugará una estrategia dominada, por esta razón en el modelado de estas situaciones, es necesario eliminar estas estrategias.

### **1.3.5 Conceptos de solución de un juego**

#### **1.3.5.1 Equilibrio de Nash**

Los juegos con estrategias dominantes son en realidad restricciones del juego, ya que en la mayoría de las situaciones no existe dominación, en este sentido, hay otros rumbos que el juego puede tomar. Jhon Nash demostró matemáticamente que



rumbo puede tomar el juego para considerarlo como una solución razonable. La generalización de estos conceptos la llamo Equilibrio de Nash (NE, *Nash Equilibrium*) [27].

Nash define el concepto de equilibrio a partir de la idea de respuesta óptima o Mejor Respuesta (BR, *Best Response*). Dadas las estrategias del rival, una estrategia óptima se define como aquella estrategia que permite a un jugador alcanzar mejores resultados respecto a las demás estrategias posibles. En mención a lo anterior, el NE se define como la combinación de las estrategias del conjunto de jugadores, siendo cada una de ellas, una respuesta óptima para las demás. En este sentido, dado que todos los jugadores hacen uso de su respuesta óptima, ninguno tiene razón alguna para cambiar de estrategia, ya que, si un jugador no utiliza su respuesta óptima, pierde utilidad. Esta estabilidad a partir de la combinación de estrategias óptimas es un NE. Un juego puede tener un único equilibrio, múltiples equilibrios o puede no tener, sin embargo, para juegos con estrategias mixtas, Nash logró demostrar que un juego siempre tiene al menos un equilibrio [30].

#### **1.3.5.2 Equilibrio de Nash para estrategias mixtas**

Considerando que una estrategia mixta es una distribución de probabilidad sobre un conjunto de estrategias puras, la cantidad de opciones que tiene un jugador incrementan. Gracias a este incremento se puede encontrar equilibrios de Nash en todos los juegos, incluso en aquellos que no tienen equilibrios cuando son analizados mediante el concepto de estrategias puras. El objetivo de un jugador que utiliza estrategias mixtas es generar incertidumbre en la elección de las estrategias puras de sus rivales y conseguir que estos sean indiferentes con respecto a la elección de sus estrategias puras. Cuando todos los jugadores utilizan estrategias mixtas, ningún jugador tiene incentivos para dejar de utilizar estrategias mixtas, en este sentido, la situación es un NE [34].

#### **1.3.5.3 Equilibrio de Satisfacción**

El Equilibrio de Satisfacción (SE, *Satisfaction Equilibrium*) es una adaptación del NE para escenarios donde esta solución no es práctica debido a condiciones inherentes del sistema. Un SE es el resultado de un juego en el cual los jugadores seleccionan sus estrategias de tal manera que el estado del juego no puede ser mejorado por desviaciones unilaterales, y así mismo, el estado del juego debe garantizar que los jugadores alcancen un umbral mínimo de satisfacción y no sobrepasen un umbral máximo. Se dice que un jugador está satisfecho si juega una estrategia que le permite sobrepasar sus requerimientos mínimos dentro del juego. Una vez que todos los jugadores satisfacen sus propias limitaciones, no tiene ningún interés en



cambiar su estrategia y, por lo tanto, se establece un equilibrio y todos los jugadores están satisfechos [37].

En el campo de las comunicaciones, por lo general, los proveedores garantizan un nivel mínimo de QoS al usuario final. En este contexto, el NE puede llevar a soluciones ineficientes, como gastos innecesarios de energía, ineficiencia en el uso del espectro, entre otros. Esta situación ocurre cuando el juego no alcanza un equilibrio rápidamente [27].

#### 1.3.5.4 Eficiencia de Pareto

Dado un perfil estratégico, un estado Pareto eficiente se genera si un instante del juego hace que sea imposible que un jugador mejore su utilidad sin primero dañar la utilidad de otro jugador. Así mismo, existe un estado de Pareto ineficiente, en el cual los jugadores deciden utilizar una estrategia que disminuya su utilidad, aunque haya una estrategia mejor que beneficie a todos los participantes. Esta situación sucede debido a la incertidumbre que existe respecto a las estrategias tomadas por el resto de jugadores [36], [29].

### 1.4 APRENDIZAJE REFORZADO

El Aprendizaje Reforzado (RL, *Reinforced Learning*) es un área de la computación y la robótica, específicamente de la Inteligencia Artificial (AI, *Artificial Intelligence*), encargada de estudiar cómo un agente debe tomar mejores decisiones de acuerdo a las condiciones de un escenario. Este enfoque asume que cada jugador inicia con una creencia anterior respecto a las acciones de los demás jugadores, luego cambia esa creencia, es decir aprende en respuesta a la información que recibe. Un jugador puede aprender por medio de la observación, la discusión o por medio de acuerdos con otros jugadores o simplemente de su propia experiencia adquirida a través del juego [26]. Este concepto considera 3 elementos principales: los agentes, el escenario y las acciones [37].

- **Agente:** es el que toma las acciones en un determinado instante de tiempo.
- **Escenario:** corresponde a todas las cosas con las que el agente interactúa e influyen en la toma de decisiones del mismo.
- **Acciones:** lo que el agente puede hacer, cada acción está asociada a una recompensa.

Además, el RL es un método eficaz para dar soluciones a problemas de toma de decisiones, ya que permite resolver problemas haciendo que un jugador no repita acciones que lo perjudiquen. Los algoritmos de RL se utilizan para modelar la adaptación del agente a condiciones dinámicamente cambiantes. En la figura 1.12



se presenta el modelo de RL. Inicialmente, los agentes observan y analizan el escenario para obtener información del estado actual del sistema, para tomar una decisión respecto a la acción que van a seleccionar. Las acciones inciden sobre el escenario, haciendo que cada agente obtenga una recompensa o castigo según la acción seleccionada. La información aprendida en cada iteración se utiliza para evaluar acciones tomadas por el agente en términos de recompensa o castigo. Después de una serie de interacciones, con el suficiente aprendizaje, el agente encuentra la estrategia óptima para alcanzar su objetivo. El algoritmo almacena los valores del estado, acción y recompensa en cada paso y usa estos datos en el análisis del siguiente paso [28], [38].



Figura 1.12 Modelo de aprendizaje reforzado. Adaptada de [38].

Existen dos tipos de RL: aprendizaje por refuerzo inmediato y aprendizaje por refuerzo retardado. En el primero, la realimentación se hace en cada iteración, de esta forma, se puede corregir rápidamente las acciones seleccionadas. En el segundo caso, la realimentación no se hace en cada acción del juego, por el contrario, la evaluación o estimación se hace cuando se llega al final del proceso. En este tipo de aprendizaje, es más difícil detectar el fracaso de las acciones tomadas por el agente, ya que se desconoce el resultado final en cada iteración generado a partir de un conjunto de estrategias y las acciones específicas que ocasionaron ese resultado. Con base a estos dos tipos de aprendizajes, existe una variable llamada tasa de aprendizaje, la cual define una métrica para establecer si el aprendizaje es rápido o lento. Las variaciones de la tasa de aprendizaje dependen de que tan rápido un agente puede Ganar o Aprender Rápido (WoLF, *Win or Learn Fast*), esta variable permite que un agente se adapte rápidamente cuando obtiene recompensas negativas y cambien prudentemente sus acciones cuando está obteniendo recompensas positivas [37].



## 2. DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y PLAN DE PRUEBAS.

En este capítulo se presenta el desarrollo de la metodología utilizada para planificar y ejecutar el proceso de implementación de un algoritmo de control de potencia basado en teoría de juegos en WLAN. Inicialmente se hace el análisis de requerimientos y se dan a conocer las características básicas del sistema, posteriormente se desarrolla la etapa de diseño en donde se especifican las herramientas hardware y software necesarias para el desarrollo del trabajo de grado, luego se realiza una explicación detallada del proceso de implementación del algoritmo de control de potencia de acuerdo a la metodología seleccionada para esta fase y finalmente se establece un plan de pruebas con el objetivo de verificar el funcionamiento del algoritmo en la red.

Para alcanzar los objetivos planteados, se adoptó el Modelo Lineal Secuencial (MLS) [39], ya que este enfoque metodológico ordena rigurosamente las etapas del proceso de desarrollo del trabajo, de tal forma que el inicio de cada etapa debe esperar la finalización de la etapa anterior, al terminar cada etapa se debe hacer una revisión con el fin de determinar si el trabajo está listo para avanzar a la siguiente fase. Además, es un modelo sencillo de implementar y la calidad del producto resultante es alta [40]. En la figura 2.1 se presentan las etapas del modelo, en seguida se describen las actividades de cada una de las fases o etapas que lo conforman.



Figura 2.1 Modelo lineal secuencial. Adaptada de [39] .

### 2.1. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

A continuación, se detallan los requerimientos para la implementación del algoritmo de PC basado en GT.

**Requerimiento 1:** utilizar una versión vigente del estándar IEEE 802.11.



**Requerimiento 2:** permitir la configuración manual de parámetros propios del estándar IEEE 802.11 como técnicas de modulación, codificación, número de bits por trama, frecuencia de operación e intervalo entre tramas.

**Requerimiento 3:** controlar de forma dinámica el nivel de potencia de transmisión de los nodos inalámbricos en la red.

**Requerimiento 4:** permitir el reajuste de la potencia de transmisión en situaciones de movilidad de las STAs.

**Requerimiento 5:** permitir el cambio de parámetros<sup>2</sup> del algoritmo seleccionado.

**Requerimiento 6:** garantizar un reducido tiempo de estabilización del algoritmo.

**Requerimiento 7:** generar automáticamente archivos de almacenamiento de parámetros que permitan el análisis y la evaluación del sistema.

**Requerimiento 8:** establecer métricas de desempeño para evaluar la incidencia del algoritmo dentro de una red WLAN.

## 2.2. DISEÑO

Para cumplir con los requerimientos mencionados, se procede con la ejecución de las actividades relacionadas con la fase de diseño. En esta etapa se detallan actividades como la selección del algoritmo, la topología de la red y las herramientas hardware y software necesarias para la implementación.

### 2.2.1 Resumen de las características relevantes de los algoritmos de control de potencia basados en teoría de juegos

La tabla 2.1 resume las características<sup>3</sup> más relevantes de los algoritmos de control de potencia basados en teoría de juegos que fueron revisados.

---

<sup>2</sup> Parámetros propios del algoritmo como límites de satisfacción superior e inferior, número de estrategias, periodo de reinicialización de la tasa de aprendizaje, etc.

<sup>3</sup> C – Cooperativo, NC – No Cooperativo, E – Estático, D – Dinámico.



Tabla 2.1 Resumen de las características de los algoritmos de control de potencia basados en teoría de juegos.

ALGORITMO DE CONTROL DE POTENCIA	CARACTERISTICAS	JUEGO				FUNCIÓN DE UTILIDAD	ESTRATEGIAS	SOLUCIÓN
		C	NC	E	D			
Orientado a la SINR objetivo [2].	Optimización multiobjetivo, utiliza mecanismos de fijación de precios.	--	--	--	X	En términos de la energía consumida y la SINR	Niveles discretos de potencia.	NE
En línea basado en teoría de juego evolutiva [3].	Diseñado para sistemas que usan Acceso Múltiple por división de código (CDMA; <i>Code Division Multiple Access</i> ), juego repetitivo, utiliza mecanismos de aprendizaje.	--	X	--	X	RSSI	Niveles discretos de potencia.	Equilibrio estable
Dinámico de convergencia rápida a Pareto – eficiente [8].	Optimización multiobjetivo, diseñado para 802.11g (OFDM) y redes distribuidas, juego repetitivo, utiliza estrategias puras e información imperfecta.	--	X	--	X	SINR y Relación de Entrega de Paquetes.(PDR, <i>Packet Delivery Ratio</i> ).	Niveles discretos de potencia.	Pareto - eficiente
De control de potencia y velocidad fija [10].	Optimización multiobjetivo.	--	X	--	--	En términos de la energía consumida.	Niveles discretos de potencia y velocidad.	NE
De control potencia y velocidad [10].	Optimización multiobjetivo.	--	X	--	--	En términos de la energía consumida.	Niveles discretos de potencia.	NE
Basado en GT en sistemas de comunicación inalámbricos [31].	Enlace ascendente, lazo cerrado, distribuido, inclusión de aprendizaje reforzado, representación del juego en forma estratégica.	--	X	--	X	SINR	Niveles discretos de potencia.	SE
Para redes Ad hoc [41].	Diseñado para redes Ad Hoc, inclusión de esquema de fijación de precios.	--	X	--	--	En términos del <i>throughput</i> .	Niveles discretos de potencia.	NE y fijación de precios
Basado en clasificación mejorado [42].	Diseñado para 802.11s en combinación con red cableada, enlace descendente, distribuido y de lazo abierto, transmisión de los mensajes entre APs por medio de sistema de distribución.	X	--	--	--	SINR	Niveles discretos de potencia.	Mayor al NE
Garantizando mínima capacidad de QoS [43].	Diseñado para 802.11.	--	X	--	--	En términos de la velocidad de transmisión de datos.	Niveles discretos de potencia.	SE



### 2.2.2 Selección del tipo de algoritmo y juego

La tabla 2.2 presenta la comparación entre juegos cooperativos y no cooperativos, considerando los aspectos más relevantes para la implementación.

Tabla 2.2 Comparación de los aspectos más relevantes de los juegos cooperativos y no cooperativos.

	Juego Cooperativo	Juego No cooperativo
<b>Número de jugadores</b>	Limitado.	Sin restricción.
<b>Funcionamiento</b>	Se realizan coaliciones entre jugadores, para maximizar un objetivo en común.	Busca beneficios individuales. Utilización de mecanismos de penalización (o castigo) para imponer la cooperación entre los nodos.
<b>Información común</b>	Transferencia de la función de utilidad e información adicional entre todos los jugadores.	Solo si el juego es de información completa
<b>Conceptos de solución</b>	Pocos conceptos, los cuales plantean soluciones complejas poco adaptables a escenarios específicos.	Mas conceptos, los cuales son adaptables a escenarios específicos.
<b>Tiempo de Convergencia</b>	Alto	Bajo

Teniendo en cuenta la tabla 2.2, se elige el tipo de juego no cooperativo para la implementación del algoritmo. La elección se hace considerando que la implementación de control de potencia en un escenario real es compleja si existe transferencia de información entre todos los jugadores, además, esta acción implica mayor procesamiento computacional y mayores retardos en el proceso de selección de estrategias en el algoritmo. Por otro lado, los conceptos de solución de los juegos no cooperativos son bastante adaptables a una WLAN.



Considerando la información presentada en la sección 1.3, la representación del juego seleccionado es de forma normal debido a que no existe restricción para que las acciones se tomen de forma simultánea; el juego utilizará estrategias mixtas ya que la elección de determinada estrategia depende de la función de utilidad obtenida para un instante específico a partir de un valor de probabilidad; dinámico, dado que cada jugador podrá extraer información de sus últimos movimientos y tenerla en cuenta en decisiones actuales y futuras, además el jugador tendrá múltiples intentos para tomar su decisión; con información incompleta, ya que cada jugador solo conoce el número de estrategias de los demás, mas no la función de utilidad, el número de iteraciones o el valor de la estrategia elegida. Además, a partir de la revisión bibliográfica donde se menciona que el NE es un concepto de solución que puede generar resultados ineficientes en algunos escenarios [44], se elige el SE como concepto de solución del juego.

De esta forma, el algoritmo que más se aproxima a las características mencionadas, es el algoritmo de control de potencia en sistemas inalámbricos basado en teoría de juegos utilizado en [31]. Este algoritmo es suficientemente genérico para adaptarlo a un escenario real debido a que utiliza parámetros medibles e incluye la técnica de aprendizaje reforzado, concepto necesario para la convergencia rápida del juego.

### 2.2.3 Modelo del sistema

Generalmente las STAs en una WLAN utilizan baterías para su funcionamiento, por esta razón se decide realizar el control de potencia en el Enlace Ascendente (*UL, Up-Link*) para incrementar la eficiencia energética, prolongar la duración de las baterías y reducir la interferencia generada entre STAs, además, el algoritmo de control de potencia es de lazo cerrado, por lo tanto, el AP realimenta a las STA por medio de parámetros de control.

La configuración de red elegida es una WLAN en modo infraestructura, ya que es la más utilizada por criterios como mayor alcance de la red, mejores posibilidades y más servicios con respecto a la configuración *Peer to Peer*. Se hace uso de los estándares IEEE 802.11a e IEEE 802.11g con frecuencias de operación de 5,805 GHz y 2,437 GHz, respectivamente. Se utiliza OFDM como técnica de transmisión con esquema de modulación BPSK y codificación convolucional de tasa  $\frac{1}{2}$ .

En la figura 2.2 se muestra el escenario elegido a partir de las anteriores consideraciones, el cual está conformado por un conjunto de STAs definido por



$\mathcal{S} = \{STA_i, |i = 1, 2 \}$  y un conjunto de AP definido por  $\mathcal{A} = \{AP_1\}$ . El escenario tiene las siguientes características:

- El escenario consta de un AP y dos STAs y se encuentran en un ambiente interferente.
- No existe conexión con un sistema de distribución.
- Se permite la movilidad de las STAs.
- Comunicación semiduplex entre pares transmisor-receptor.

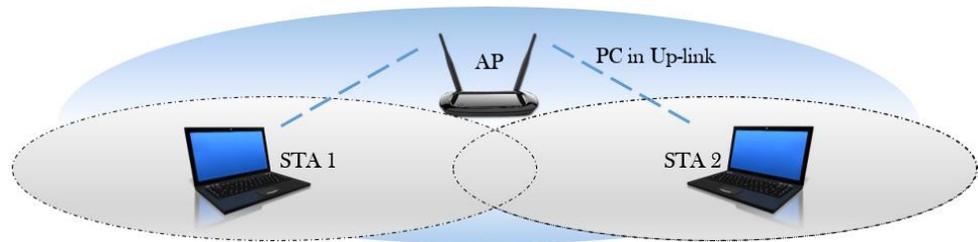


Figura 2.2 Escenario de red WLAN Por los autores.

## 2.2.4 Modelo de control de potencia basado en teoría de juegos

El algoritmo de control de potencia en sistemas inalámbricos basado en teoría de juegos utilizado en [31], es implementado en las dos STAs de la red. En esta sección se describe el juego en el cual se fundamenta el algoritmo y sus principales elementos.

### 2.2.4.1 Definición del juego

Como primera medida se definen los principales elementos involucrados en el juego:

- **Jugadores:** en este caso, las STAs de la red asumen el papel de jugadores.
- **Estrategias:** son los niveles de potencia de transmisión que eligen las STAs durante el transcurso del juego.
- **Función de utilidad:** el modelo de juego propuesto en [31] utiliza como función de utilidad la SINR, sin embargo, en la implementación no es posible diferenciar que potencia de señal recibida es interferencia y que potencia corresponde a la señal deseada. En redes WLAN se utiliza el RSSI para medir el nivel de potencia de las señales recibidas, este parámetro no permite identificar de manera independiente qué cantidad de la señal es interferencia, pero si permite comparar el nivel de la señal recibida y el piso de ruido como se muestra en la



figura 2.3. Por esta razón se ha optado por utilizar la SNR como función de utilidad para la implementación del algoritmo de GT.

A pesar de que no es posible calcular la interferencia, este valor se adiciona al nivel de potencia del piso de ruido, es decir, el piso de ruido aumenta en presencia de fuentes de interferencia. En el proceso de implementación se evidencio que la interferencia causada entre STAs es pequeña, por lo que se decidió nombrar a este valor SNR sin desconocer que en este valor se está considerando los efectos de interferencia de otras fuentes.

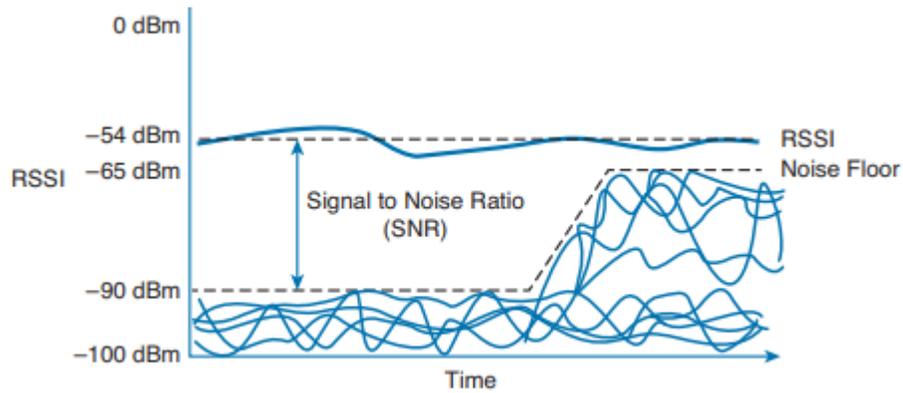


Figura 2.3 RSSI y SNR en redes WLAN [11].

El juego está definido por la expresión 2.1.

$$G = (N, \{P_n\}_{n \in N}, \{u_n\}_{n \in N}, \{f_n\}_{n \in N}) \quad (2.1)$$

Donde  $N$  representa el conjunto de los jugadores,  $\{P_n\}_{n \in N}$  corresponde al conjunto de estrategias,  $\{u_n\}_{n \in N}$  es el beneficio obtenido por cada jugador al elegir una estrategia y  $\{f_n\}_{n \in N}$  la función de satisfacción impuesta para cada jugador presente en la red, la cual se define en la expresión 2.2.

$$f_n = \{p_n \in P_n: \Gamma_n + \beta \geq u_n(p_n) \geq \Gamma_n\} \quad (2.2)$$

En la expresión 2.2 se observa que un usuario es satisfecho si la utilidad obtenida iguala o supera un umbral  $\Gamma_n$ , el cual corresponde a la SNR mínima requerida por cada STA para una comunicación aceptable. El límite superior se impone para que una STA cause la menor interferencia posible a las demás STA, ya que, en ausencia de éste, los nodos egoístas tratan de maximizar su desempeño al transmitir con una



potencia mayor y causar interferencia a otros nodos.  $\beta$  depende de la tolerancia del sistema a la interferencia, experimentalmente se encontró que un valor de  $\beta = 6$  dB en condiciones de alta interferencia y un valor de  $\beta = 4$  dB en condiciones de baja interferencia es suficiente para lograr un buen desempeño del algoritmo, teniendo en cuenta el nivel de SNR que permite mantener una comunicación aceptable [2].

## 2.2. 4 2 Descripción del algoritmo

Para todo instante de tiempo  $t$  existe un vector de probabilidades  $\pi_n(t) = \{\pi_1(t), \dots, \pi_{k-1}(t), \pi_k(t)\}$ , con  $1 \leq n \leq k$ , donde  $k$  es la dimensión del vector  $\pi_n(t)$ . Cada elemento de este vector se relaciona uno a uno con los elementos del vector  $P_n$ , con  $1 \leq n \leq k$ , donde  $k$  es la dimensión del vector  $P_n(t)$  encargado de almacenar los valores discretos de potencia para la  $STA_n$  con  $2 \leq n \leq i$ , donde  $i$  es el número de jugadores que intervienen en el juego. Los valores iniciales del vector  $\pi_n(t)$  se eligen de manera aleatoria.

En el instante  $t = 0$ , la  $STA_n$  selecciona una potencia de transmisión inicial  $p_n$  de acuerdo al elemento de mayor probabilidad del vector de potencias  $P_n$ , es decir, la potencia asociada al elemento de mayor probabilidad de  $\pi_n(t)$ .

Para todo  $t > 0$ , el AP calcula la utilidad alcanzada por la  $STA_n$  y envía esta información de retorno a la  $STA_n$  para que actualice el vector de probabilidades. En seguida, la  $STA_n$  realiza el cálculo de  $b_{n,t}$  el cual está definido en la ecuación 2.3.

$$b_{n,t} = \frac{M_n + u_{n,t-1} - \Gamma_n}{2M_n} \quad (2.3)$$

donde,  $b_{n,t}$  es un valor temporal que le indica a la  $STA_n$  que tan rápido debe cambiar la estrategia elegida en el instante anterior;  $M_n$  corresponde al máximo valor que puede alcanzar la función de utilidad;  $u_{n,t-1}$  es la utilidad obtenida en el instante previo por la  $STA_n$  y  $\Gamma_n$  corresponde al umbral mínimo de satisfacción definido para la  $STA_n$ . Obtenido el valor de  $b_{n,t}$ , se actualiza el vector de probabilidades de acuerdo a los criterios de la ecuación 2.4.

$$\pi_n(t) = \begin{cases} g'(\pi_n(t-1)), & \text{si } \beta \geq u_{n,t-1} - \Gamma_n \geq 0 \\ g(\pi_n(t-1)), & \text{En otro caso} \end{cases} \quad (2.4)$$



Es decir, si se satisfacen los requerimientos del SNR, el vector de probabilidades se actualiza con  $g'(\pi_n(t-1))$  definida en la ecuación 2.5. En este caso, la probabilidad asociada a la estrategia que permite que la SNR este dentro del rango de satisfacción se incrementa y las probabilidades de las demás estrategias disminuyen, obligando a la STA a elegir la misma potencia elegida en la iteración anterior. El parámetro  $\lambda_{n,t} = \frac{1}{1+0,1*t}$  es la tasa de aprendizaje de cada STA. Cabe destacar que a diferencia de los algoritmos implementados en [25], [31] y [37], la tasa de aprendizaje debe ser reinicializada periódicamente, debido a la movilidad como característica esencial de las WLAN. La reinicialización de la tasa de aprendizaje permite que las STAs cambien rápidamente de estrategia en condiciones de movilidad, a fin de mantener su utilidad dentro del rango de satisfacción.

$$g'(\pi_n(t-1)) = \pi_n(t-1) + \lambda_{n,t} b_{n,t} \left( \mathbb{1}_{\{p_n(t)=p_n\}} - \pi_n(t-1) \right) \quad (2.5)$$

donde  $\mathbb{1}$  es la Función Indicadora<sup>4</sup>. Por el contrario, cuando la estrategia seleccionada genera valores de SNR fuera del rango de satisfacción, el vector de probabilidades se actualiza con  $g(\pi_n(t-1))$  definida en la ecuación 2.6, en este caso la probabilidad asociada a esa estrategia disminuye mientras las demás incrementan, obligando a la STA a cambiar de estrategia. El parámetro  $n_{tot}$  corresponde al número total de estrategias para la  $STA_n$ , es decir a la dimensión del vector  $P_n$ .

$$g(\pi_n(t-1)) = \pi_n(t-1) + \lambda_{n,t} b_{n,t} \left( \frac{\mathbb{1}_{\{p_n(t) \neq p_n\}}}{n_{tot}} - \pi_n(t-1) \right) \quad (2.6)$$

En la figura 2.4 se muestra esquemáticamente el algoritmo expuesto anteriormente, resaltando las operaciones que realiza el AP y la STA.

<sup>4</sup> Función de Indicador o *Indicator Function* es una variable aleatoria que toma el valor 1 cuando ocurre el evento y el valor 0 cuando el evento no ocurre.

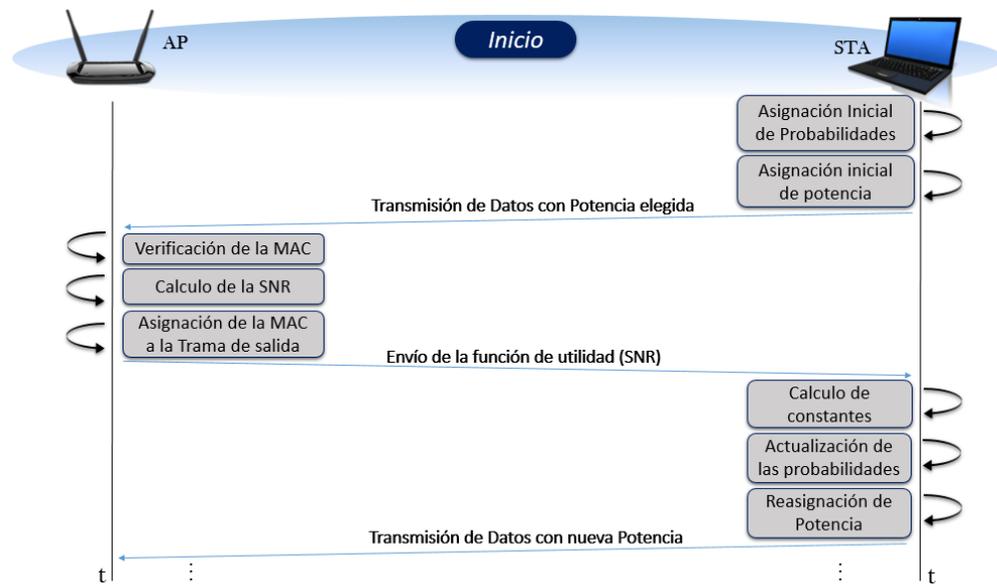


Figura 2.4 Diagrama del algoritmo de PC basado en GT. Por los autores.

### 2.2.5 Elección de los componentes hardware

En consideración con los objetivos del trabajo de grado, se requieren herramientas hardware y software para la implementación del algoritmo de PC. Para lo cual, se cuenta con dos alternativas:

- Dispositivos WLAN comerciales.
- Hardware reconfigurable.

En el estudio de la primera alternativa, se encontró que el uso de dispositivos WLAN comerciales implica la modificación de su *firmware*. El *firmware* es un programa informático que define la lógica de más bajo nivel en un dispositivo electrónico, por tanto, su modificación requiere cambios en su núcleo (*kernel*) y, en consecuencia, las modificaciones realizadas a este nivel son complejas, demandan un alto tiempo de compilación y se hace necesario tener amplio conocimiento previo para no causar daños en los dispositivos ya que, una modificación incorrecta en el *firmware* de un dispositivo, puede dejarlo completamente inutilizable. Por otro lado, los fabricantes de dispositivos WLAN facilitan el acceso a muchas versiones y actualizaciones de *firmware*, sin embargo, a pesar de que muchos de estos archivos son desarrollados bajo el concepto de software libre, existe poca documentación al respecto, razón por la cual, su modificación es aún más compleja.

El hardware reconfigurable es una alternativa libre y de bajo costo diseñada para que investigadores y desarrolladores puedan simular, implementar y analizar



diferentes sistemas a nivel físico. Esta herramienta mejora la flexibilidad del diseño y reduce considerablemente el costo y el tiempo de desarrollo de los circuitos digitales, además, permite implementar cualquier función digital de forma rápida y sencilla, con la posibilidad de realizar modificaciones y actualizaciones cuando se desee, sin costo de fabricación adicional [45].

Dadas las ventajas del hardware reconfigurable, diversos fabricantes e instituciones de investigación han creado dispositivos con estas características. Las tecnologías más conocidas en el mercado son: Arduino, Raspberry Pi, Arreglo de Compuertas Programable (FPGA, *Field Programmable Gate Array*) y herramientas de Radio Definido por Software (SDR, *Software Defined Radio*), como la Plataforma de Investigación Inalámbrica de Acceso Abierto (WARP, *Wireless Open Access Research Platform*), el Motor de Emulación de Bekerley (BEE2, *Berkeley Emulation Engine*), el Radio Ágil de la Universidad de Kansas (KUARK, *Kansas University Agile Radio*) y el Periférico Universal de Radio Software (USRP, *Universal Software Radio Peripheral*) [46]. Algunas características y limitaciones de las primeras de estas tecnologías son las siguientes:

- Arduino y Raspberry Pi son las opciones con menor costo, sin embargo, para la utilización de alguno de estos dispositivos es necesario adquirir módulos extras como modulos de radiofrecuencia para la conexión de antenas y tarjetas inalámbricas. Por otro lado, las características técnicas de las tarjetas Arduino y Raspberry Pi son limitadas en términos de procesamiento, capacidad de memoria, resolución del Conversor Analógico - Digital (ADC, *Analog Digital Converter*) y el Conversor Digital - Analógico (DAC, *Digital Analog Converter*), ancho de banda instantáneo, preselectores o filtros y rango de frecuencia de operación [47], [48].
- Los FPGA son dispositivos basados en arreglos de tipo matricial de elementos lógicos como *flips-flops* y lógica combinatoria, tienen gran cantidad de puertos de entrada y salida, el procesador se mantiene como hardware embebido y cuentan con transceptores para la transmisión de datos en serie a muy alta velocidad. A pesar de esto, similarmente como ocurre con Arduino y Raspberry Pi, es necesario incluir módulos adicionales [49].
- En el campo de la investigación, los dispositivos SDR más reconocidos son los USRPs fabricados por *National Instrument Corporation*, los cuales son utilizados para la creación de prototipos de sistemas de comunicación



inalámbrica completos, este hardware permite la interacción con diferentes tipos de antenas y tecnologías de radiofrecuencia. La configuración de los USRPs se puede hacer desde diferentes plataformas de desarrollo como *Matlab*, *Labview* y *GNU Radio*, plataformas que permiten emular los elementos de un sistema de comunicación real por medio de software a excepción de algunos elementos como antenas, ADC y DAC [50].

En consideración con lo expuesto anteriormente, se eligen los USRPs como hardware de implementación por 3 razones principales:

- Tienen las características técnicas necesarias para el desarrollo de la implementación.
- Permiten tener el control de todos los parámetros del sistema de comunicación gracias al procesamiento de la señal a nivel de software.
- Facilitan el establecimiento de mecanismos de evaluación de desempeño del algoritmo de control de potencia a nivel físico, ya que permiten el control total de la capa física por medio de software, siendo esta una limitación común de todos los dispositivos WLAN comerciales y sistemas embebidos.

### 2.2.5.1 Elección de la tarjeta USRP

*National Instruments* ofrece al mercado 4 series de USRPs. En la tabla 2.3 se presentan los productos USRP de cada una de las series.

*Tabla 2.3 Series de USRPs comerciales ofrecidas por National Instruments.*

USRP X	USRP Networked	USRP Bus	USRP Embedded
USRP X300	USRP N200	USRP 1	USRP E310
USRP X310	USRP N210	USRP B200	USRP E312
	USRP N310	USRP B200 mini	USRP E313
		USRP B200 mini-i	
		USRP B205 mini-i	
		USRP B210	

#### ❖ **Crterios de selección del tipo de USRP:**

Para seleccionar el tipo de USRP se tienen en cuenta los siguientes criterios:

- Facilidad de adquisición por el grupo de trabajo.



- Rango de frecuencias soportado.
- Requerimiento de procesamiento y desempeño.
- Potencia de transmisión.

Considerando que el USRP es un dispositivo de alto costo, el aspecto más crítico en la selección, es la dificultad que existe para obtenerlo, a partir de lo anterior se descartan los USRPs de las series X y *Embedded*, ya que actualmente la Universidad del Cauca cuenta solo con USRPs tipo N210 y B210.

En cuanto al rango de frecuencias y requerimiento de procesamiento y desempeño tanto las tarjetas de la serie “*Network*” como “*Bus*” pueden ser seleccionadas, debido a que soportan frecuencias de hasta 6 GHz y cuentan con las características técnicas necesarias para la implementación del algoritmo de control de potencia.

Respecto a la potencia de emisión, los USRPs de la serie “*Network*” transmiten con una potencia máxima de 15 dBm, mientras el USRP B210 puede alcanzar una potencia de transmisión de 20 dBm. Esta característica es favorable para la implementación del algoritmo de control de potencia, pues en las redes WLAN, las STAs transmiten con potencias que oscilan alrededor de los 20 dBm, por esta razón, se opta por utilizar las tarjetas USRPs B210 mostrada en la figura 2.5



Figura 2.5 Tarjeta USRP B210. Tomada de [51].

La figura 2.6 presenta la antena VERT 2450 *Dual Band* que se conecta a las tarjetas USRPs B210 para frecuencias en la banda de 2,4 GHz y 5 GHz, siendo estas las frecuencias de operación que interesan en la implementación. Esta es una antena omnidireccional con 3 dBi de ganancia.



Figura 2.6 Antena VERT 2450. Tomada de [51].

## 2.2.6 Elección de las herramientas de desarrollo software

En la tabla 2.4 se presentan las características más relevantes de las herramientas software utilizadas en implementaciones SDR sobre USRP.

Tabla 2.4 Características del software de configuración del USRP

Herramienta	Características
<b>Matlab</b> [52].	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ofrece un entorno de desarrollo integrado y su propio lenguaje de programación (Lenguaje M).</li><li>• Compatible con Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux.</li><li>• Posee una amplia gama de herramientas y funciones especializadas en procesamiento de señales.</li><li>• Se requiere licencia.</li></ul>
<b>LabView Communications</b> [53].	<ul style="list-style-type: none"><li>• Compatible con Windows, Mac y Linux.</li><li>• Ofrece un entorno basado en diagramas de flujo e integra múltiples lenguajes de programación como C, VHDL y Matlab.</li><li>• Tiempos cortos de desarrollo debido a su entorno de desarrollo gráfico.</li><li>• Permite combinar múltiples lenguajes de programación sin necesidad de cambiar de uno a otro.</li><li>• Se requiere licencia.</li></ul>
<b>GNU Radio</b> [54].	<ul style="list-style-type: none"><li>• Software de código abierto diseñado específicamente para el desarrollo e implementación de sistemas SDR.</li><li>• Combina los lenguajes C ++ y Python para optimizar el procesamiento digital de señales, esto hace que sea muy flexible.</li><li>• Proporciona un entorno de programación de aplicaciones basado en diagramas de flujo y bloques, con la posibilidad de modificarlos o crearlos.</li><li>• Tiene la posibilidad de exportar archivos en formatos que pueden ser utilizados por programas como Matlab, Octave, WireShark.</li></ul>



- Tiene a disposición una comunidad de desarrollo bastante activa y muy eficiente para solución de problemas e inquietudes.

En consideración a la tabla 2.4, se decide utilizar la plataforma GNU Radio debido a su amplia gama de funcionalidades, además, al tratarse de una herramienta de código abierto y licencia libre permite un control total sobre sus bloques propios, permitiendo de esta forma cualquier tipo de modificación y/o construcción.

Se utiliza además la plataforma *GitHub*<sup>5</sup> como herramienta de colaboración en el proceso de programación e implementación. *GitHub* permite la comunicación y el trabajo colaborativo entre programadores para resolución de dudas y llevar un control de versiones de los códigos desarrollados.

Finalmente, para la modificación de archivos y escritura de código se utiliza *Sublime Text Editor* [55], debido a que cuenta con características bastante útiles como la selección múltiple, búsqueda dinámica, detección de errores de sintaxis, acceso instantáneo a una línea específica del código, entre otras.

## 2.3. IMPLEMENTACIÓN

En esta sección se hace inicialmente una representación del escenario WLAN haciendo uso de los dispositivos SDR utilizados. En seguida, se describe la estructura y funcionamiento del USRP B210 y la plataforma GNU Radio seleccionada para su respectiva configuración. Posteriormente se explica la metodología de desarrollo utilizada en esta fase de implementación, finalmente se presenta la codificación y adaptación del algoritmo de control de potencia.

### 2.3.1 Representación del escenario WLAN con dispositivos SDR

La figura 2.7 muestra el escenario de implementación, en ella se observa que tanto las STAs como el AP están conformados por un USRP B210, una antena VERT 2450 y su respectiva conexión a un computador por medio de un cable USB 3.0.

---

<sup>5</sup> <https://github.com>

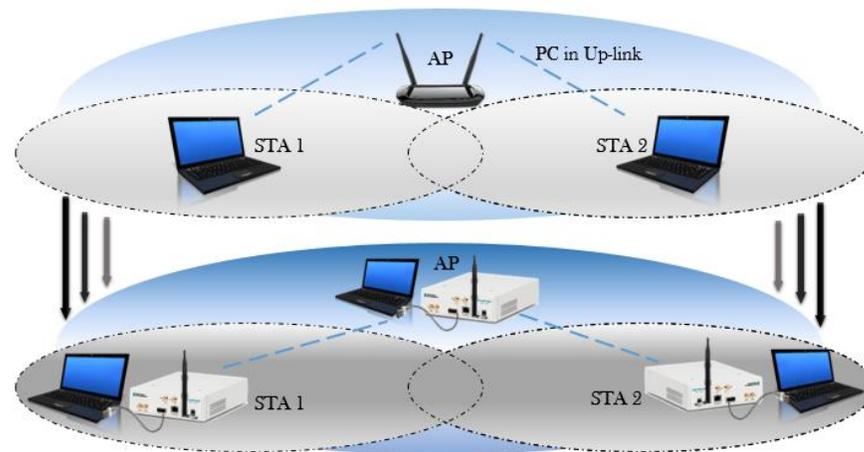


Figura 2.7 Escenario de implementación. Por los autores.

### 2.3.2 Características de los USRPs B210.

En la figura 2.8 se observa que el USRP cuenta con siete puertos periféricos, cuatro de ellos para transmisión y recepción de información, un puerto opcional multipropósito, el cual puede ser utilizado para la conexión de la antena del Sistema de Posicionamiento Global (GPS, *Global Positioning System*) o para sincronización del reloj interno de la FPGA, un puerto USB serial 3.0 y un conector de Corriente Continua (DC, *Direct Current*) de 6 V. El integrado AD9361 realiza las conversiones de la señal analógica a digital por medio de cuatro ADC, cada uno de ellos tiene la capacidad de procesar 61,11 millones de muestras por segundo, de esta forma es posible muestrear una señal con un ancho de banda máximo de 30.55 MHz teniendo en cuenta el límite impuesto por Nyquist<sup>6</sup> [56]. Los bloques TX\_0/1 y RX\_0/1 son interfaces lógicas que representan al Procesador Digital de Señal (DSP, *Digital Signal Processor*). La función del DSP es recibir o entregar información digital a la FPGA y recibir o entregar señales analógicas al Circuito Integrado de Radio Frecuencia (RFIC, *Radio Frequency Integrated Circuit*). El módulo RFIC se encarga de generar una señal de radiofrecuencia en el rango de 70 MHz y 6 GHz para posteriormente ser enviada a la interfaz radio que conecta a la antena [51].

<sup>6</sup> Nyquist estableció que la frecuencia de muestreo debe ser mayor o igual que dos veces su ancho de banda.

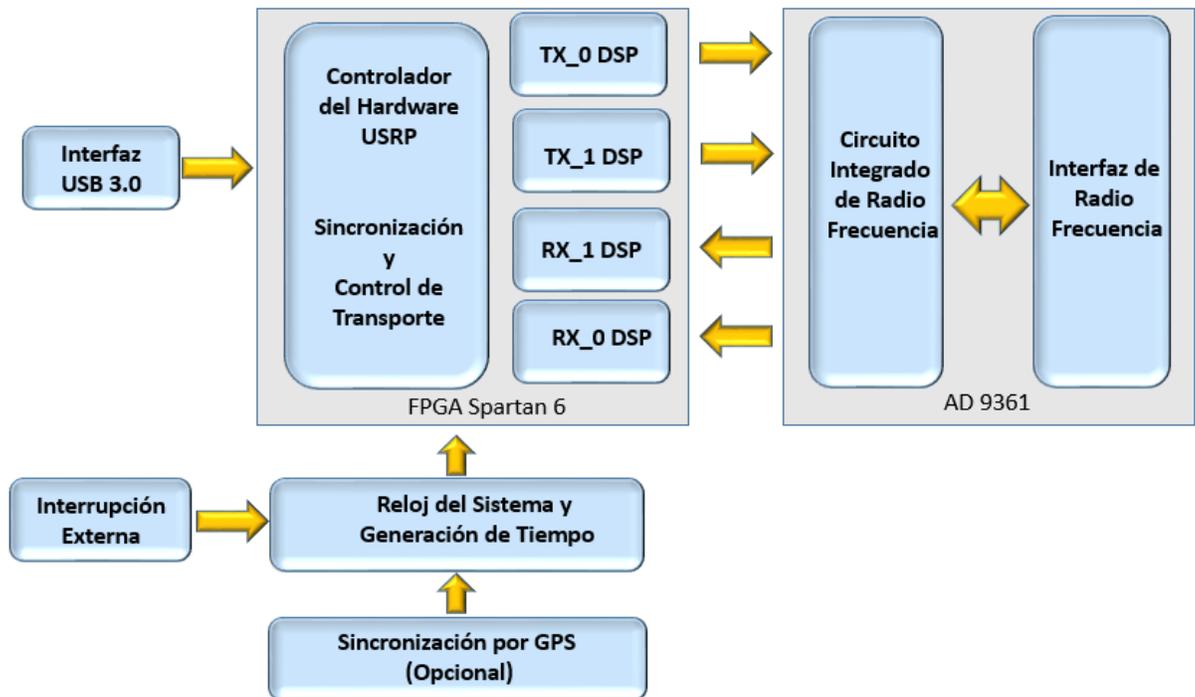


Figura 2.8 Estructura del USRP B210. Adaptada de [51].

En la figura 2.9 se observa el camino que recorre la señal a través del USRP. La tarjeta FPGA se encarga de recibir la información proveniente de la plataforma SDR desde el computador por medio de la interfaz USB 3.0 y convertir la señal de Banda base a radiofrecuencia y de radiofrecuencia a banda base a través de la sección de frecuencia intermedia y del Convertidor Descendente Digital (DDC, *Digital Down Converter*), el Convertidor Ascendente Digital (DUC, *Digital Up Converter*), el ADC y el DCA en los procesos de transmisión y recepción. Además, se encarga de enviar información hacia la plataforma SDR para su procesamiento. El USRP permite recibir y transmitir una señal de forma simultánea haciendo uso de puertos de transmisión y recepción independientes o haciendo uso del mismo puerto, sin embargo, es necesario configurar la tarjeta con frecuencias de transmisión y recepción diferentes, esta capacidad de la USRP permite implementar comunicaciones *semiduplex* y *full duplex* [57].

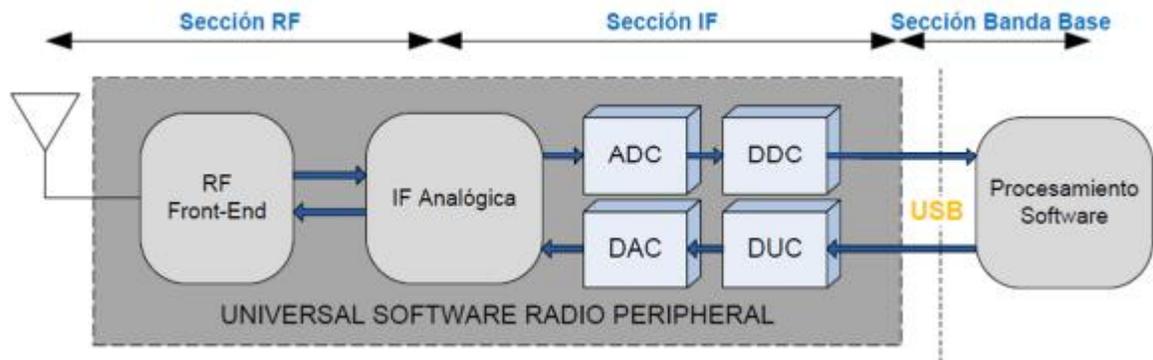


Figura 2.9 Trayectoria de la señal a través del USRP. Tomada de [57].

### 2.3.3 USRP Hardware Driver

National Instrument ha colocado a disposición del usuario el Controlador de Hardware USRP (UHD, *USRP Hardware Driver*), el cual es necesario para configurar la tarjeta USRP. El controlador UHD es una librería escrita en C++ y está diseñado para trabajar en las plataformas Linux, Windows y Mac de manera independiente o recurriendo a aplicaciones SDR como GNU Radio, LabView, Matlab (Simulink) y OpenBTS [57], [58]. A continuación, se explica de manera general el funcionamiento de la plataforma de desarrollo GNU Radio elegida en la sección 2.2.6.

### 2.3.4 GNU Radio

GNU Radio es una herramienta de software libre y de código abierto que ofrece al desarrollador un gran conjunto de bloques de procesamiento de señales desarrollados a partir de archivos y librerías en lenguajes de programación Python y C++. Estos bloques permiten que el usuario implemente prototipos de comunicaciones basados en SDR en escenarios reales y simulados de forma rápida. El funcionamiento de GNU Radio está basado en diagramas de flujo que interconectan los bloques, la conexión entre bloques simboliza el camino que sigue la señal iniciando en un bloque fuente y terminando en un bloque sumidero<sup>7</sup> [57], [59]. En la figura 2.10 se presenta un entorno básico de GNU Radio.

<sup>7</sup> En GNU Radio un sumidero es el último bloque encargado de recibir la información. Por ejemplo, el bloque *UHD: USRP Sink* es un bloque sumidero.

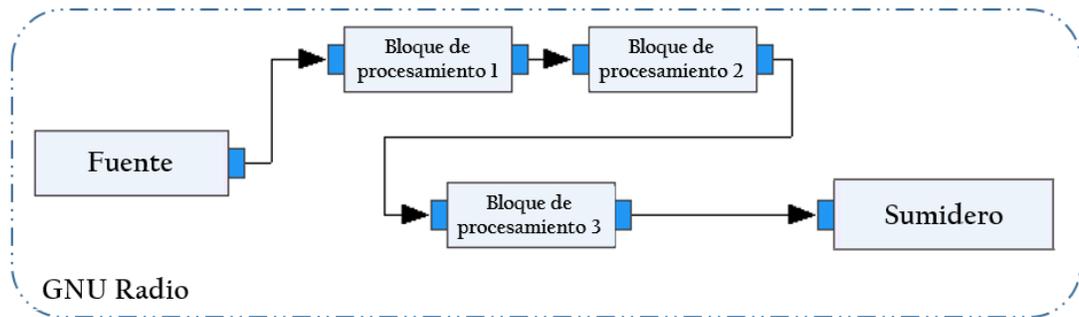


Figura 2.10 Tipos de bloques de GNU Radio. Por los autores

En la figura se identifican tres tipos de bloques, los cuales son:

- **Bloques fuentes:** tales como archivos en diferentes formatos, hardware radio o micrófonos.
- **Bloques sumideros:** tales como archivos en diferentes formatos, hardware radio, altavoces o visualizadores gráficos para ver la forma de onda de la señal.
- **Bloques de procesamiento de señal:** tales como filtros, amplificadores, operadores lógicos, operadores matemáticos, moduladores, demoduladores, entre otros.

Los bloques en GNU Radio generalmente desempeñan sólo una función, esto para que la plataforma sea flexible y las implementaciones sean modulares. Cada bloque tiene diferentes puertos de entrada y salida a excepción de los bloques fuentes que tienen solo una salida y los sumideros, que tienen solo una entrada. Cada puerto de entrada y salida maneja un tipo de dato en específico, los tipos de datos que principalmente se manejan son *message*, *byte* (1 *byte* de datos), *short* (2 *bytes* de datos), *int* (4 *bytes* de datos), *float* (4 *bytes* de datos para números en punto flotante) y *complex* (8 *bytes* de datos, un *float* para cada componente).

GNU Radio utiliza como lenguajes de programación C++ y *Python*. C++ para el procesamiento de la señal y en general para todo el trabajo a bajo nivel, lo que se denomina lenguaje de núcleo. Su uso se debe a las ventajas que aporta C++ al ser un lenguaje de nivel intermedio, es decir tiene características de lenguajes de bajo y alto nivel, sin embargo, tiene limitaciones en la integración y desarrollo de interfaces para interactuar con el usuario. Por otro lado, *Python* es un lenguaje de alto nivel que utiliza comandos en forma de *script*. Este lenguaje proporciona



ventajas en la integración e interacción gráfica con el usuario. En consecuencia, GNU Radio utiliza *Python* para describir la aplicación e interconectar los bloques que se usan en la implementación de un sistema de comunicación. Este requiere de una interfaz intérprete que permita la conversión del lenguaje Python a C++ y viceversa. Esta interfaz se denomina SWIG (*Simplified Wrapper and Interface Generator*) y el entorno de programación visual se denomina *GNU Radio Companion* [57]. La estructura de GNU Radio mencionada anteriormente se muestra en la figura 2.11.



Figura 2.11 Estructura de GNU Radio.

Una aplicación en GNU Radio está descrita por un archivo con extensión “.*grc*”, el cual describe el diagrama de flujo de la implementación. La ejecución de este archivo genera otro archivo con extensión “.*py*”, es decir, está descrito en el lenguaje de programación Python. Los bloques en GNU Radio se describen por cuatro tipos de archivos con extensión “.*xml*”, “.*cc*”, “.*h*” e “.*i*”. En los “archivos.xml” se definen los parámetros del bloque, el tipo de dato que éste recibe y transmite y el número de puertos de entrada y salida. Los “archivos.cc” implementan las funcionalidades del bloque en lenguaje C++. Los “*archivos.h*” contienen las librerías necesarias para la implementación del bloque, la gran mayoría de estos archivos corresponden a librerías propias de C++ y otros corresponden a librerías creadas específicamente para algunos bloques de procesamiento de señales. Los “*archivos.i*” permiten la interconexión entre los bloques de procesamiento de señal y la interfaz Python [57].

Los bloques en GNU Radio se clasifican en módulos de acuerdo a la función que realicen. Cada módulo se organiza en una estructura de carpetas definida, cada una de estas agrupa de forma organizada los archivos y librerías necesarios para que el



bloque cumpla su función [57]. En la tabla 2.5 se presenta la estructura en carpetas de un módulo de GNU Radio.

Tabla 2.5 Estructura en carpetas de un módulo de GNU Radio.

Carpeta	Descripción
<b>apps</b>	Contiene ejemplos y aplicaciones de prueba de un módulo.
<b>cmake</b>	Contiene archivos de configuración necesarios para la instalación, compilación, modificación y ejecución del módulo.
<b>grc</b>	Contiene los archivos con extensión “.xml” que describen los bloques de procesamiento, fuentes y sumideros.
<b>include</b>	Contiene los archivos tipo fuente con extensión “.h” de los bloques de procesamiento y las librerías propias del lenguaje C++.
<b>lib</b>	Contiene los archivos de fuente con extensión “.cc” de los bloques de procesamiento.
<b>python</b>	Contiene los scripts generados en lenguaje Python
<b>swig</b>	Contiene los archivos con extensión “.i” con la configuración del intérprete de lenguaje C++ a Python y viceversa.
<b>build</b>	Contiene los archivos de compilación para un módulo específico.

### 2.3.5 Implementaciones SDR IEEE 802.11 desarrolladas en GNU RADIO

Inicialmente se realizó la búsqueda de trabajos e investigaciones que implementen el estándar IEEE 802.11 en la plataforma GNU Radio. Algunas implementaciones relacionadas son las realizadas en [59], [60] y [61] siendo [60] el estudio más relevante, debido a que se implementa el primer transmisor - receptor IEEE 802.11a/g/p en una plataforma SDR. Este trabajo hace parte de un proyecto que lleva por nombre Experimentación y Medidas Inalámbricas (WIME, *Wireless Measurement and Experimentation*) [62] desarrollado en la Universidad de Paderborn en Alemania.

Considerando que el interés del actual trabajo de grado es la implementación y evaluación de un algoritmo de control de PC en GT en una red WLAN, el prototipo IEEE 802.11 desarrollado en [60] es tomado como sistema de comunicación base para implementar el algoritmo.



Gracias a las ventajas del software libre, se realiza la descarga e instalación del transmisor - receptor IEEE 802.11 mencionado y posteriormente se prueban sus funcionalidades. A continuación, se describen las características más importantes de esta implementación:

- Software de código abierto.
- Soporta varios esquemas de modulación y codificación.
- Tamaño de trama configurable.
- Intervalo entre tramas configurable.
- Implementa varios algoritmos de estimación de canal.
- Permite la conexión con la pila TCP/IP de *Linux*.
- Admite la supervisión del tráfico a través de *Wireshark*.
- Se ejecuta en *Linux* y MAC OS.
- Comunicación unidireccional.

Es importante mencionar que GNU Radio proporciona bloques propios para implementaciones OFDM, por esta razón, los autores optaron por implementar los estándares 802.11 a/g/p, ya que estos estándares utilizan OFDM como técnica de transmisión.

Considerando las características de la implementación desarrollada en [60], se identifican las funciones adicionales requeridas para implementar el algoritmo. En primer lugar, se requiere una comunicación bidireccional dado que el algoritmo es de lazo cerrado y se aplica al enlace ascendente, por ende, se necesita un proceso de realimentación de información desde el AP hacia la STA. En consecuencia, el primer paso es implementar un sistema de comunicación semiduplex que permita a las tarjetas USRPs transmitir y recibir información.

Puesto que la implementación considera una topología con dos STAs y un AP, es necesario la comunicación de un USRP configurado como AP y dos USRPs configurados como STAs, sin embargo, la implementación desarrollada en [60] no considera mecanismo de acceso al medio al tratarse de un sistema de comunicación entre un transmisor y un receptor. Los autores de esta investigación afirman que la implementación de un mecanismo de acceso al medio como CSMA/CA o CSMA/CD implica utilizar USRPs con capacidad de embeber la configuración software dentro de la FPGA para que las funciones y procedimientos se realicen a nivel de hardware, ya que los retardos ocasionados por el procesamiento a nivel software son bastante altos en comparación con los tiempos de procesamiento a nivel hardware.



CSMA/CA, método de acceso del estándar IEEE 802.11 considera tiempos en el orden de los microsegundos, sin embargo, en las implementaciones SDR los tiempos son del orden de los milisegundos, esto impide que la implementación de CSMA/CA funcione correctamente, puesto que el canal puede detectarse desocupado, pero puede ocuparse mientras la señal es procesada, llega hasta la plataforma SDR y se decide ocupar el canal [63].

Es necesaria la creación y modificación del código de diferentes bloques de GNU radio con el propósito de incluir el algoritmo en los USRPs configurados como STAs. En [60], la información se envía con una potencia de transmisión fija configurada de forma manual a través de una interfaz gráfica, para la implementación del algoritmo se necesita un mecanismo que configure de forma dinámica la potencia de transmisión de acuerdo a los valores que determine el algoritmo. Adicionalmente en el AP, se debe implementar un mecanismo de realimentación de información, el cual se encarga de calcular el valor de la SNR de la señal recibida y transmitir este valor hacia la STA que corresponda. Finalmente, con el propósito de evaluar la implementación, se requiere un mecanismo de almacenamiento de datos en cada iteración del algoritmo a fin de analizar y evaluar la implementación.

Las consideraciones previas permiten identificar siete etapas de la fase de implementación como se presenta en la figura 2.12.



Figura 2.12 Etapas de implementación. Por los autores.



## A. Sistema de comunicación semiduplex

El USRP B210 permite una comunicación *semiduplex* y una comunicación *fullduplex* utilizando canales de frecuencia diferentes en el segundo caso. En los estándares IEEE 802.11 a/g/p, los dispositivos realizan una comunicación *semiduplex*, por lo que la frecuencia en el enlace ascendente y descendente entre las STAs y el AP es la misma [11]. Después de que una STA accede al canal se inicia la comunicación *semiduplex* con el AP, estos dispositivos comparten el canal inalámbrico utilizando las tramas de gestión, las cuales ayudan a controlar el intercambio de la información durante la conexión. Para la implementación, no se consideran tramas de gestión, por lo que el acceso al canal y la gestión de la conexión entre el AP y las STAs se hace por medio de la técnica de Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Time Division Duplexing*). Es decir, la transmisión se realiza por un solo canal, que transmite en un instante de tiempo en un sentido y en el instante siguiente en el otro sentido.

La técnica TDD requiere que el sincronismo entre transmisiones sea bastante preciso. Sin embargo, al tratarse de una implementación con receptores y transmisores independientes emulados por equipos de procesamiento con características diferentes, es complejo lograr que la sincronización sea precisa. La falta de sincronización es la causa de los problemas de interferencia en la implementación. En IEEE 802.11 no existen problemas críticos de interferencia debido a que medidas como: la técnica de acceso al medio, el algoritmo de *backoff*, las reservaciones del canal por un periodo de tiempo evitan que haya más de una transmisión simultáneamente. El hecho de que se eviten los problemas de interferencia hace que el desempeño de una WLAN en términos de velocidad de transmisión de datos sea bajo cuando hay gran cantidad de dispositivos conectados a la red.

Posterior al estudio y a las pruebas realizadas con estos dispositivos, se concluyó que la comunicación *semiduplex* se logra incluyendo en un mismo diagrama de flujo (archivo con extensión. grc) los bloques que componen un transmisor y un receptor. En la conexión física de las antenas se tuvo en cuenta que el USRP B210 tiene dos canales, el canal RF A y el canal RF B como se muestra en la figura 2.13. Cada uno de los canales cuenta con dos puertos: TX/RX y RX2, el puerto TX/RX permite hacer la transmisión y recepción de información en configuración *semiduplex*, esto es posible debido a que este puerto comparte la misma salida de radiofrecuencia, pero internamente los caminos del transmisor y receptor son independientes, de esta forma, es posible realizar la implementación usando solo una antena conectada al



puerto TX/RX. También se puede hacer uso de dos antenas, conectando una de ellas en el puerto TX/RX para transmisión, y la otra en el puerto RX2 para recepción. En la implementación se optó por la primera opción.



Figura 2.13 Puertos de radiofrecuencia del USRP B210. Por los autores.

En la figura 2.14 se presenta el diagrama de flujo que une la configuración del transmisor y el receptor en un único archivo de nombre "wifi\_rx\_tx.grc", para ello, fue necesario crear variables independientes para el transmisor y el receptor. Cada dispositivo configurado como STA o AP ejecuta el archivo "wifi\_rx\_tx.grc" para que la tarjeta USRP transmita y reciba.

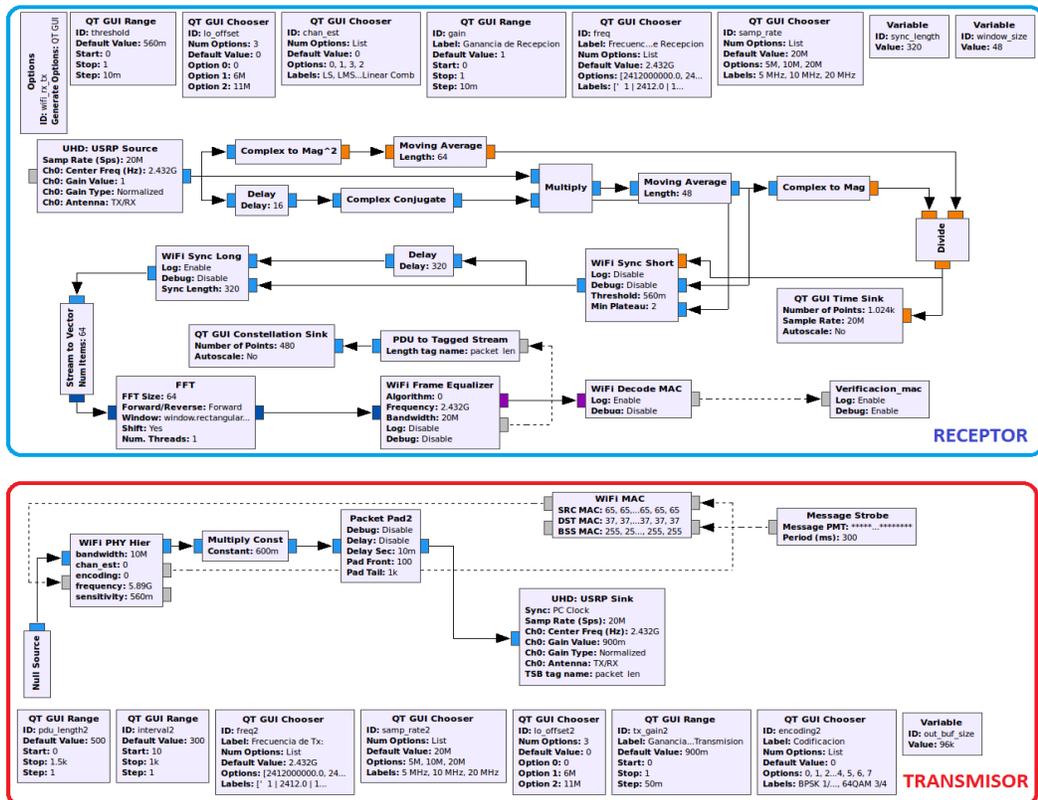


Figura 2.14 Implementación del sistema semiduplex en GNU Radio. Por los autores



Por la falta de sincronización, una de las STAs o el AP puede recibir señales provenientes de los otros dos dispositivos simultáneamente. Cuando eso pasa, el receptor debe determinar cuál de las dos señales debe recibir. En los estándares IEEE 802.11 a/g/p, se detecta el inicio de una trama si se supera un umbral de un coeficiente de autocorrelación, este coeficiente se calcula por medio de sentencias de código en la implementación a partir de una secuencia de entrenamiento corta enviada en el preámbulo PLCP, esta secuencia contiene 10 símbolos, cada uno de ellos conformado por 16 muestras [17]. Después de superar determinado umbral del coeficiente de autocorrelación, el sistema entiende que va a recibir una nueva trama. En la implementación, cuando dos o más tramas llegan simultáneamente al receptor, las señales se alteran, esto sucede, aunque los periodos de transmisión sean diferentes, ya que por efectos de la desincronización, dispersión temporal y variabilidad del canal inalámbrico las señales se interfieren en la llegada al receptor. Esto no es crítico en la implementación debido a que solo se tienen dos STAs y un AP, no obstante, en un escenario más interferente como en el caso de 2,4 GHz, la cantidad de tramas perdidas incrementa, dado que, si se recibe una señal poco después de otra, esa señal no es detectada, en el mejor de los casos solo incrementa el piso de ruido y por ende su efecto se ve reflejado en la SNR.

Experimentalmente, los autores de [60] han encontrado que un valor de 0,56 en el coeficiente de autocorrelación mencionado, genera buenos resultados en un ambiente con mínima interferencia, sin embargo, este valor del coeficiente limita la posibilidad de recibir algunas tramas en un escenario interferente. Por esta razón y con el ánimo de minimizar la cantidad de tramas perdidas, se realizaron diferentes pruebas para determinar de forma experimental el valor del coeficiente de autocorrelación que más se adecue al escenario de implementación.

En la tabla 2.6 se presentan los resultados de las pruebas realizadas y en la figura 2.15 se presentan los promedios estadísticos de las pruebas. Todas las pruebas se realizaron a 10 m, en el canal de 2,437 GHz y en cada prueba se enviaron 1000 tramas.



Tabla 2.6 Resultados de la variación del coeficiente de autocorrelación.

Coeficiente de Autocorrelación	Tramas perdidas en interiores					Tramas perdidas en exteriores				
	P1 <sup>8</sup>	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
0,32	54	58	67	67	68	76	67	61	79	57
0,36	66	57	67	56	48	75	87	67	61	76
0,40	57	60	56	58	58	67	69	66	70	67
0,44	56	67	57	51	48	67	71	76	56	57
0,48	56	53	50	49	48	59	56	61	66	59
0,52	57	68	63	84	67	67	78	73	76	77
0,56	86	81	78	69	90	75	78	82	85	87
0,60	194	205	189	197	185	199	188	202	198	199
0,64	294	300	306	291	298	302	307	299	290	289
0,68	345	247	351	353	345	364	368	367	367	375
0,72	376	367	376	370	384	395	406	411	396	391

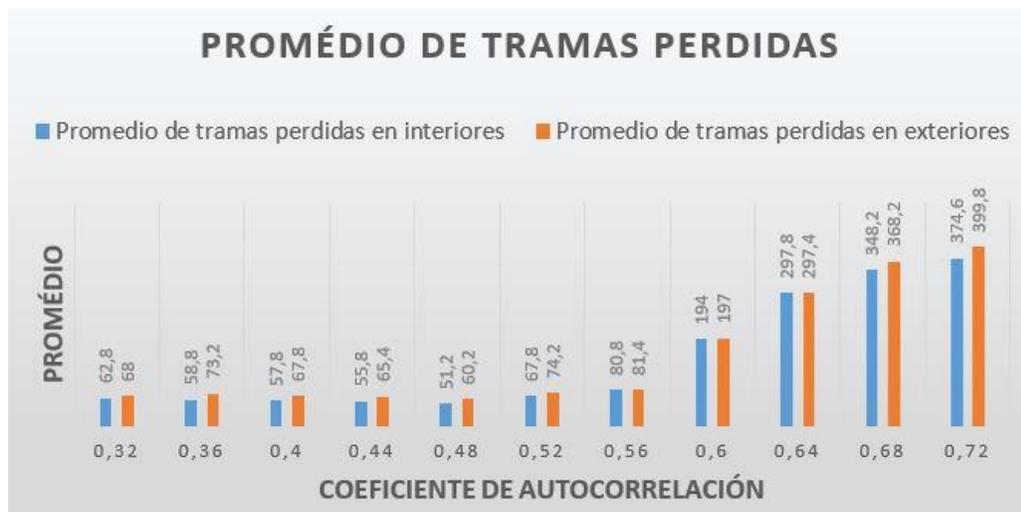


Figura 2.15 Promedio de tramas perdidas vs coeficiente de autocorrelación. Por los autores.

Cuando el coeficiente de autocorrelación es alto, la cantidad de tramas perdidas aumenta, debido a que se está obligando a que el sistema detecte una trama solo si la señal está muy poco distorsionada. En contraste, valores de coeficiente muy

<sup>8</sup> P1, P2, ..., corresponden a la Prueba 1, Prueba 2, ...



bajos hacen que la mayoría de las señales recibidas sean detectadas como tramas validas, sin embargo, la interferencia hace que las señales se modifiquen ocasionando problemas en los procesos siguientes a la detección de los símbolos, en los cuales la trama también puede ser descartada. Con base en la tabla 2.15, el valor del coeficiente de autocorrelación más adecuado para un escenario interferente es 0,48. Este valor permite reducir la cantidad de tramas perdidas en escenarios en interiores y exteriores.

### B. Desarrollo del código del algoritmo de control de potencia basado teoría de juegos

Una vez implementado el sistema de comunicación semiduplex, se procede a realizar la codificación del algoritmo a partir del diagrama de flujo mostrado en la figura 2.16. Cabe mencionar que inicialmente el algoritmo se implementó en la herramienta software Matlab y se realizaron pruebas independientes del cálculo de constantes y la reasignación de probabilidades con el objetivo de probar el correcto funcionamiento del mismo.



Figura 2.16 Diagrama de flujo del algoritmo de PC basado en GT. Por los autores.

El desarrollo software del algoritmo se dividió en etapas. Cada etapa implementa una función independiente con el propósito de reducir el tiempo de procesamiento y mantener ordenado el código fuente del algoritmo.



El último bloque del receptor implementado en [60] es el bloque “*WIFI parse MAC*”, el cual recibe la información en formato *message* luego de realizar el proceso de detección, demodulación y decodificación, por lo tanto, en este bloque se tiene acceso a la información de la carga útil de la trama, lo cual es importante en el desarrollo del algoritmo como se explica más adelante. Por eso, se decide realizar modificaciones a este bloque para llevar a cabo la codificación del algoritmo de control de potencia.

Se creó una función llamada “*void Asignacion\_Inicial*”, en ella se generan dos vectores con un tamaño de 15 elementos cada uno como se ilustra en la figura 2.17, el primer vector se encarga de almacenar 15 valores discretos de potencia y el segundo almacena 15 valores de probabilidad, estos valores de probabilidad tienen correspondencia uno a uno con los valores de potencia del primer vector. Los datos del vector de probabilidad se generan aleatoriamente en la primera iteración por medio de la función “*drand48()*”, en las siguientes iteraciones, el algoritmo se encarga de realizar su modificación. En seguida se determina la probabilidad mayor del vector de probabilidades, se extrae la posición de ese elemento en el vector y se elige como estrategia de la STA, el valor de potencia de transmisión ubicado en la posición extraída anteriormente.

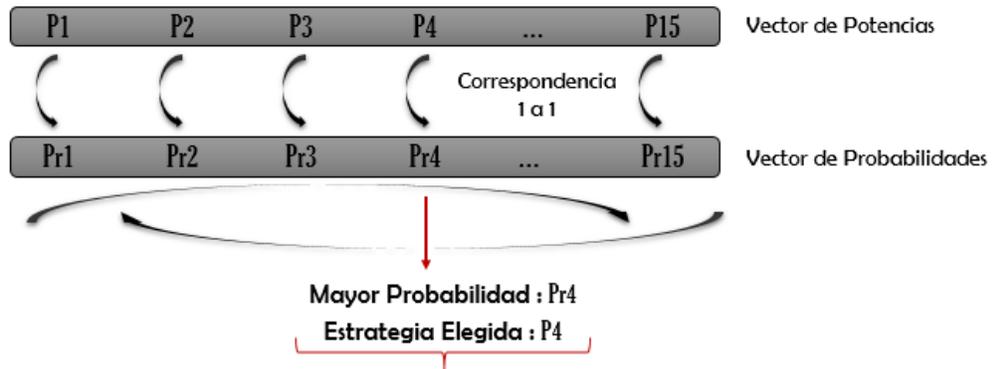


Figura 2.17 Correspondencia de elementos del vector de probabilidades y el vector de valores discretos de potencia. Por los autores.

La señal se transmite con la potencia elegida y el AP calcula la SNR de la señal recibida, este valor se envía a la STA utilizando 2 bytes del campo de datos de la trama MAC. En estos 2 bytes se envía además la longitud del valor de SNR para que pueda ser diferenciado de la carga útil en recepción.



La función “*void print\_ascii*” se encarga de acceder a la carga útil de las tramas para luego imprimirla en consola, en esta función se extrae el valor de SNR de los primeros 2 bytes del campo de carga útil. En seguida, el valor obtenido se envía como parámetro a la función “*void calculos\_algoritmo*” en la cual se verifica si éste valor de SNR está entre los límites de satisfacción y de acuerdo a eso, se realiza la actualización del vector de probabilidades aplicando las ecuaciones 2.5 y 2.6 mencionadas en la sección 2.2.4. Nuevamente determina la probabilidad mayor y se elige como estrategia la potencia asociada a esa probabilidad.

El valor de potencia seleccionado debe ser enviado al bloque encargado de configurar la potencia de transmisión al USRP, por lo tanto, se crea un puerto adicional a través del cual se envía el valor de potencia elegido como se muestra en la figura 2.18. GNU Radio asigna color a los puertos de acuerdo al tipo de dato que utiliza, en este caso el puerto es color gris, ya que los datos que se envían a través de él, son de tipo *message*. El código del algoritmo se encuentra en el apéndice A.

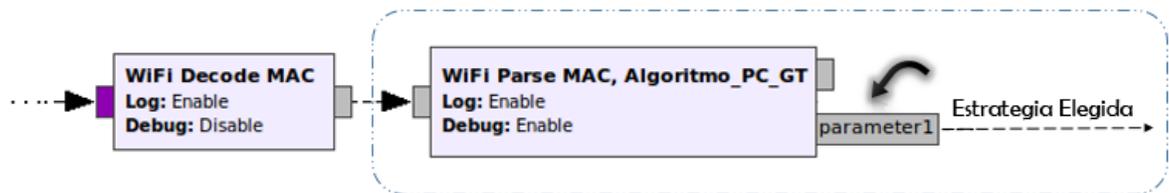


Figura 2.18 Puerto de salida de la estrategia elegida por el algoritmo. Por los autores

### C. Asignación dinámica de potencia

Para que el USRP pueda configurar dinámicamente su potencia de transmisión dependiendo de la estrategia elegida por el algoritmo, fue necesario modificar el bloque “*UHD: USRP sink*”. GNU Radio trae este bloque por defecto, ya que es el bloque controlador de la tarjeta USRP. Esto se logró adicionando un puerto de entrada al bloque “*UHD: USRP sink*” en el transmisor tal como se muestra en la figura 2.19. Este puerto se encarga de recibir el valor de potencia previamente seleccionado y enviarlo desde el bloque “*WIFI Parse MAC, Algoritmo\_PC\_GT*” hasta el bloque “*UHD: USRP sink*”. Internamente en este bloque, el valor de potencia de transmisión seleccionado es enviado como parámetro a la función “*void usrp\_sink\_impl::set\_normalized\_gain*” encargada de configurar el valor de potencia de transmisión del USRP.

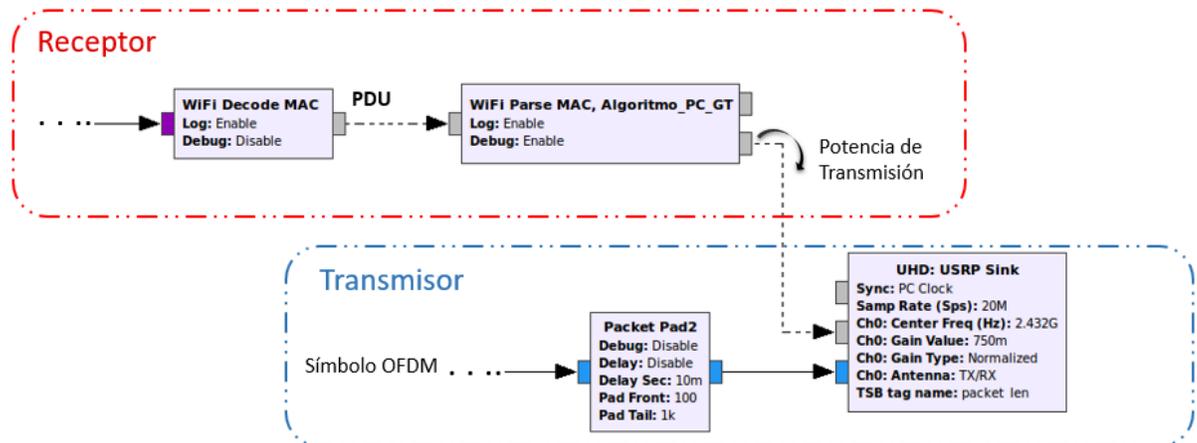


Figura 2.19 Implementación de la asignación dinámica de potencia. Por los autores

#### D. Verificación MAC

En las WLAN el canal inalámbrico es compartido, por esta razón todas las tramas convertidas en señales y enviadas al medio de transmisión son escuchadas por todos los nodos de la red siempre que estos estén configurados en la misma frecuencia. El estándar 802.11 define dos procesos básicos en la conexión entre una STA y un AP que son: autenticación y asociación. El proceso de autenticación está relacionado con la seguridad de la red a nivel de la capa de enlace. Para el presente trabajo no se considera este proceso, se supone que las STAs ya están autenticadas ante el AP. El proceso de asociación entre las STAs y el AP permite que las STAs tengan acceso completo a los servicios de la red. Básicamente, este proceso consiste en un registro necesario para que las tramas se entreguen a un destino específico de forma correcta. Al considerar dos STAs y un AP, se requiere un mecanismo que permita que las tramas enviadas lleguen al destino correcto y sean procesadas sólo las señales de interés y las demás sean descartadas, ya que la información sobre la función de utilidad es propia y diferente para cada STA. Se plantea desarrollar un proceso de verificación o filtrado a nivel de direcciones MAC e incluirlo en la implementación.

La figura 2.20 presenta el diagrama de flujo de los algoritmos encargados de verificar la dirección MAC en el AP y en las STAs. El algoritmo implementado en el AP se incluye en un bloque independiente, el cual se ubica después del proceso de decodificación. Una vez decodificada la trama recibida se extrae la dirección MAC del campo "Address 1 (Dirección de Destino)", la cual identifica al AP que asocia a esa STA, esta dirección MAC es comparada con la dirección MAC del AP que recibe



la trama, si las direcciones son diferentes, la trama es descartada, por el contrario, si las direcciones coinciden significa que la trama está en el destino correcto y por lo tanto es procesada. Además, el AP extrae la dirección MAC del campo “Address 2 (Dirección de Fuente)”, la cual identifica la STA que envía la trama, esta dirección se configura como dirección MAC de destino (Address 1) en la trama que envía el AP para que la información de retorno llegue a la STA correcta.

En la STA este proceso se incluye dentro del bloque encargado de ejecutar el algoritmo de control de potencia, en este bloque se extrae de la trama recibida la dirección MAC del campo “Address 1” que identifica la STA de destino y se compara con la dirección MAC de esa STA, similarmente como ocurre en el AP, si las direcciones MAC coinciden, la trama se procesa, de lo contrario se descarta.

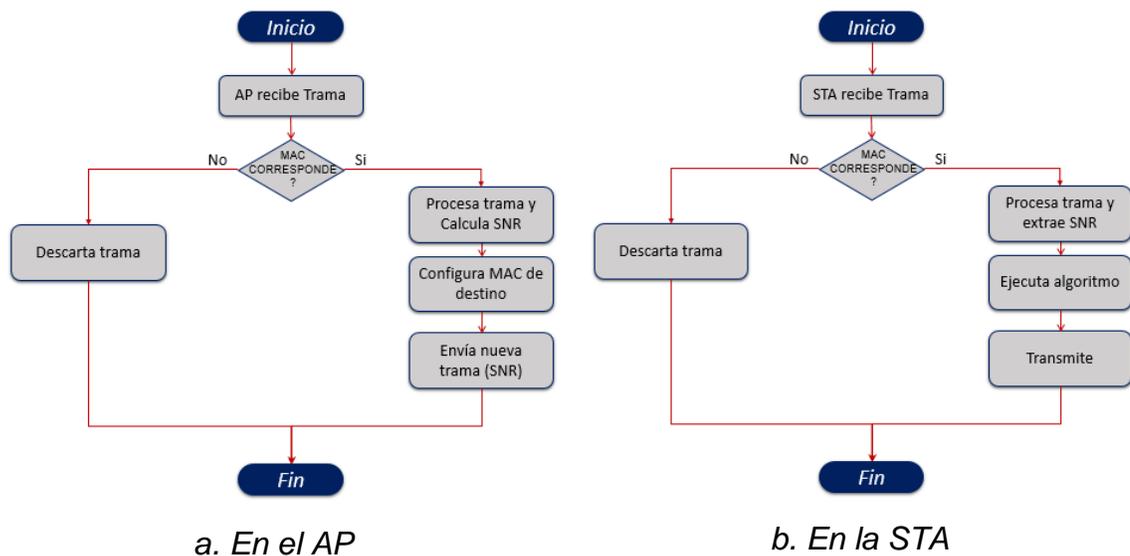


Figura 2.20 Algoritmos de verificación MAC. Por los autores.

### E. Realimentación del sistema

Debido a que el algoritmo de PC es en lazo cerrado y en el enlace ascendente, la realimentación de la SNR se hace desde el AP hacia la STA. Para implementar esta función, se realizaron modificaciones en los bloques del transmisor y del receptor del AP. La figura 2.21 presenta la parte final del receptor enmarcada en el recuadro azul y la parte inicial del transmisor<sup>9</sup> enmarcada en el recuadro rojo. El bloque previo

<sup>9</sup> El transmisor hace referencia a todo el diagrama de bloques que conforma un sistema transmisor.



al decodificador es el ecualizador, en este bloque se hace el cálculo de la SNR después del procedimiento de estimación de canal. El valor de SNR pasa por el bloque decodificador e ingresa al bloque “*verificación\_mac*”. Si se decide procesar la trama, la dirección MAC de la STA de la cual procede la trama es enviada por un puerto y configurada como dirección MAC de destino en el bloque “*WIFI MAC*”. Simultáneamente, por un puerto adicional se envía el valor de la SNR al bloque “*message Strobe*” encargado de conformar el mensaje que posteriormente será transmitido, para que este valor se incluya en el campo de datos de la trama MAC.

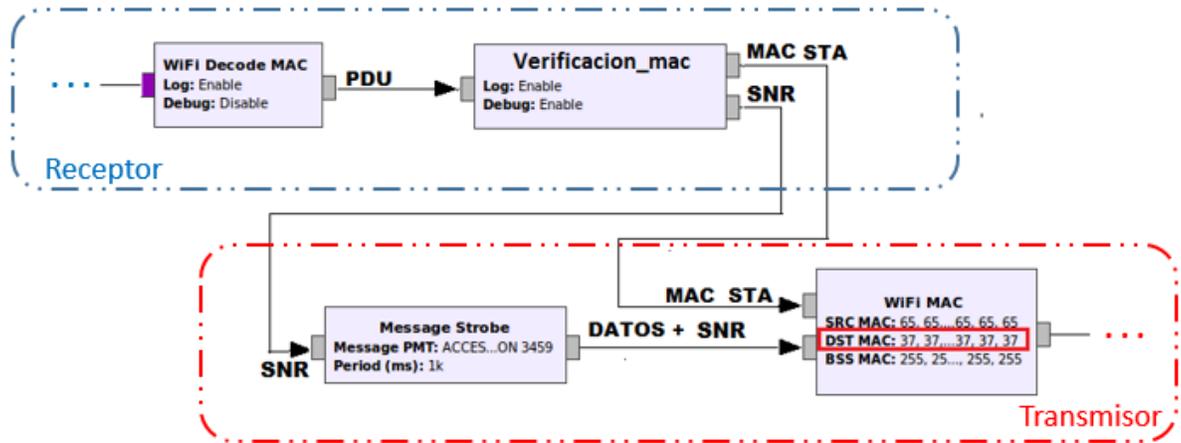


Figura 2.21 Mecanismo de realimentación de la SNR desde el AP a la STA. Por los autores.

## F. Caracterización de la potencia de transmisión del USRP B210

GNU radio permite variar la ganancia de transmisión ingresado un valor numérico de 0 a 100 dB o de 0 a 1 dB en escala normalizada, este valor no es comparable con los niveles de potencia utilizados en implementaciones WLAN reales. Además, según la hoja de datos del fabricante en el apéndice B, los valores de potencia de salida del USRP son mayores a 10 dBm, pero no se especifica la potencia máxima de transmisión, ni características de las curvas de ganancia. Por esta razón se opta por caracterizar la potencia de transmisión del USRP para obtener el valor de potencia de transmisión real en dBm respecto al parámetro que se ingresa en la plataforma software en dB, esto con el objetivo de tener un punto de comparación entre los valores obtenidos en la implementación y el consumo de energía de STAs reales.



Las mediciones se realizaron conectando la salida del USRP al sensor de potencia NRP-Z22 que hace parte de un analizador vectorial de redes Rohde & Schwarz [64], mediante un cable coaxial de bajas pérdidas de 1 m de largo con impedancia característica de  $50 \Omega$  y un conector N-hembra a SMA macho con 0,15 dB de pérdidas. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 2.22 en la cual se muestra la variación paramétrica de la ganancia de transmisión en dB normalizados. Los valores en el eje x inician en 0,2 debido a que el rango de funcionamiento del sensor de potencia NRP-Z22 es de -57 dBm a + 33 dBm. Experimentalmente se obtuvo que los valores de ganancia configurados en GNU Radio inferiores a 0,2 dB presentan poca variación, motivo por el cual la gráfica se genera desde 0,2 hasta 1 dB en la escala normalizada. Esto no representa un problema en la implementación, ya que, para garantizar la comunicación a distancias relativamente grandes, el algoritmo utiliza valores entre 0,68 hasta 0,96 dB con pasos de 0,02 dB en escala normalizada. Este rango permite que el máximo valor de potencia de transmisión del USRP sea de 19,99 dBm considerando las pérdidas generadas por el conector N hembra a SMA macho y la ganancia de 3 dBi de la antena VERT 2450. El valor de 19,99 dBm se aproxima a la potencia de transmisión más común de los dispositivos WLAN según las regulaciones en diferentes países [65], [66]. El montaje para la medición y los datos completos se muestran en el apéndice C.

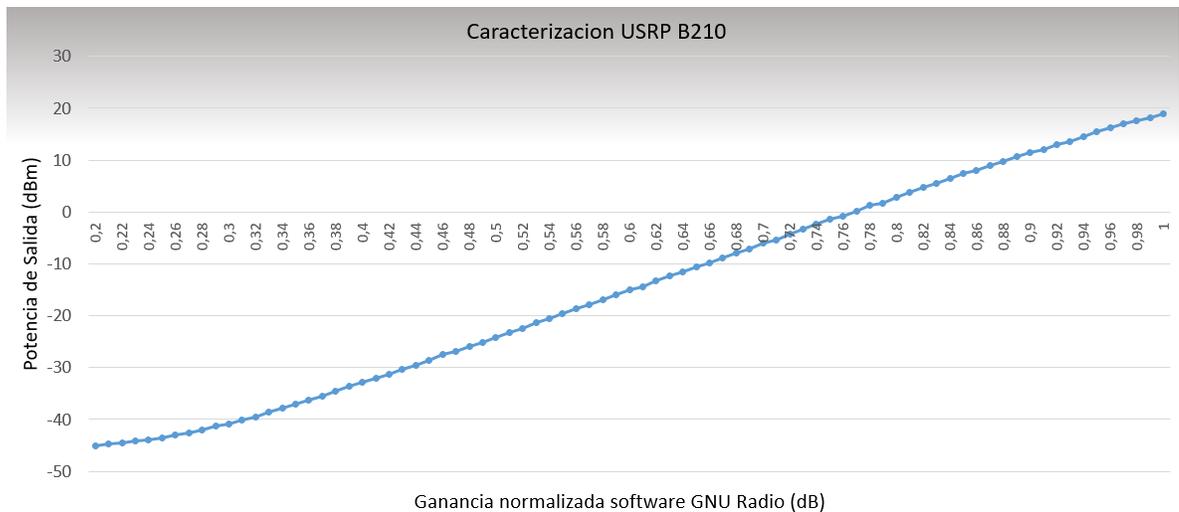


Figura 2.22 Caracterización de la potencia de transmisión del USRP B210. Por los autores.

### G. Almacenamiento de datos

Para analizar y verificar el funcionamiento del algoritmo de PC, fue necesario implementar un mecanismo de almacenamiento de los parámetros más importantes



generados en cada iteración del algoritmo. En consecuencia, se utilizaron librerías propias de C++ como “*iostream*” y “*fstream*”, las cuales permiten el almacenamiento de datos en tablas. Los archivos se generaron con extensión CSV (*comma-separated values*) por tratarse de valores con decimales, además se utilizó *Excel* y *Libreoffice* para generar las gráficas.

En las tablas generadas se guardaron los siguientes datos: en el caso de las STAs, en cada iteración del algoritmo se almacenan los elementos del vector de probabilidades, el valor de SNR realimentado desde el AP, la tasa de aprendizaje y el nivel de potencia seleccionado como estrategia. En el AP se guarda para cada STA los valores de SNR, el número de secuencia de tramas, el número de tramas recibidas con éxito y el número de tramas no recibidas.

## 2.4. PLAN DE PRUEBAS

En esta sección se define el plan de pruebas para comprobar el funcionamiento del algoritmo implementado. Se detallan las características técnicas y los parámetros de configuración de los dispositivos utilizados y se especifican las características de los escenarios de prueba.

El análisis del algoritmo se centra en su comportamiento con respecto a eficiencia energética<sup>10</sup>, interferencia<sup>11</sup> y la FER. La eficiencia energética se valida según los resultados de potencia de transmisión de las STAs que implementan el algoritmo frente a STAs que no lo implementa. Así mismo, la interferencia se valida respecto a los resultados de SNR obtenidos por las STAs que implementan el algoritmo en comparación con los resultados de SNR obtenidos por las mismas STAs sin implementar el algoritmo. Finalmente, los resultados de FER se validan en los dos casos, ya que los problemas de interferencia generan gran cantidad de tramas perdidas, por lo tanto, una reducción de la interferencia implica una reducción en la FER.

La tabla 2.7 detalla las principales características técnicas de los equipos utilizados para las pruebas. El escenario de implementación considera dos STAs y un AP, por lo tanto, se utilizaron 3 equipos portátiles para facilitar la movilidad en el caso de las STAs.

---

<sup>10</sup> Uso eficiente de la energía por medio de la optimización de los procesos que requieren energía.

<sup>11</sup> Interferencia entre las STAs que transmiten en el mismo canal de frecuencia (interferencia co-canal).



Tabla 2.7 Características técnicas de los equipos portátiles utilizados en las pruebas.

Dispositivo WLAN	Equipo portátil	Características
AP	Dell Inspiron 3459	Sistema operativo Linux Mint, procesador Intel Core I5, memoria RAM 6 G.
STA 1	Toshiba Satellite	Sistema operativo Linux Mint, procesador Intel Core I5, memoria RAM 4 G.
STA 2	Samsung 5 535U4C	Sistema operativo Linux Mint, Procesador Intel AMD 10, memoria RAM 4 G.

#### 2.4.1 Parámetros de configuración de los dispositivos utilizados en la implementación.

La tabla 2.8 describe los parámetros más importantes sobre la configuración del USRP B210 y algunas características específicas del sistema, resaltando que los pasos de potencia en la tabla 2.8 no incrementan en la misma proporción, ya que la curva de caracterización de la potencia de transmisión del USRP mostrada en la figura 2.23 no tiene un comportamiento totalmente lineal.

Tabla 2.8 Parámetros de configuración de los dispositivos.

Característica	Valor o concepto
Técnica de transmisión	OFDM
Esquema de modulación	BPSK
Técnica de codificación	Codificación convolucional
Tasa de codificación	1/2
Frecuencias de operación	<b>Banda 2,4 GHz:</b> 2,437 GHz <b>Banda 5 GHz:</b> 5,805 GHz
Volumen de datos	1500 bytes
Potencia del AP	19,99 dBm
Rango de SNR admitido (Rango de satisfacción).	14dB - 18dB en 5 GHz 14 dB - 20 dB en 2,4 GHz
Ganancia de la antena de AP	3 dBi



<b>Ganancia de la antena de las STAs</b>	3 dBi
<b>Tipo de antena</b>	Omnidireccional
<b>Periodo de trama</b>	300 ms
<b>Número de estrategias para cada jugador</b>	15
<b>Potencias de transmisión de las STAs</b>	-2,98dBm, -1,07dBm, 0,49dBm, 2,58dBm, 4,14dBm, 5,75dBm, 7,48dBm, 9,02dBm, 10,69dBm, 12,44dBm, 14,12dBm, 5,61dBm, 17,18dBm, 18,52dBm, 19,99dBm

Las pruebas del algoritmo de control de potencia basado en teoría de juegos se realizaron en escenarios *en interiores* y en interiores utilizando la banda de frecuencias de 2,4 GHz y 5 GHz. En el siguiente capítulo se muestran los resultados más relevantes y para eso se proponen los siguientes escenarios.

### **Escenario 1. Baja interferencia**

Se nombró escenario de baja interferencia al escenario más ideal de implementación. Por esta razón se considera solo el AP y una STA configurada en la banda de frecuencia de 5 GHz para evitar la interferencia generada por la segunda STA y la interferencia generada por las redes en la banda de 2,4 GHz cercanas al lugar de prueba. El objetivo de este escenario es evaluar el funcionamiento del algoritmo en aspectos como estabilidad<sup>12</sup>, asignación de potencia respecto a la distancia y movilidad en condiciones de mínima interferencia. Se definieron los siguientes casos de prueba:

- **Caso 1:** sin movilidad de la STA.
- **Caso 2:** con movilidad de la STA.

### **Escenario 2. Media interferencia.**

Se nombró escenario de media interferencia al escenario compuesto por las dos STAs configuradas en la banda de frecuencia de 5 GHz, de este modo, las señales emitidas por una STA son señales interferentes para la otra. El objetivo de este

---

<sup>12</sup> El estado que más se aproxima a un estado convergente del juego se ha nombrado estabilidad del algoritmo. En teoría de juegos se llama convergencia a un estado de equilibrio del juego. Al llegar a este estado, el juego se da por finalizado. Sin embargo, a nivel de implementación no se encuentran estados totalmente convergentes.



escenario es evaluar el comportamiento del algoritmo en condiciones de interferencia controladas.

- **Caso 1:** sin movilidad de la STA.
- **Caso 2:** con movilidad de la STA.

### ***Escenario 3. Alta interferencia.***

Se nombró escenario de alta interferencia al escenario que considera las dos STAs configuradas en la banda de 2,4 GHz. La alta interferencia se logra debido a la presencia de otras redes inalámbricas en el lugar de pruebas. Se definen los siguientes casos de prueba:

- **Caso 1:** sin movilidad de la STA.
- **Caso 2:** con movilidad de la STA.
- **Caso 3:** con interferencia generada por un inhibidor de señal.



### 3. PRUEBAS, ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la ejecución del plan de pruebas definido en el capítulo anterior. El análisis de los resultados se hace en consideración con los escenarios y casos de implementación propuestos. Cabe resaltar que cada escenario y caso tiene un procedimiento específico para su ejecución y evaluación, los cuales se explican a medida que se desarrolla el capítulo.

#### 3.1. MODIFICACIÓN DE LA TASA DE APRENDIZAJE

En las pruebas con movilidad de las STAs se evidenció, que el algoritmo no tenía un funcionamiento eficiente debido al comportamiento de la tasa de aprendizaje utilizada en [25], [31] y [37], siendo este, el comportamiento de una función decreciente respecto al número de iteraciones como se muestra en la figura 3.1, por esta razón, a medida que incrementa el número de iteraciones, el jugador aprende, pero en su aprendizaje no tiene en cuenta la movilidad, esto genera problemas en la adaptación de la STA a condiciones variantes del escenario.

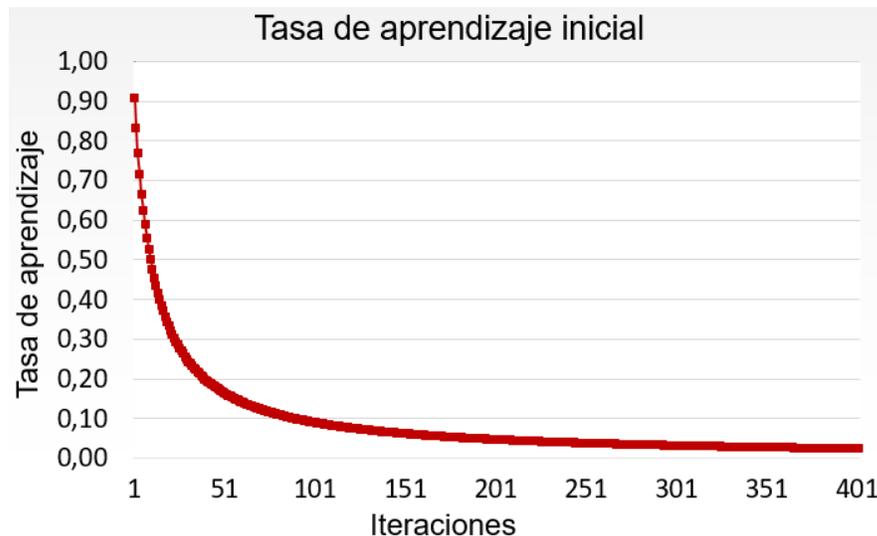


Figura 3.1 Comportamiento inicial de la tasa de aprendizaje.

En la figura 3.2 se relaciona la probabilidad de cada estrategia y el número de iteraciones para una STA que inicialmente se sitúa a 4 m del AP. Como se observa, el algoritmo se estabiliza en la iteración 100 cuando configura una potencia de 2,08 dBm. En la iteración 400 la STA se aleja 7 m del AP ubicándose a 11 m. En esta



situación, el algoritmo tarda aproximadamente hasta la iteración 920 para estabilizarse en otra estrategia, ya que el aprendizaje obtenido a partir de las iteraciones anteriores, hace que el algoritmo no reaccione rápidamente ante el cambio de posición de la STA y que se requieran gran cantidad de iteraciones para elegir una estrategia adecuada.

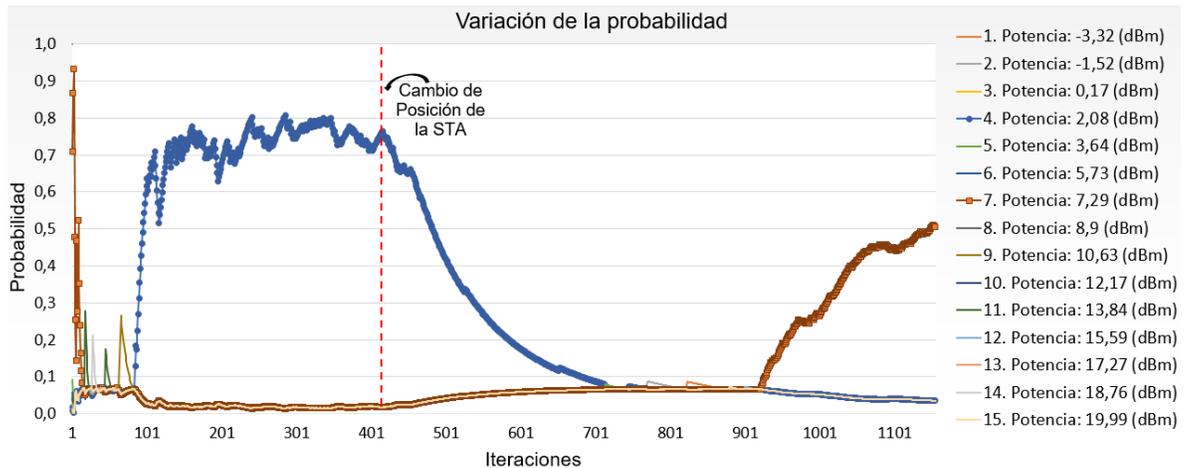


Figura 3.2 Variación de la probabilidad de potencia con movilidad de la STA, sin reinicialización de la tasa de aprendizaje.

Para que las STAs adapten rápidamente su potencia de transmisión a un nivel adecuado, se propone realizar la reinicialización periódica de la tasa de aprendizaje luego de un determinado número de iteraciones como se presenta en la figura 3.3.

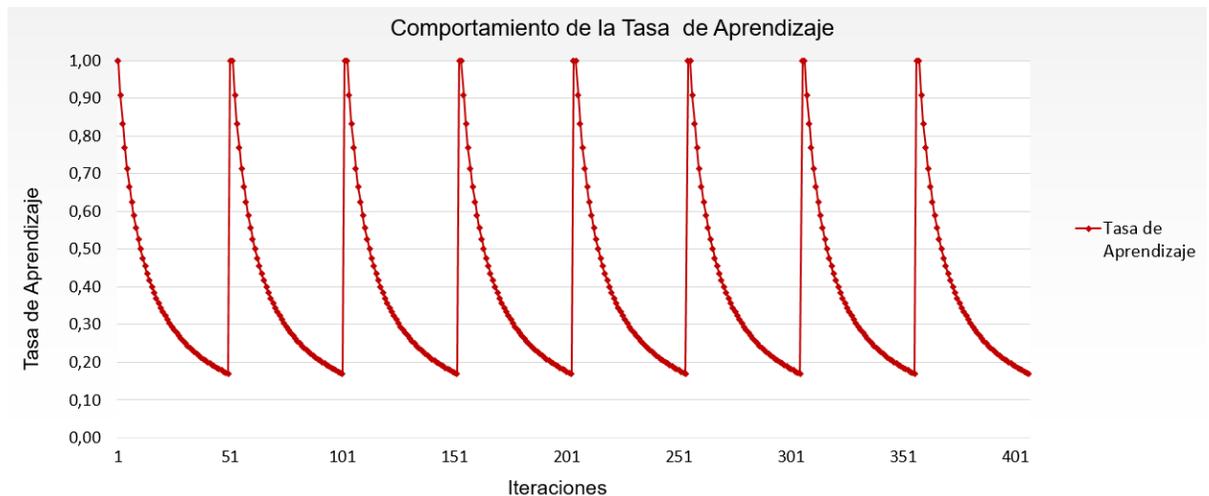


Figura 3.3 Comportamiento final de la tasa de aprendizaje.



En la figura 3.4 se presenta la variación de las probabilidades respecto al número de iteraciones para una STA que cambia de posición después de la iteración 400 similar al caso anterior, sin embargo, en este caso se incluye el proceso de reinicialización de la tasa de aprendizaje. Se observa que después del movimiento de la STA en la iteración 400, el algoritmo se estabiliza luego de 100 iteraciones. La reinicialización periódica de la tasa de aprendizaje permite que las STAs disminuyan rápidamente la probabilidad de las estrategias que no cumplen con los requerimientos de SNR e incrementen la probabilidad de la estrategia que genera valores de SNR dentro del rango de satisfacción.

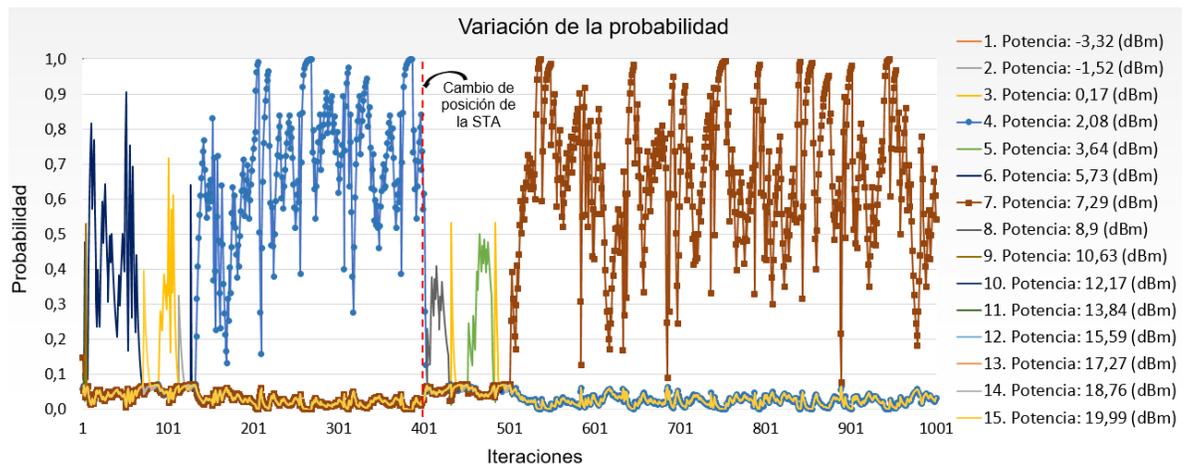


Figura 3.4 Variación de la probabilidad de potencia con movilidad de la STA, con reinicialización de aprendizaje.

A continuación, y luego de mejorar la adaptación de las STAs en situaciones de movilidad, se hace la descripción y desarrollo de cada escenario definido en el plan de pruebas. Cabe resaltar que la reinicialización de la tasa de aprendizaje se incluye en todos los escenarios y casos de pruebas a fin de tener parámetros similares para realizar comparaciones.

### 3.2. ESCENARIO 1: ESCENARIO CON BAJA INTERFERENCIA.

El primer escenario de pruebas es el más simple en una red WLAN en modo infraestructura, está conformado por el AP y la STA 1. Se realizan estas pruebas para analizar el funcionamiento del algoritmo con y sin movilidad en un escenario de implementación con poca interferencia, ya que no existe la interferencia que podría causar la STA 2. Además, se utiliza un canal en la banda de 5 GHz ya que la mayoría de redes 802.11 cercanas al lugar de pruebas utilizan la banda de 2,4 GHz, lo cual permite tener un escenario de implementación casi ideal, pues el



sistema solo se ve afectado por el ruido generado en el canal inalámbrico. Además, se configuró el límite de satisfacción inferior con un valor de SNR de 14 dB y como límite superior un valor de SNR de 20 dB [67], [68], y [69]. El montaje de este escenario se presenta en la figura 3.5.

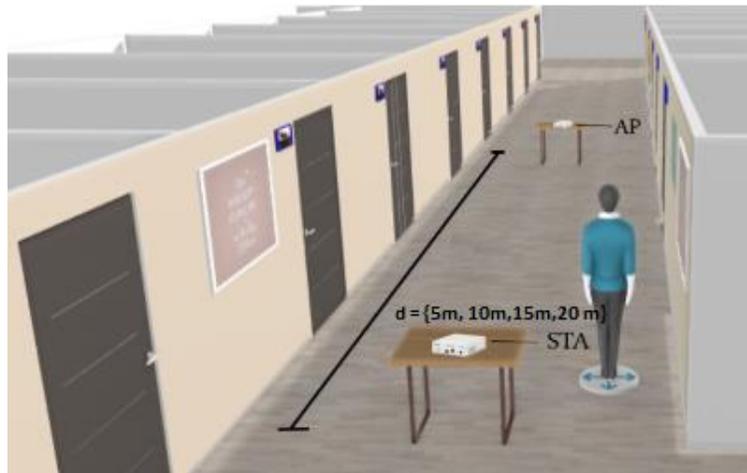


Figura 3.5 Escenario de pruebas 1.

### 3.2 1 Caso 1: STA sin movilidad

En esta prueba, la STA se ubicó a distancias de 5 m, 10 m, 15 m y 20 m. Para cada distancia se generaron gráficas de probabilidad vs número de iteraciones y de SNR vs número de iteraciones. La figura 3.6 muestra el perfil de estrategias y la variación de la probabilidad de cada estrategia respecto al número de iteraciones para una STA ubicada a 15 m.

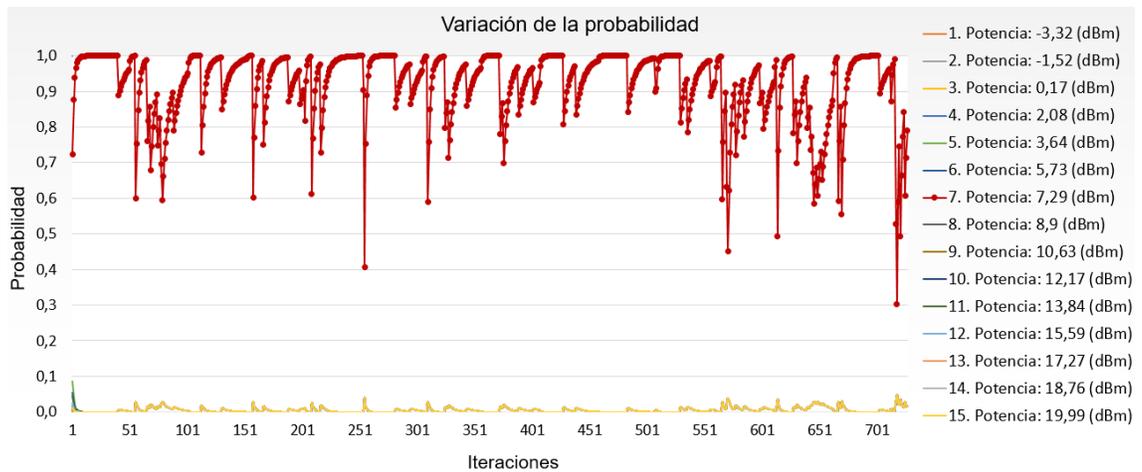


Figura 3.6 Variación de la probabilidad de potencias.

Se observa que el algoritmo selecciona inicialmente y de manera aleatoria, un nivel de potencia de 7,29 dBm asociado con la probabilidad N<sup>o</sup> 7, con esta potencia se alcanza una SNR dentro de los límites de satisfacción como se muestra en la figura 3.7, por esta razón, la probabilidad asociada a la estrategia elegida incrementa desde la primera iteración del algoritmo mientras los demás valores de probabilidad disminuyen. De esta manera, la STA mantiene la misma potencia de transmisión a lo largo de la prueba.

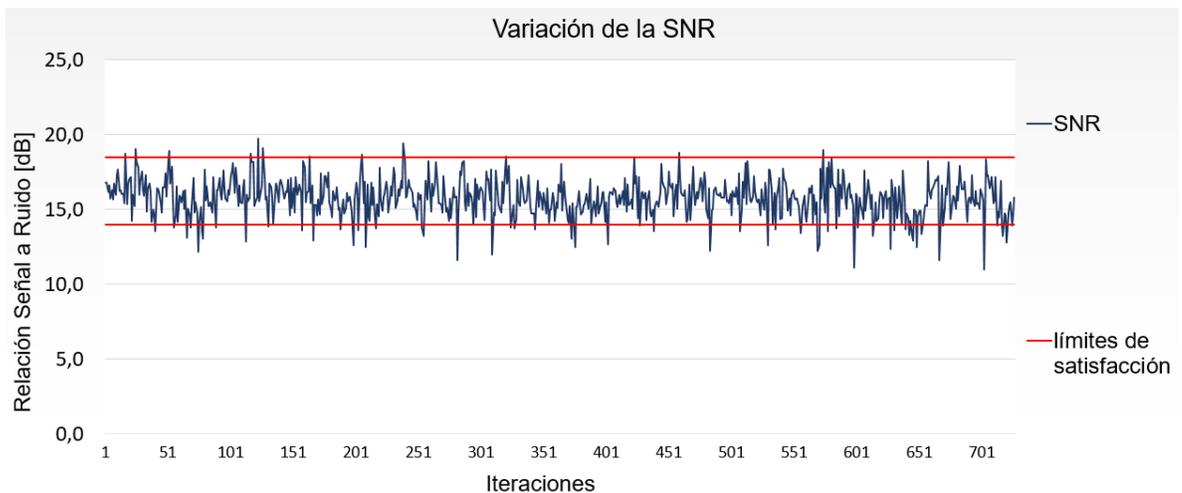


Figura 3.7 Variación de la SNR.

La figura 3.8 presenta los resultados obtenidos a diferentes distancias entre el AP y la STA. Se evidencia que, a mayor distancia, la STA elige como estrategia una potencia mayor para alcanzar valores de SNR que cumplan con los requerimientos, mientras que, a distancias menores, la STA utiliza potencias bajas para transmitir la



información, esto indica que el algoritmo evita el consumo innecesario de energía de las STAs ubicadas cerca del AP.

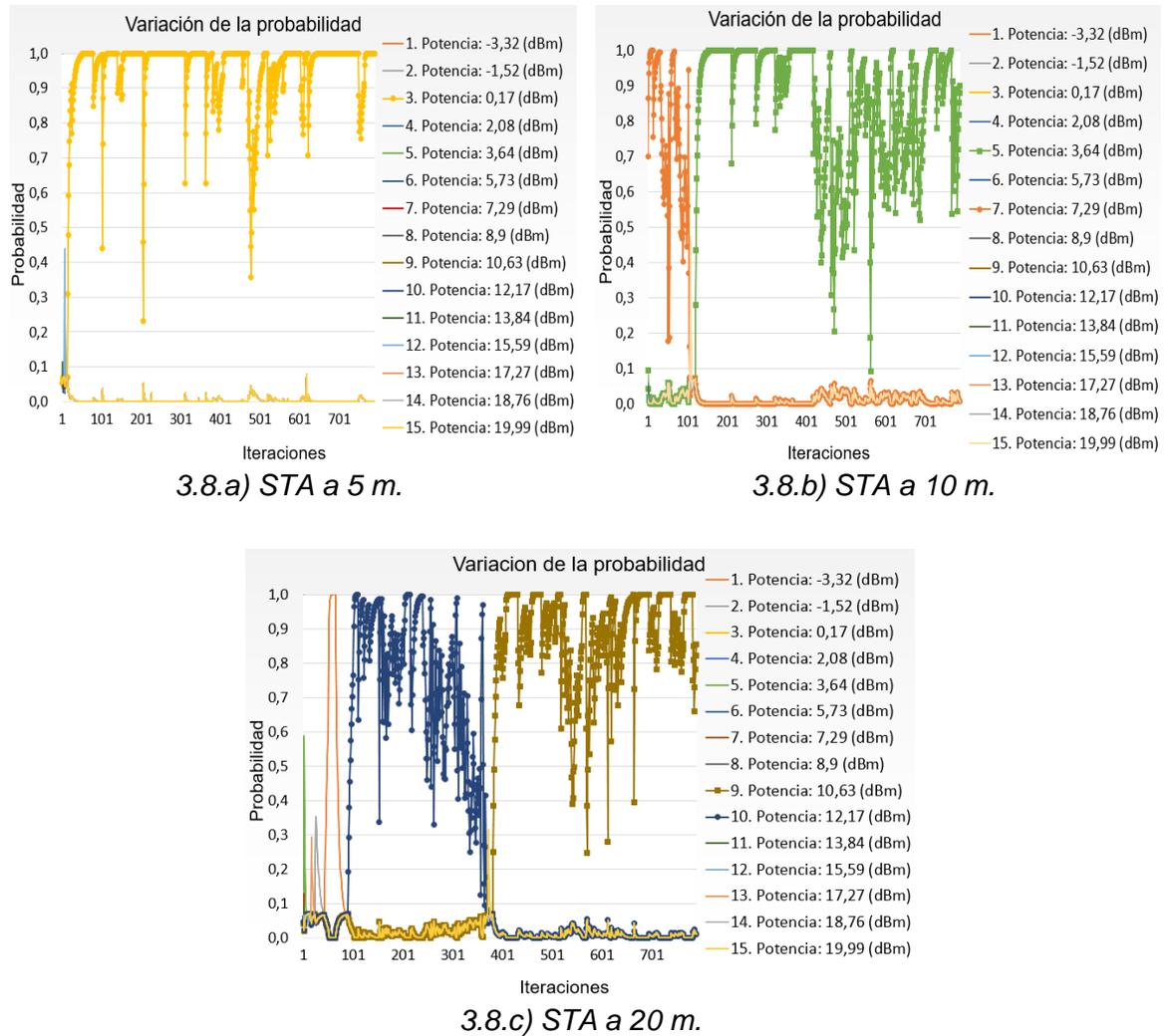


Figura 3.8 Variación de probabilidades para la STA 1 a diferentes distancias.

En la figura 3.8.c) se aprecia un cambio de estrategia aun cuando la STA se mantiene en un mismo lugar. Este comportamiento se debe a la reinicialización periódica de la tasa de aprendizaje, ya que en un determinado momento el ruido o la interferencia pueden experimentar cambios y la SNR puede variar y dejar de estar dentro del rango de satisfacción como se muestra en la figura 3.9.a) aproximadamente entre la iteración 330 y 380. La probabilidad de la estrategia elegida disminuye desde ese momento como se presenta en la figura 3.9 b) hasta que la STA opta por cambiar de estrategia y elegir una potencia adecuada para



conseguir valores de SNR dentro del rango establecido. Este comportamiento hace evidente que el algoritmo permite a las STAs adaptarse a variaciones del escenario.

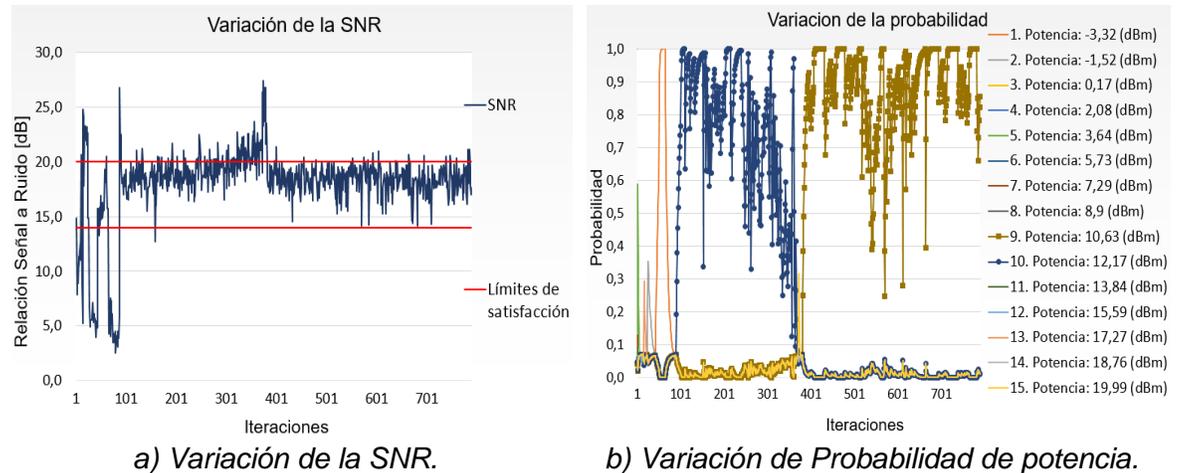


Figura 3.9 Comportamiento de la SNR y probabilidades con variabilidad del escenario para STA a 20 m.

### 3.2.2 Caso 2: STA con movilidad

En el mismo escenario se ubica la STA a diferentes distancias durante la ejecución del algoritmo para verificar la adaptación dinámica de la potencia de transmisión en condiciones de movilidad. La STA se movió cada 200 iteraciones del algoritmo en pasos de 4 m, iniciando en 4 m hasta situarse finalmente a 20 m. En la figura 3.10 se aprecia que, en las primeras iteraciones del algoritmo, la STA prueba diferentes estrategias en busca de una estrategia adecuada. Luego de 30 iteraciones, la STA elige una potencia de transmisión de 0,17 dBm y la mantiene hasta aproximadamente 200 iteraciones. En este momento la STA se aleja 4 m del AP generando una disminución de la probabilidad de la estrategia seleccionada inicialmente, ya que el movimiento de la STA provocó valores de SNR por debajo del límite de satisfacción inferior como se observa en la figura 3.11. Después de pocas iteraciones, la STA elige y mantiene la potencia de transmisión de 3,64 dBm alcanzando los requerimientos de SNR. Después la iteración 400, la STA se aleja 4 m más y configura una potencia de transmisión de 7,29 dBm, este valor genero valores de SNR dentro y fuera del rango impuesto, como se evidencia en la figura 3.11, por esta razón, la STA mantiene esta estrategia por poco tiempo hasta elegir definitivamente una potencia de 8,9 dBm. En el siguiente movimiento de la STA, se prueban las potencias de 13,84 dBm, 17,27 dBm y 12,17 dBm siendo este último valor, la estrategia que permitió estabilizar los valores de SNR dentro de los límites impuestos. Finalmente, la STA se sitúa a 20 m y en la iteración 851 el algoritmo se estabiliza al utilizar la potencia de 15,59 dBm.

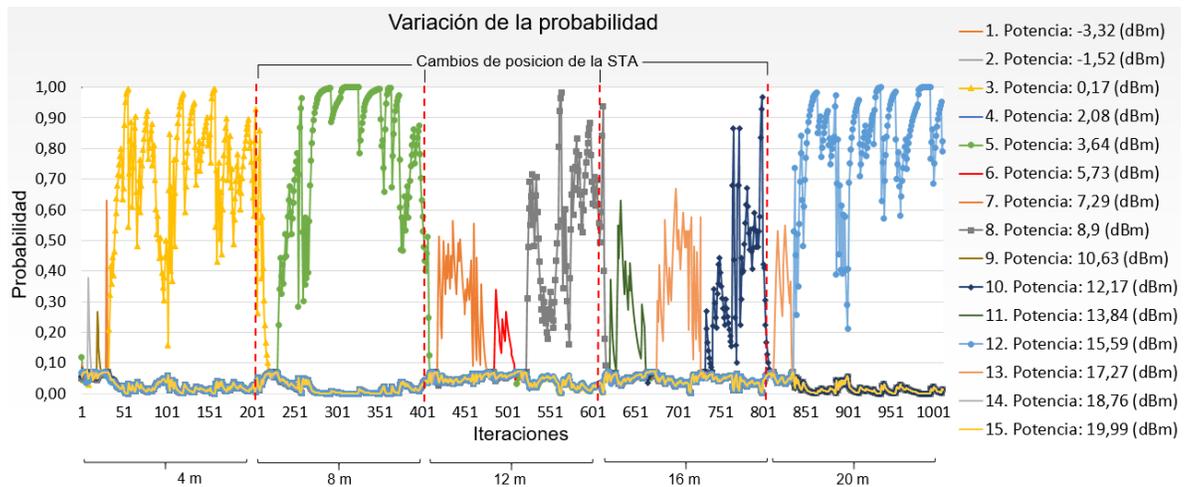


Figura 3.10 Variación de la probabilidad de potencia para STA con movilidad.

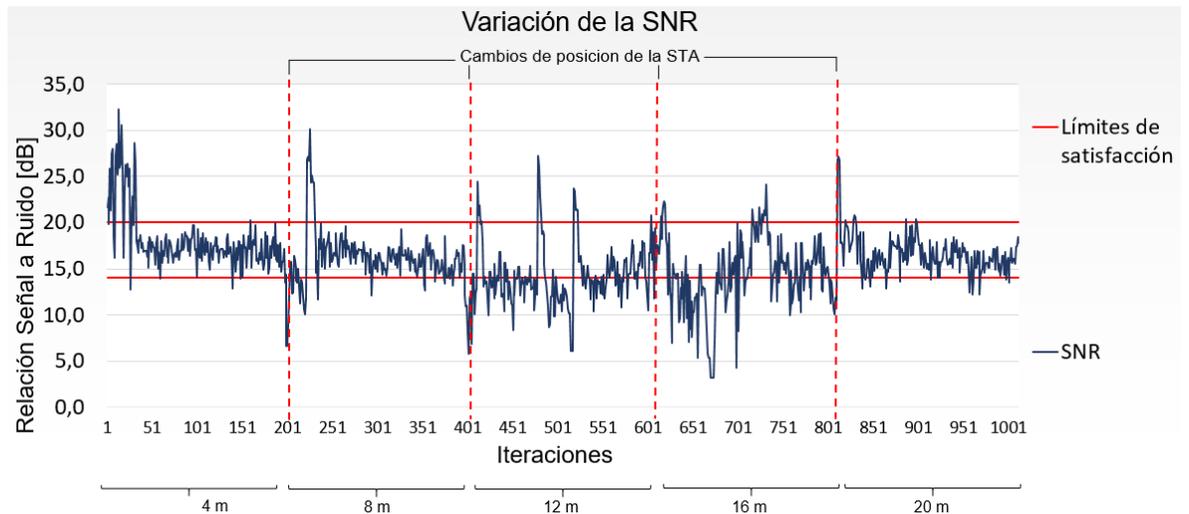


Figura 3.11 Variación de la SNR para STA con movilidad.

A pesar de la movilidad de la STA, el algoritmo logra equilibrar y mantener una SNR dentro del rango de satisfacción establecido. Esto evidencia que el algoritmo configura de manera dinámica la potencia de transmisión del USRP respecto a las variaciones de distancia entre la STA y el AP, además, los valores de potencia elegidos son mayores a medida que la distancia entre la STA y el AP incrementa.

### 3.3. ESCENARIO 2 Y ESCENARIO 3: ESCENARIOS CON INTERFERENCIA

Finalizadas las pruebas en el escenario con poca interferencia conformado por un AP y una STA, se procede a incluir en la topología de pruebas la segunda STA. Se



considera que la STA 2 genera interferencia ya que no se cuenta con un mecanismo de control de acceso al medio, debido a que los retardos de procesamiento en la implementación SDR son altos en comparación a los tiempos utilizados en el estándar 802.11, por eso las tramas enviadas por las dos STAs pueden colisionar y causar interferencia. Las pruebas se realizan para frecuencias en la banda de 5 GHz y 2,4 GHz para validar el algoritmo en escenarios con media y alta interferencia, respectivamente. Además, se realizan en escenarios interiores y exteriores. La figura 3.12 presenta el montaje de las pruebas.

Puesto que la implementación considera una topología con dos STAs y un AP, es necesario la comunicación de un USRP configurado como AP y dos USRPs configurados como STAs, sin embargo, la implementación desarrollada en [60] no considera mecanismo de acceso al medio al tratarse de un sistema de comunicación entre un transmisor y un receptor. Los autores de esta investigación afirman que la implementación de un mecanismo de acceso al medio como CSMA/CA o CSMA/CD implica utilizar USRPs con capacidad de embeber la configuración software dentro de la FPGA para que las funciones y procedimientos se realicen a nivel de hardware, ya que los retardos ocasionados por el procesamiento a nivel software son bastante altos en comparación con los tiempos de procesamiento a nivel hardware. CSMA/CA, método de acceso del estándar IEEE 802.11 considera tiempos en el orden de los microsegundos, sin embargo, en las implementaciones SDR los tiempos son del orden de los milisegundos, esto impide que la implementación de CSMA/CA funcione correctamente, puesto que el canal puede censarse como desocupado, pero puede ocuparse mientras la señal es procesada, llega hasta la plataforma SDR y se toma la decisión de ocupar el canal [63].

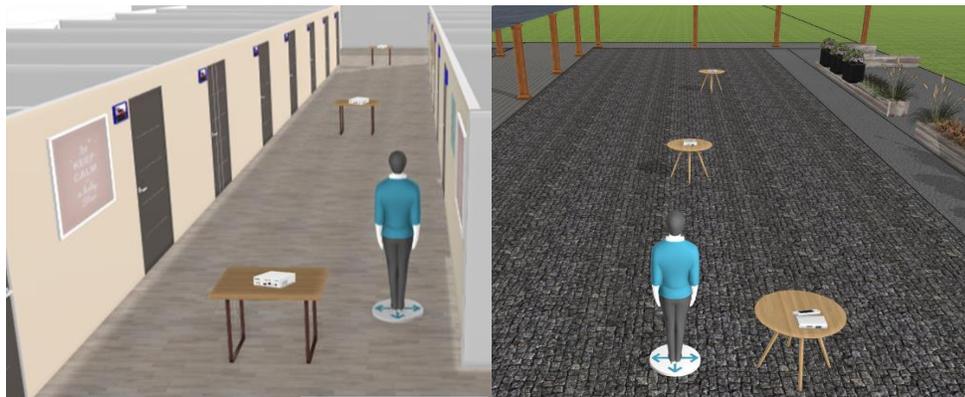


Figura 3.12 Escenario de pruebas 2.



El comportamiento del algoritmo en los escenarios de interiores y exteriores fue similar tanto en 2,4 GHz como en 5 GHz. En interiores los valores de potencia seleccionados por las STAs fueron ligeramente menores en comparación con los valores de potencia en exteriores, esto a causa de que en interiores la señal se dispersa en menor proporción, ya que por efectos del multitrayecto las señales pueden interferir constructivamente y reafirmar el nivel de la señal que llega al receptor. Sin embargo, los resultados presentados a continuación son los obtenidos en el escenario de exteriores, ya que en este escenario fue más fácil encontrar un lugar con pocas redes WLAN en el caso de 2,4 GHz, además facilitó las pruebas para distancias largas. No obstante, para el análisis de ahorro de energía, FER y *throughput* realizado más adelante, si se tienen en cuenta los dos escenarios.

### **3.3.1 Caso 1: STA 1 y STA 2 sin movilidad**

#### **3.3.1.1 STA 2 como fuente de interferencia estática**

La STA 1 se ubicó a diferentes distancias respecto al AP mientras la STA 2 se ubicó en una posición fija a 10 m del AP. En la figura 3.13 se aprecia que el algoritmo se estabilizó utilizando niveles de potencia de 2,08 dBm, 5,73 dBm, 10,63 dBm y 13,84 dBm para distancias de 5, 10, 15 y 20 m, respectivamente. Los valores de potencia son mayores a los obtenidos en el escenario 1 debido a la interferencia generada por la STA 2 y a que la señal se dispersa más en el escenario de exteriores, por lo tanto, la STA 1 debe incrementar su potencia para mantener los valores de SNR dentro del rango de satisfacción. Se resalta el comportamiento del algoritmo en la figura 3.13.b), en la cual se evidencia la gran cantidad de estrategias que la STA probó sin éxito hasta encontrar la potencia de transmisión adecuada, que en este caso es 5,73 dBm. Este comportamiento se debe a la generación aleatoria de los valores iniciales de probabilidad, ya que las estrategias con más alta probabilidad, pueden ser estrategias que no satisfacen los requerimientos de SNR, por lo tanto, la STA debe cambiar de estrategia hasta elegir la más adecuada.

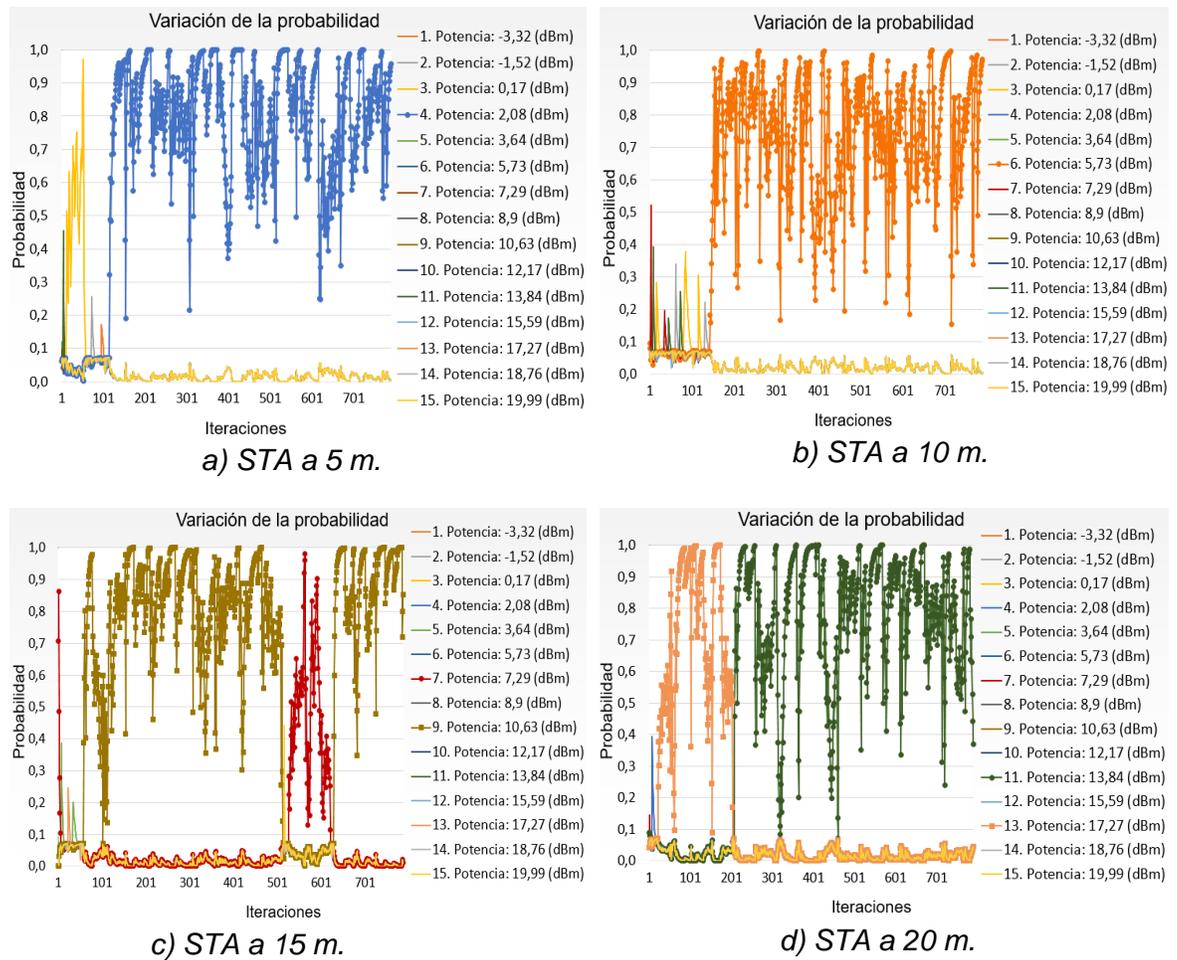


Figura 3.13 Variación de probabilidades para la STA a diferentes distancias.

La figura 3.13.c) muestra que el algoritmo en un momento dado cambia de estrategia debido a que la SNR cambió y dejó de estar dentro del rango de satisfacción, pero después de pocas iteraciones vuelve a configurar la potencia de transmisión que configuró inicialmente, porque la SNR volvió a oscilar en los valores iniciales.

Se realizaron pruebas similares en la banda de 2,4 GHz con el objetivo de analizar el comportamiento del algoritmo en un escenario con mayor interferencia, siendo este el escenario más común de redes WLAN. El sitio de prueba fue un lugar sin mucha saturación de redes, ya que, en lugares con gran cantidad de redes, el funcionamiento fue similar, pero tomó mucho más tiempo completar un número determinado de iteraciones. Esto se debe a que los dispositivos WLAN reales envían tramas a intervalos en el orden de los microsegundos y en el caso de la



implementación, se envían tramas a intervalos en el orden de los milisegundos, por lo tanto, la cantidad de tramas enviadas por los dispositivos WLAN generan la suficiente interferencia para evitar que las tramas enviadas por el USRP sean detectadas y recibidas satisfactoriamente. Por esta razón, se eligió el canal 6 del estándar IEEE 802.11g con frecuencia de operación de 2,437 GHz, en el cual operaban dos redes en el lugar de pruebas y el resto de redes en canales vecinos.

En la figura 3.14 se muestra la variación de la SNR y probabilidad vs número de iteraciones para la STA1 ubicada a 5 m del AP. En la figura 3.14.a) se aprecia que la STA inicialmente eligió la potencia de transmisión de 7,29 dBm, sin embargo, este valor no generó valores de SNR dentro del rango de satisfacción como se observa en la figura 3.14.b), por lo tanto, la STA optó por cambiar ese valor y elegir la potencia de 2,08 dBm obteniendo valores de SNR dentro de los límites. La STA mantuvo este valor durante 400 iteraciones, no obstante, algunos valores de SNR generados con esta estrategia estuvieron por debajo del límite inferior de satisfacción, en consecuencia, la STA cambió de estrategia y seleccionó una potencia de 3,64 dBm, con lo cual incrementó los valores de SNR. Durante el resto de la prueba, la STA utilizó valores de potencias de 0,17 dBm y finalmente 2,08 dBm. La variación de la potencia de transmisión seleccionada, se debe a la interferencia generada por las redes WLAN en esta banda, ya que, al existir interferencia los valores de SNR oscilan en un rango amplio y muchos de ellos están fuera de los límites de satisfacción como se muestra en la figura 3.14 b).

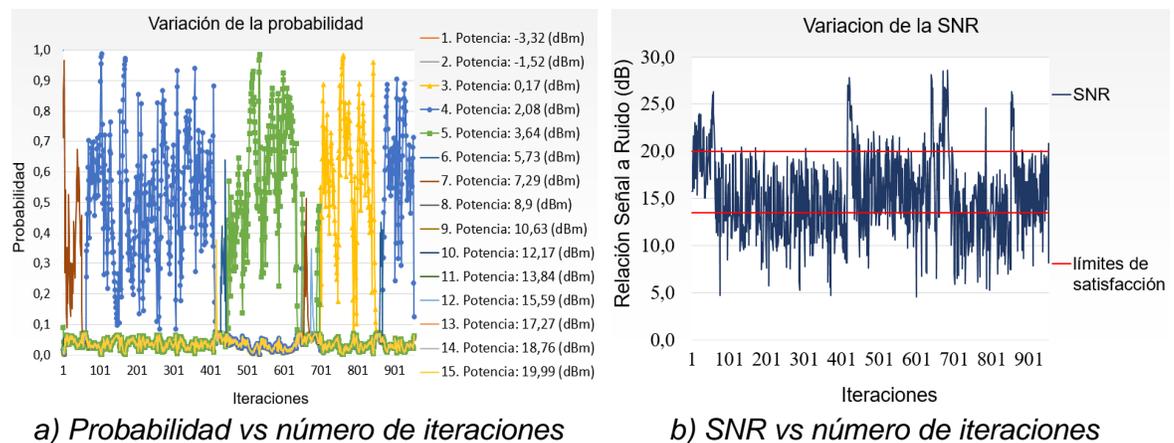


Figura 3.14 Variación de la probabilidad y SNR para la STA ubicada a 5 m del AP.

En la figura 3.15 se compara las gráficas de probabilidad y SNR vs el número de iteraciones del algoritmo para frecuencias de operación en la banda de 2,4 GHz y 5



GHz. Los valores de SNR en la banda de 2,4 GHz presentaron mayor variación en comparación con los valores de SNR en 5 GHz, por eso en bastantes iteraciones, los valores de SNR estuvieron fuera del rango de satisfacción tal como se muestra en la figura 3.15.c), esto exigió ampliar el rango 2 dB más que el rango utilizado en 5 GHz. En cuanto a las figura 3.15.a) y 3.15.b) se aprecia que existe mayor estabilidad del algoritmo en la banda de 5 GHz, ya que como se observa en la figura 3.15.b) se configura una potencia de transmisión y se mantiene a lo largo de la prueba, por el contrario, en la figura 3.15.a) se observa que en la banda de 2,4 GHz el algoritmo cambia en 4 ocasiones la potencia de transmisión. Además, los valores de probabilidad de la estrategia seleccionada son mayores en la banda de 5 GHz, pues el 76,11% de estos valores están por encima de 0,6 y en el caso en 2,4 GHz, solo lo están el 33,93%.

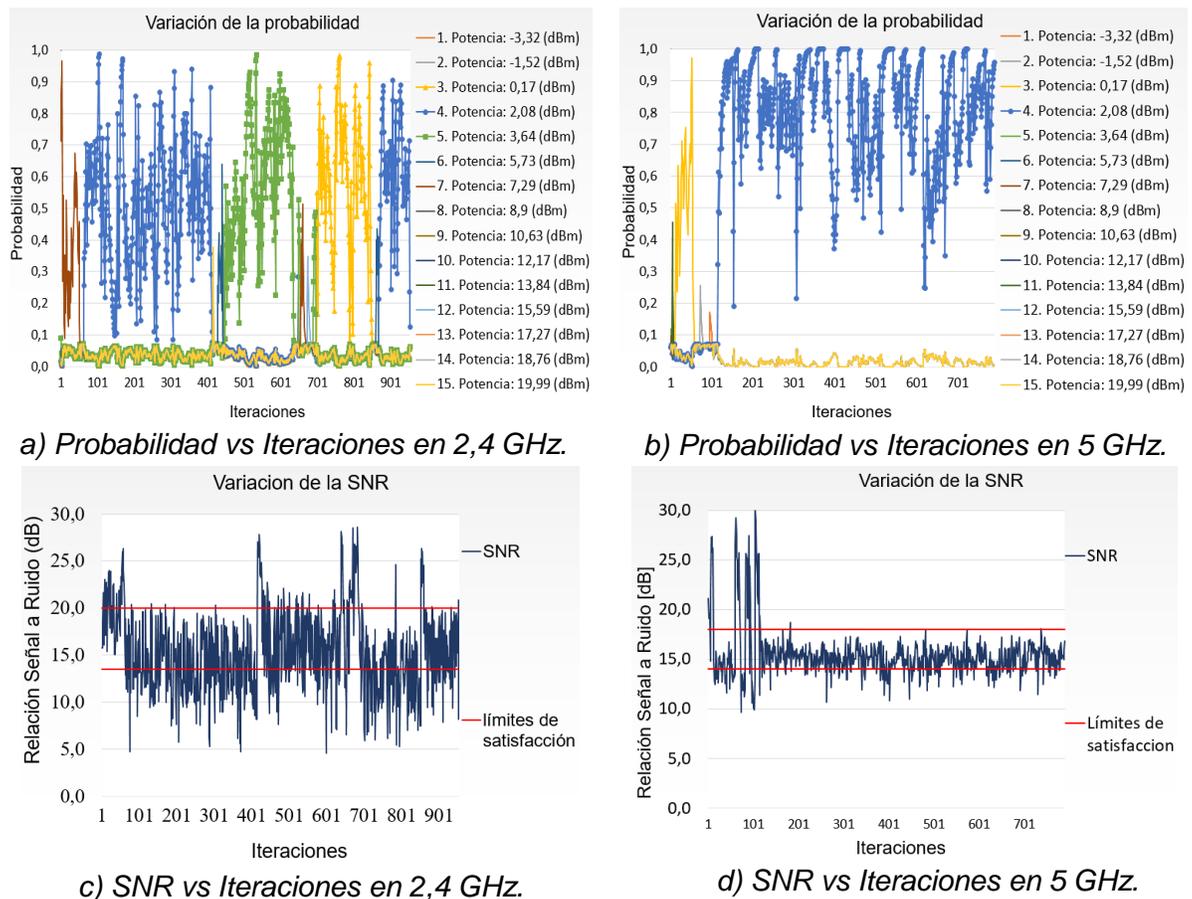


Figura 3.15 Comparación de la variación de Probabilidad y SNR para la STA 1 a una distancia de 5 m en la banda de 5 GHz y 2,4 GHz.



Los resultados obtenidos para las distancias de 10 m, 15 m y 20 m en la banda de 2,4 GHz se presentan en la figura 3.16. Se observa que la elección de la potencia varía para todas las distancias, incrementando como es de esperarse, para distancias mayores. A 10 m la STA selecciona 7,29 dBm y 8,9 dBm a lo largo de la prueba, a 15 m elige 8,9 dBm y 10,63 dBm y a 20 m selecciona 15,44 dBm, 18,61 dBm y 17,12 dBm. Para cada distancia se elige más de una estrategia debido a que los valores de SNR oscilan en un rango grande y muchas veces estos valores están por fuera de los límites establecidos y como la reinicialización periódica de la tasa de aprendizaje hace que el algoritmo reaccione rápidamente a los cambios de SNR, la STA 1 cambia la potencia de transmisión, pero siempre a una potencia cercana.

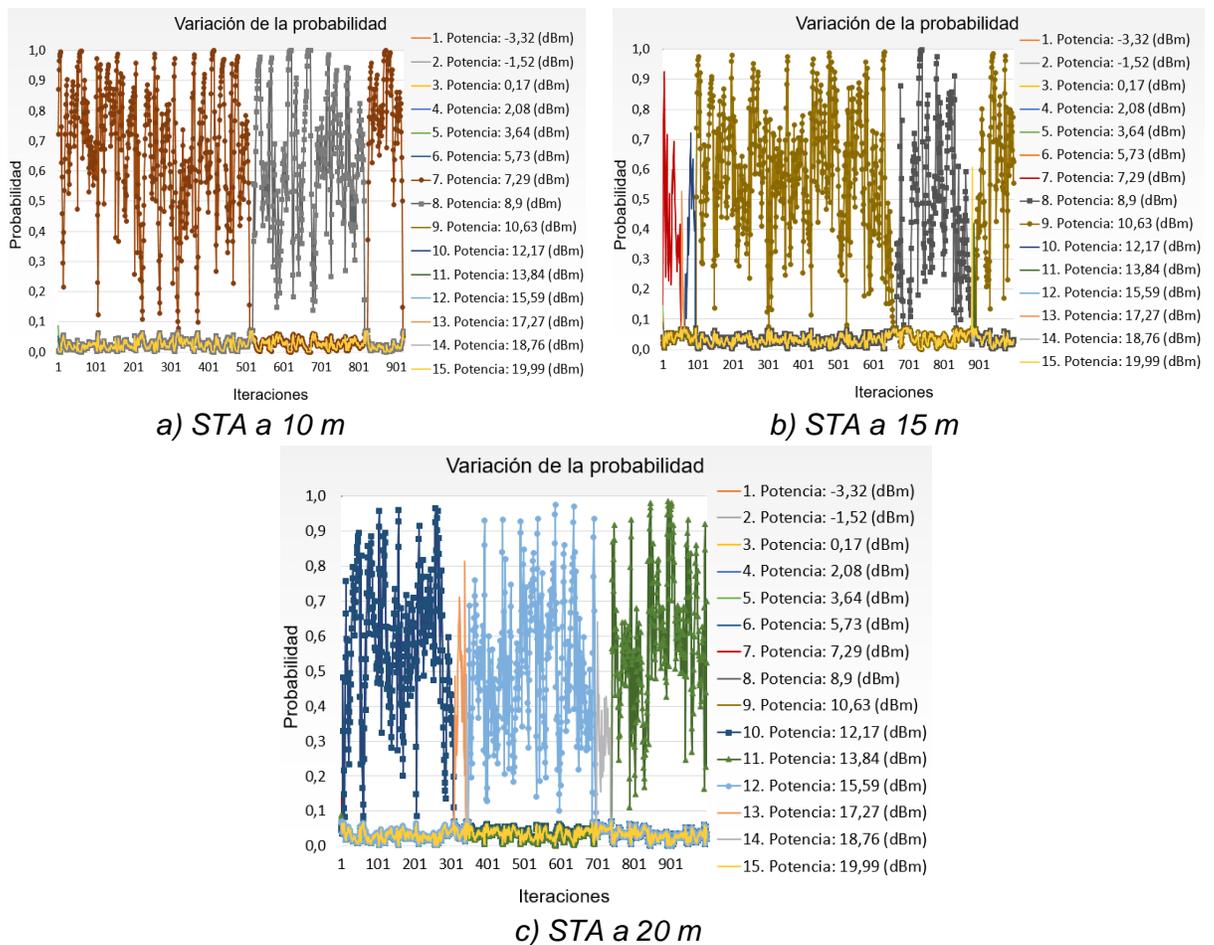


Figura 3.16 Variación de la probabilidad para STA 1 a diferentes distancias.



### 3.3.1.2 STA 1 y STA 2 a distancias iguales

El objetivo de esta prueba es analizar el funcionamiento del algoritmo cuando las dos STAs se ubican a la misma distancia, en este caso se espera que el comportamiento de la SNR sea similar y, por lo tanto, el algoritmo seleccione potencias de transmisión iguales o cercanas la una de la otra. Se ubican las STAs a una distancia de 10 m respecto al AP y se utiliza un canal en la banda de 5 GHz. En la figura 3.17 a) se observa que la STA 1 configuró inicialmente la potencia de 5,73 dBm y luego de 400 iteraciones cambió a 7,29 dBm, valores que corresponden a las estrategias 6 y 7 del perfil de estrategias, respectivamente. En la figura 3.17.b) se observa que la STA 2 eligió la potencia de 7,29 dBm correspondiente a la estrategia 7. Por lo tanto, se comprueba que si las STAs son ubicadas a la misma distancia eligen estrategias iguales o cercanas. La STA 2 realizó una mayor cantidad de iteraciones iniciales para encontrar una estrategia adecuada en comparación con las iteraciones realizadas por la STA 1, esto puede explicarse por la asignación aleatoria inicial de probabilidades. En ambos casos, las STAs después de seleccionar una estrategia, logran obtener valores de SNR dentro de los límites de satisfacción como se muestra en las figuras 3.18.a) y 3.18.b).

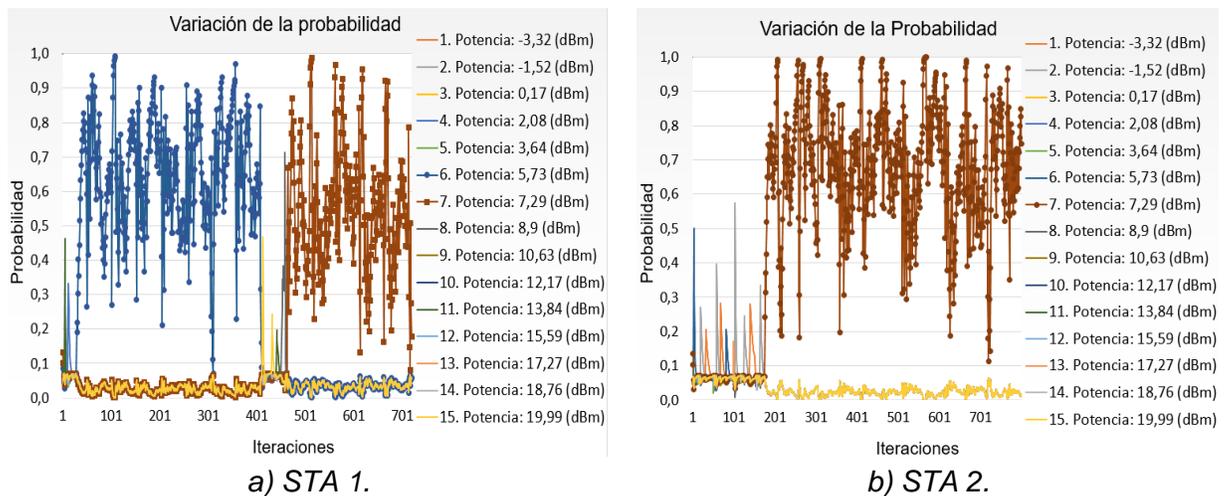


Figura 3.17 Probabilidad vs número de iteraciones para la STA 1 y la STA 2 a distancias iguales.

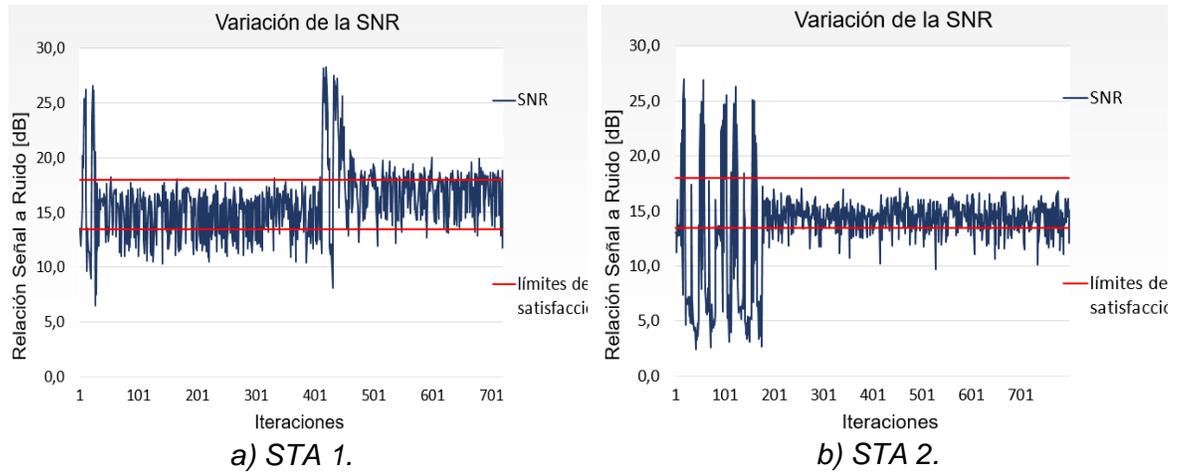


Figura 3.18 SNR vs número de iteraciones para la STA 1 y la STA 2 a distancias iguales.

### 3.3.1.3 STA 1 y STA 2 a distancias diferentes

Similar a la anterior prueba, se pretende analizar funcionamiento del algoritmo cuando las STAs se ubican a distancias diferentes respecto al AP. Para ello, se ubicó la STA 1 a una distancia de 5 m y la STA 2 a una distancia de 15 m. Las figuras 3.19.a) y 3.19.b) presentan las gráficas de probabilidad vs número de iteraciones para cada STA.

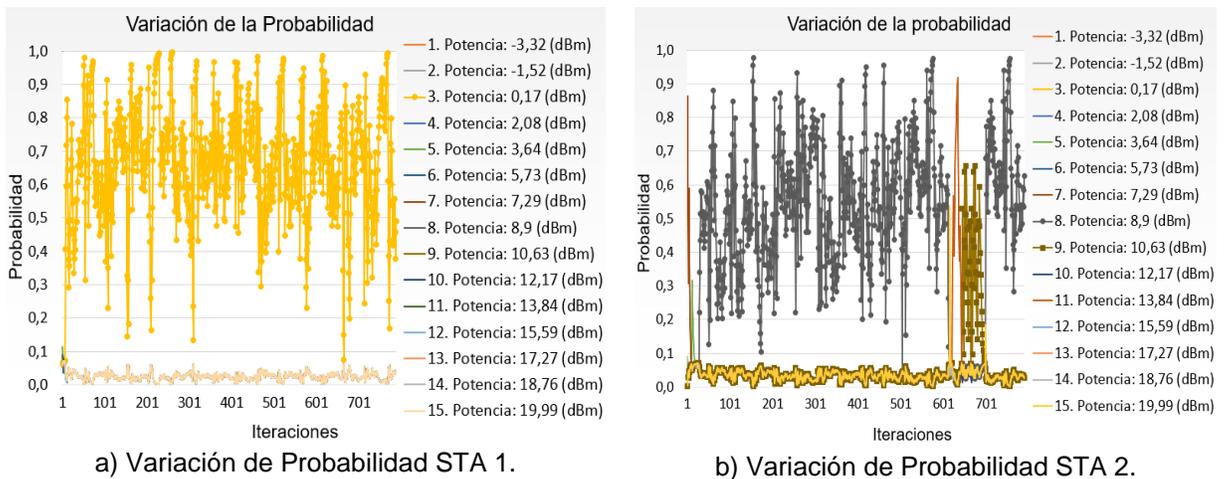


Figura 3.19 Probabilidad vs número de iteraciones para la STA 1 y la STA 2 a diferentes distancias.



Se evidencia que la STA ubicada a 5 m elige una potencia de transmisión de 0,17 dBm y la STA ubicada a 15 metros elige una potencia de 8,9 dBm correspondiente a las estrategias 3 y 8, respectivamente. Por lo tanto, se comprueba que las STAs utilizan valores de potencia bajos cuando están más cerca del AP, mientras que las STAs ubicadas a distancias más grandes emplean valores de potencia de transmisión más altos. Este comportamiento ayuda a reducir la cantidad de energía consumida por cada STA y aunque no es evidente, se reduce también la interferencia.

### 3.3.2 Caso 2: STA1 con movilidad, STA 2 estática

El objetivo de esta prueba es evidenciar el cambio dinámico de la potencia de transmisión para la STA 1 ubicada a diferentes distancias mientras la STA 2 se mantiene fija a una distancia de 10 m del AP en la banda de 5 GHz. La STA 1 se mueve en pasos de 4 m cada 200 iteraciones iniciando en 4 m y terminando en 20 m. La figura 3.20 presenta la variación de la probabilidad respecto al número de iteraciones del algoritmo para la STA 1 y se aprecia que el algoritmo utiliza las potencias de transmisión de 0,17 dBm, 7,29 dBm, 10,63 dBm, 13,84 dBm y 17,27 dBm para las distancias de 4 m, 8 m, 12 m, 16 m y 20 m, respectivamente. Estos valores de potencia también tienen un comportamiento creciente a medida que incrementa la distancia entre el AP y la STA, pero en este caso son un poco mayores en comparación con el escenario de interiores, ya que la presencia de la STA 2 aumenta el piso de ruido y por lo tanto la SNR disminuye.

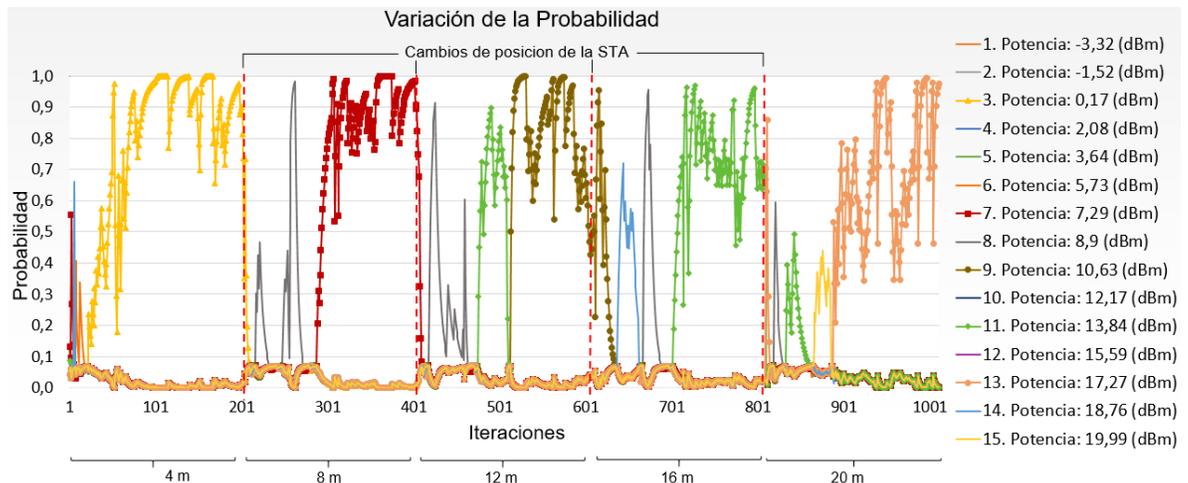


Figura 3.20 Variación de la probabilidad de potencia para STA 1.



Se observa que cada cambio de posición obliga a la STA 1 a cambiar de estrategia, y para eso, la STA 1 prueba distintas potencias de transmisión hasta encontrar la más adecuada. Este comportamiento genera cambios bruscos en el comportamiento de la SNR como se observa en la figura 3.21, sin embargo, el algoritmo luego de un número determinado de iteraciones estabiliza la SNR dentro del rango de satisfacción. En un escenario exterior la SNR experimenta menor variación con respecto al escenario interior, por esta razón, el rango de satisfacción puede ser más pequeño, permitiendo un mejor funcionamiento del algoritmo en condiciones de movilidad.

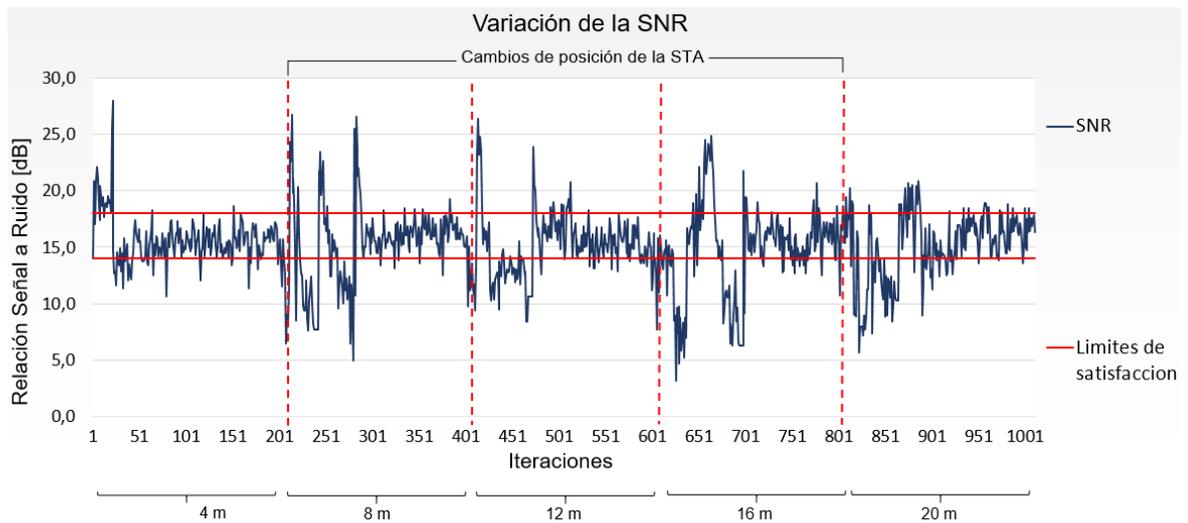


Figura 3.21 Variación de la SNR para STA 1.

Similar a la prueba anterior, se realizó una prueba considerando movilidad de la STA 1 respecto al AP, esta vez en la banda de 2,4 GHz. Las figuras 3.22 y 3.23 presentan las gráficas de probabilidad y SNR vs número de iteraciones. En ellas se evidencia que a medida que la STA 1 se aleja del AP, la STA busca y selecciona una potencia mayor a la anterior. Los valores de probabilidad de la estrategia presentan gran variación y no se estabilizan en valores cercanos a 1 como pasaba en la prueba anterior, esto como consecuencia de la variación de la SNR generada por la interferencia, a pesar de que el rango de satisfacción se haya ampliado. Aún en presencia de interferencia, el algoritmo funciona de manera adecuada eligiendo potencias que mantienen la mayoría de valores de SNR dentro de los límites de satisfacción como se observa en la figura 3.23. De igual manera se aprecian valores de SNR muy por fuera del rango impuesto en momentos en los cuales el algoritmo prueba con diferentes potencias antes de elegir la más adecuada.

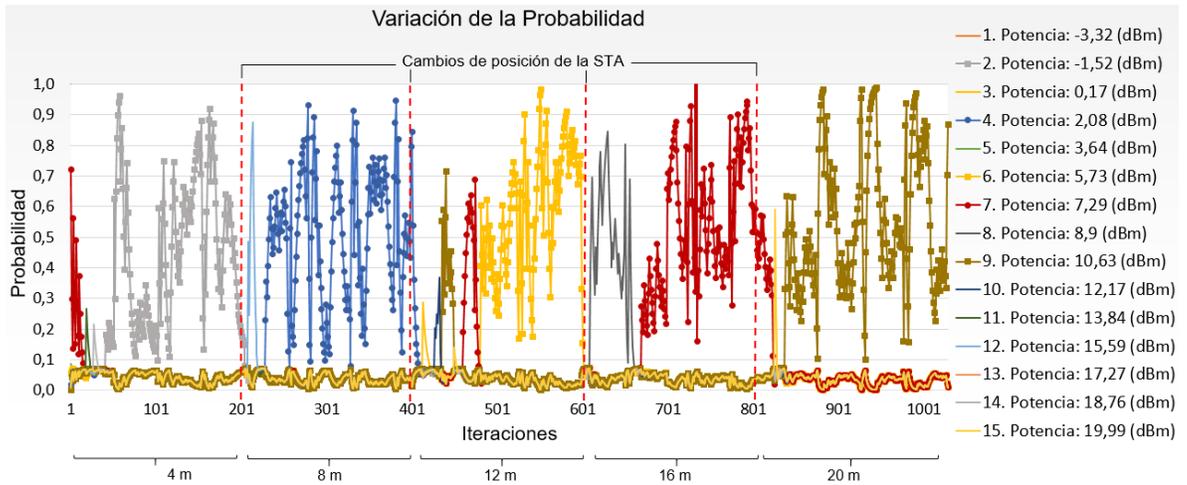


Figura 3.22 Variación de la probabilidad de potencia para STA 1 con movilidad.

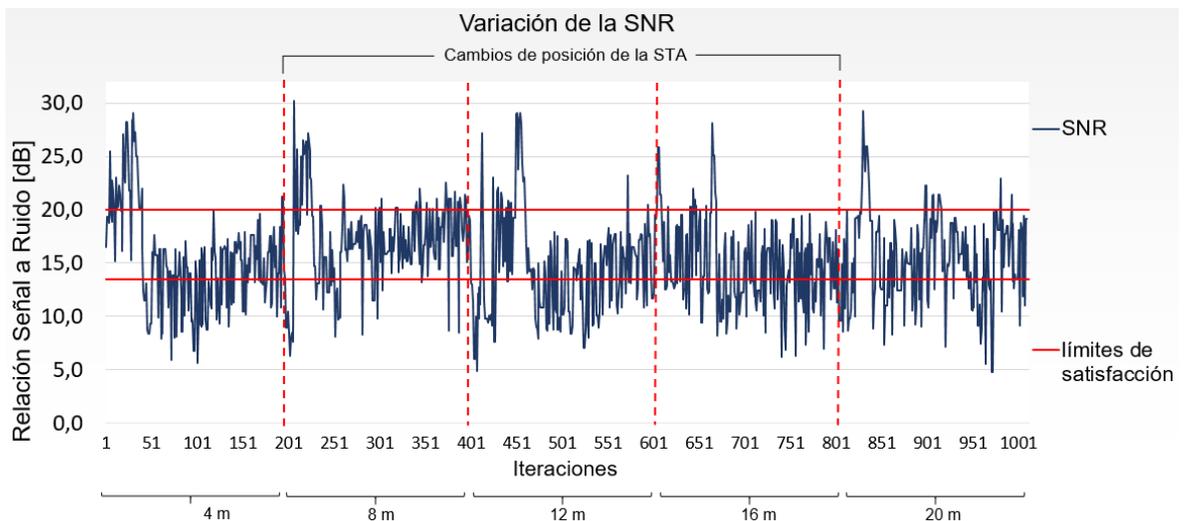


Figura 3.23 Variación de la SNR para STA 1 con movilidad.

### 3.3.3. Caso 3: Con interferencia generada por el inhibidor de señal

Con el propósito de verificar el funcionamiento del algoritmo con una fuente de interferencia permanente, se utilizó un inhibidor de señal configurado para trabajar en la banda de 2,4 GHz y se realizó la siguiente prueba: inicialmente se situó la STA a 8 m del AP y el inhibidor de señal se ubicó a 30 m, formando una perpendicular con la línea que une el AP y la STA. Se inició la transmisión de información entre el AP y la STA con el inhibidor apagado, en la figura 3.24.a) se observa que la STA configura la potencia de transmisión de 7,29 dBm y al cabo de pocas iteraciones cambia la potencia a 5,73 dBm con la cual obtiene valores de SNR dentro de los



límites de satisfacción. Transcurridas 400 iteraciones, se encendió el inhibidor de señal generando la disminución de la SNR mostrada en la figura 3.24.b), razón por la cual el algoritmo disminuye la probabilidad de la estrategia que había seleccionado y configura una potencia de 10,63 dBm con la cual no alcanza el umbral mínimo de satisfacción, por eso, elige finalmente la potencia de 13,84 dBm que permite alcanzar valores de SNR nuevamente dentro del rango de satisfacción.

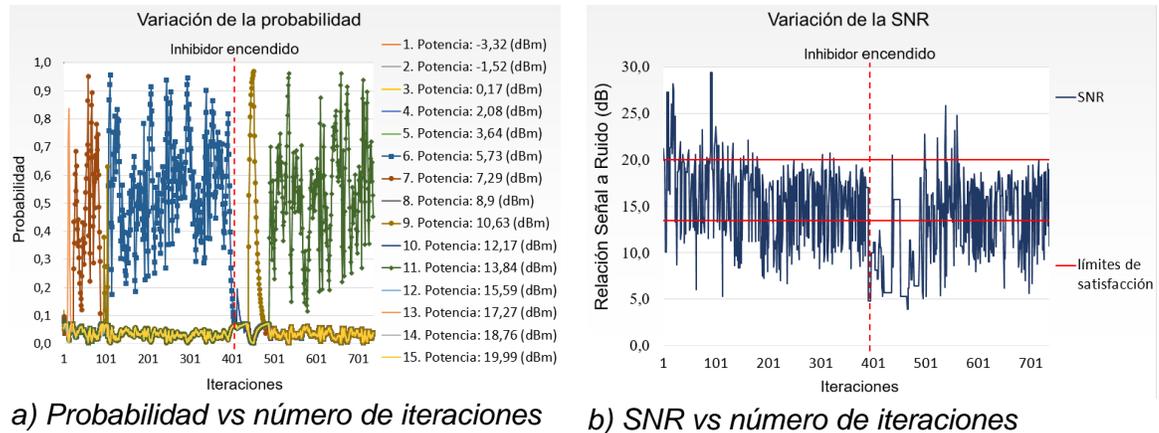


Figura 3.24 Variación de la probabilidad y SNR para la STA con interferencia del inhibidor de señal.

El inhibidor de señal genera una disminución notable de la SNR ya que incrementa en gran cantidad el piso de ruido, sin embargo, el algoritmo reacciona a este cambio brusco, incrementando la potencia de transmisión para contrarrestar la disminución de la SNR hasta lograr estabilizarla. Cabe resaltar que la potencia del inhibidor de señal es muy alta, por tal razón, debe estar a una distancia significativa para que no anule totalmente las otras señales.

- **Comparación con escenarios sin control de potencia.**

Las siguientes pruebas se realizaron con el fin de comparar la incidencia del algoritmo sobre la red. Se utilizó la banda de 5 GHz, ya que en 2,4 GHz los datos obtenidos tuvieron un comportamiento muy variable por efectos de la interferencia en esta banda, por lo que los datos no mostraron resultados significativos.

**a) Análisis del ahorro de energía**

En esta prueba se comparó la energía consumida por una STA que implementa el algoritmo de PC y la energía consumida por la misma STA sin implementar el algoritmo. Para ello, se emplearon los escenarios mostrados en la figura 3.12. Se ubica la STA 2 a una distancia de 10 m respecto al AP a fin de que sea una fuente



de interferencia y la STA 1 se ubica a diferentes distancias desde 1 m hasta 25 m, rango de distancias en el cual el algoritmo funciona correctamente con todos los valores de potencia del perfil de estrategias. Para el caso sin control de potencia, se configura la STA 1 con la potencia de transmisión de 19,99 dBm, siendo este el valor normalmente utilizado por las STAs en WLAN.

La figura 3.25 muestra la potencia de transmisión utilizada por la STA 1 a diferentes distancias sin control de potencia y con control de potencia en escenarios de interiores y exteriores. La línea amarilla ubicada en 19,99 dBm describe el comportamiento de la potencia de transmisión cuando el control de potencia está inactivo, este valor es independiente de la distancia entre la STA 1 y el AP. Las otras dos líneas en la figura 3.25 describen la variación de la potencia de transmisión para los escenarios de interiores y exteriores respecto a la distancia entre la STA 1 y el AP. En cada punto y para ambos escenarios, el control de potencia permite a la STA 1 hacer uso de valores de potencia de transmisión inferiores a 19,99 dBm. Para cada valor de distancia se calcula un porcentaje de ahorro de energía. En el apéndice D se muestran estos porcentajes y el procedimiento seguido para su obtención y en la figura 3.26 se presenta una comparación entre los porcentajes en interiores y exteriores.

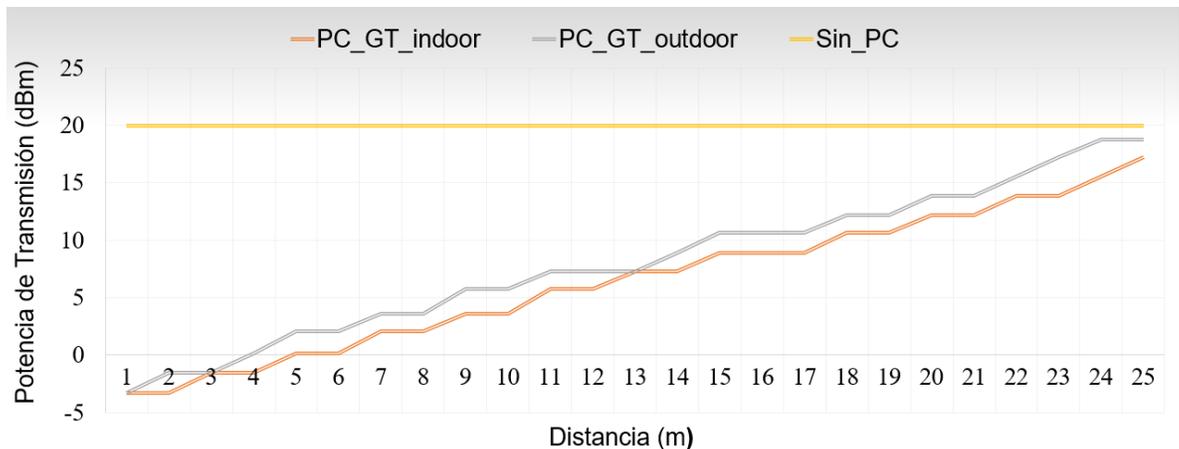


Figura 3.25 Potencia de transmisión vs distancia para escenarios interiores y exteriores.

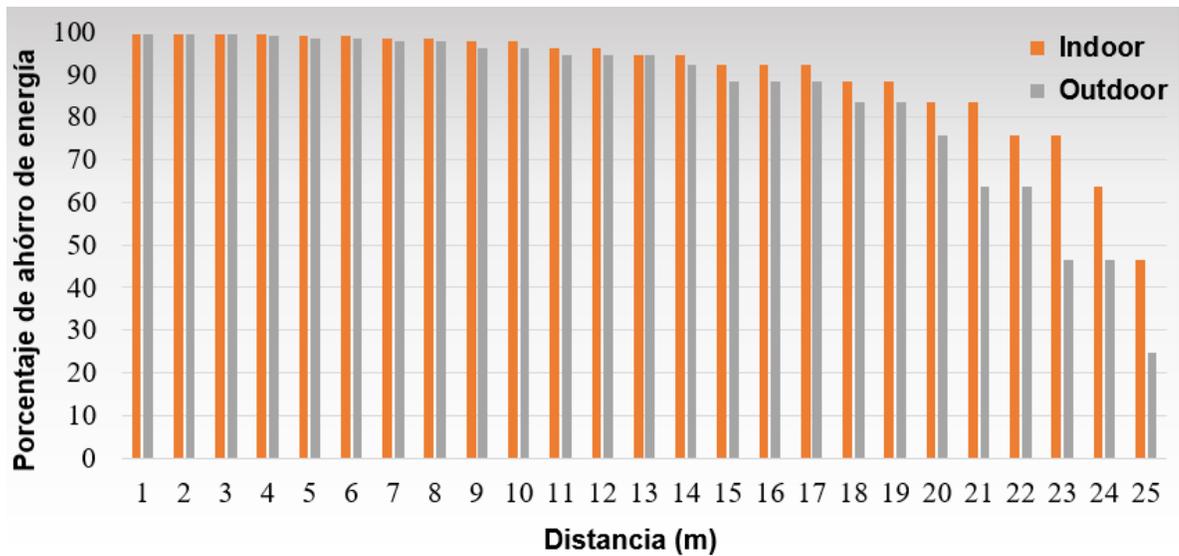


Figura 3.26 Ahorro de energía para escenarios interiores y exteriores.

Se observa un ahorro de energía significativo para todas las distancias, en especial para distancias cortas. La mayor distancia alcanzada, a la cual el algoritmo funciona de manera adecuada con todos los valores de potencia del perfil de estrategias fue 25 m, para esta distancia, el ahorro en el caso del escenario en interiores fue de 46,54% y en exteriores del 24,66% y para la distancia menor en la prueba, el ahorro en ambos escenarios fue del 99,53%. El ahorro de energía en el escenario de interiores es mayor en comparación con el escenario de exteriores, esto se debe a que en *interiores* existe menos dispersión de las señales, ya que algunas de ellas llegan al receptor por efecto del multitrayecto, estas pueden interferir constructivamente entre sí para reafirmar el nivel de señal en recepción. En el escenario de exteriores, las señales que llegan al receptor son las que tienen línea de vista directa con el mismo, las demás señales se dispersan por el espacio y terminan perdiéndose.

En las figuras 3.27 y 3.28 se presentan las gráficas de SNR vs número de iteraciones para la STA 1, sin control de potencia y con control de potencia, respectivamente, a distancias de 5 m, 10 m, 15 m y 20 m. Cuando no se aplica control de potencia el comportamiento de la SNR tiende a ser decreciente a medida que incrementa la distancia, como es de esperarse a causa de las pérdidas que experimenta la señal. En el caso con control de potencia, los valores de SNR se mantienen dentro del rango de satisfacción a pesar de las variaciones de distancia entre la STA 1 y el AP.

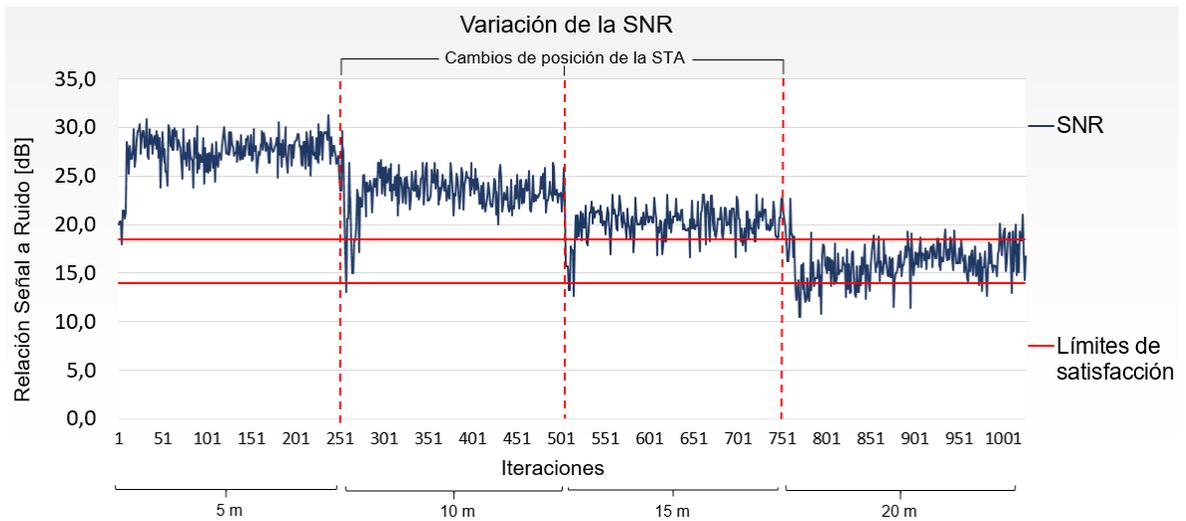


Figura 3.27 Variación de la SNR considerando movilidad de la STA sin control de potencia.

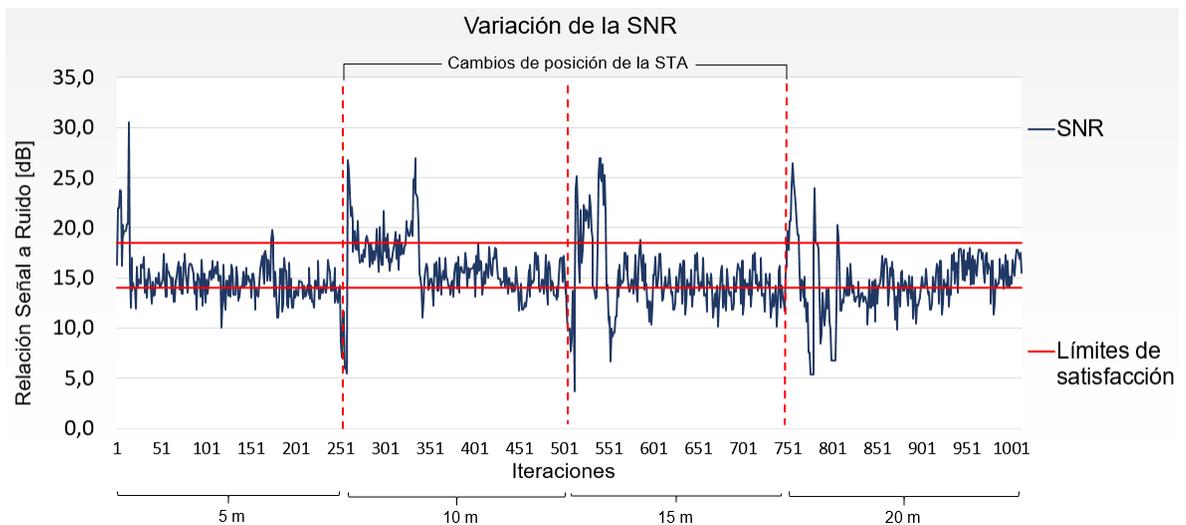


Figura 3.28 Variación de la SNR considerando movilidad de la STA con control de potencia.

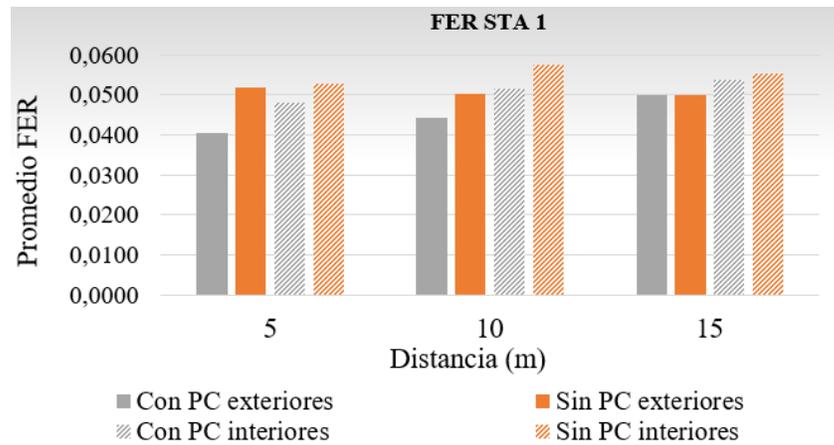
### b) Análisis de la FER

Para analizar la incidencia del algoritmo de control de potencia en la cantidad de tramas recibidas con éxito, se realizaron pruebas ubicando las STAs a igual distancia respecto al AP y se guardaron los valores de FER en el enlace ascendente para cada STA con el algoritmo activado y desactivado, para los escenarios de interiores y exteriores. Para cada STA y para las distancias de 5 m, 10 m y 15 m se tomaron 5 valores de FER durante 1000 tramas enviadas. Los

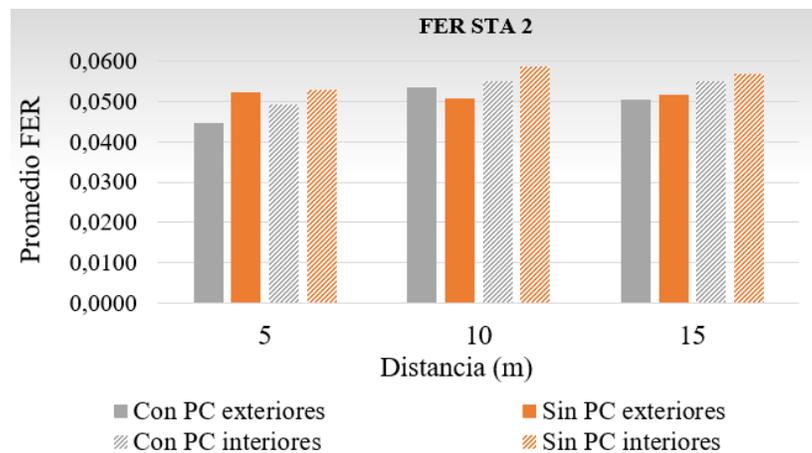


resultados se presentan en las tablas E.1 y E.2 del apéndice E, el promedio estadístico de los datos se presenta en la figura 3.29, en la cual se observa que la FER obtenida disminuye cuando las STAs utilizan el algoritmo de control de potencia y lo hace en mayor proporción para distancias cortas, esto se debe a que una STA sin control de potencia, utiliza una potencia de transmisión grande y por lo tanto su zona de cobertura es mucho mayor que la de una STA con control de potencia. Cuando las zonas de cobertura son mayores, hay solapamiento y por lo tanto se generan señales interferentes con niveles de potencia altos. El algoritmo reduce la potencia hasta un nivel adecuado, en el cual las dos STAs alcanzan valores de SNR dentro del rango de satisfacción. De esta forma, las zonas de cobertura son más pequeñas, se disminuye la interferencia y por ende se reduce la cantidad de tramas perdidas. Para distancias largas, los valores de FER son similares tanto con control de potencia como sin control de potencia, ya que el algoritmo elige potencias altas, similares a la potencia de transmisión que utilizan las STAs sin el algoritmo.

Experimentalmente se observó que la mayoría de las tramas perdidas ocurrieron antes de que el algoritmo se estabilice en una potencia, pues la STA prueba diferentes estrategias hasta encontrar la más adecuada, algunas de estas estrategias producen SNR muy bajas, impidiendo la correcta identificación del símbolo transmitido, por esta razón, cuando el algoritmo tarda más tiempo en estabilizarse, la FER aumenta. Este es el caso de la FER de la STA 2 en la prueba 2 de la tabla E.2 del Apéndice E, en la cual se obtuvo un valor de 0,075, siendo este un valor mucho mayor en comparación con los obtenidos en las demás pruebas. Sin embargo, este es un caso muy particular y no ocurre con mucha frecuencia. En condiciones de movilidad, la cantidad de tramas perdidas será mayor, debido a la búsqueda constante de estrategias para seleccionar una potencia adecuada. Se aprecia también, que los valores de FER en el escenario de interiores son mayores en comparación con los del escenario de exteriores, esto se debe a que, en interiores, los valores de SNR son más variables, por lo que las STAs se ven obligadas a cambiar de estrategias constantemente y por lo tanto hay más tramas pérdidas durante la estabilización del algoritmo.



a) STA 1.



b) STA 2

Figura 3.29 FER obtenida por las dos STAs con PC y sin PC en interiores y exteriores.

Una STA sin control de potencia transmite la información con una potencia de 19,99 dBm, esta potencia genera valores altos de SNR y por ende valores de FER bajos en comparación a una STA que transmite con una potencia menor. Sin embargo, con más de una STA, los problemas de interferencia son evidentes. Por el contrario, cuando las STAs implementan control de potencia, la SNR disminuye, pero esa disminución se ve compensada por la reducción de la interferencia, obteniendo valores de FER menores en comparación a las STAs que no utilizan control de potencia.



### c) Análisis de throughput

Considerando que la cantidad de tramas perdidas por cada STA afecta la velocidad de transmisión real de la red, es posible relacionar la FER y el *throughput* para cada STA usando la relación entre la BER y la FER que se muestra en la ecuación 3.1 [70], [71].

$$FER = 1 - (1 - BER)^N \quad (3.1)$$

A partir de la ecuación 3.1 se obtiene la ecuación 3.2, este valor de BER es remplazado en la ecuación de 3.3, la cual relaciona el *throughput* con la BER.

$$BER = 1 - 10^{\frac{\text{Log}(1-FER)}{N}} \quad (3.2)$$

$$\text{Throughput} = R(1 - BER) \text{ [Mbps]} \quad (3.3)$$

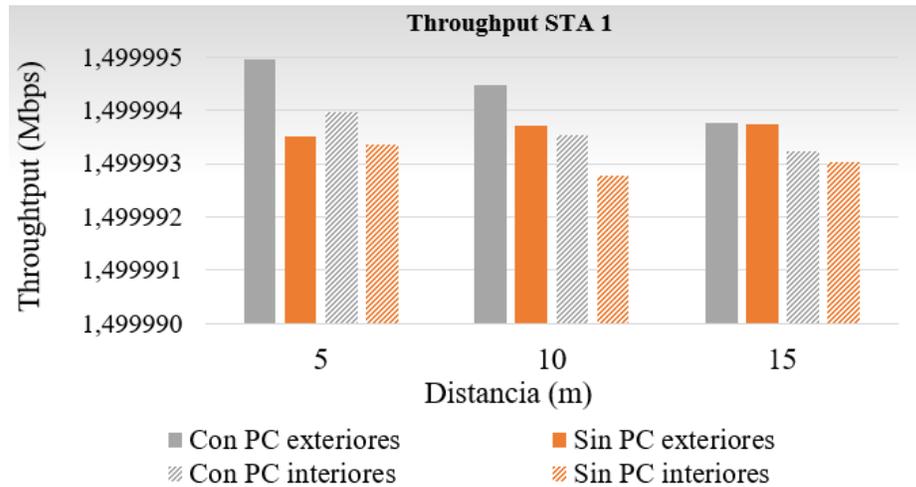
En la ecuación 3.2, N representa el tamaño de la trama en bits y en la ecuación 3.3, R representa la velocidad de transmisión de datos para un Esquema de Codificación y Modulación (MCS, *Modulation and Coding Scheme*) específico, para este caso se utiliza el MCS 0, el cual utiliza modulación BPSK con una tasa de codificación de ½.

La velocidad de transmisión de datos del MCS 0 para el estándar 802.11a/g es de 6 Mbps, sin embargo, la implementación realizada no permite enviar datos a esa velocidad, debido a que las tramas en el estándar IEEE 802.11 se envían a intervalos en el orden de los microsegundos y en la implementación se envían tramas a intervalos del orden de los milisegundos, por lo tanto, no es posible alcanzar la velocidad del MCS 0 aunque se utilice el mencionado MCS. No obstante, los cálculos de *throughput* se hicieron considerando la velocidad máxima de transmisión del MCS 0 a fin de hacer una proyección del *throughput* real que podría obtenerse en una red WLAN que implemente el algoritmo de control de potencia. Los 6 Mbps de velocidad de transmisión de datos comparten para las dos STAs y para los enlaces ascendente y descendente, por lo tanto, la velocidad de transmisión de datos máxima para cada STA no es superior a 1,5 Mbps

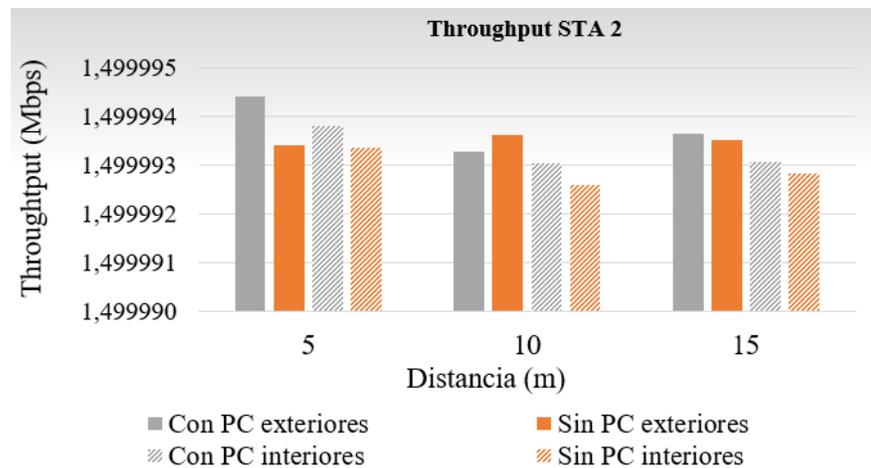
La figura 3.30 muestra el *throughput* para la STA 1 y la STA 2 generado a partir de la ecuación 3.3 y de los datos de FER obtenidos. Se observa que el *throughput* de las STAs mejora al incluir el algoritmo cuando las STAs están cerca del AP y es similar cuando las STAs se ubican a distancias un poco mayores, esto se debe al incremento de la FER por efectos de interferencia cuando las STAs están cerca y



no incluyen el control de potencia. Cuando se activa el algoritmo, el *throughput* mejora relativamente ya que la interferencia disminuye al utilizar niveles de potencia menores. Para la distancia de 10 m, la STA 2 tiene menor *throughput* cuando utiliza el algoritmo, esto nuevamente se debe al incremento en el tiempo de estabilización del algoritmo esta prueba.



a) STA 1



b) STA 2

Figura 3.30 *Throughput* alcanzado por las dos STAs considerando el MCS 0, con control de potencia y sin control de potencia en interiores y exteriores.



## 4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 4.1. CONCLUSIONES

#### 4.1.1 Conclusiones de la revisión bibliográfica y del estado del arte

- La teoría de juegos es una herramienta matemática adecuada para asignar eficientemente los recursos radio en comunicaciones inalámbricas. Las investigaciones de teoría de juegos en WLAN presentan resultados favorables en cuanto a reducción de interferencia, reusó de frecuencias, velocidad de la red y reducción del consumo de energía.
- Las investigaciones de control de potencia basadas en teoría de juegos en WLAN carecen de enfoques en escenarios reales que validen los resultados obtenidos a nivel teórico y de simulación. Esta carencia se debe a la complejidad que implica la modificación del hardware y software para incluir los algoritmos.

#### 4.1.2 Conclusiones de la fase de implementación

- Las implementaciones SDR facilitan el control, medición y reconfiguración de los parámetros de un sistema de comunicaciones, ya que la mayoría de las funciones se desarrollan a nivel de software por medio de rutinas de programación.
- GNU Radio facilita el desarrollo de implementaciones SDR, ya que, al tratarse de una plataforma de software libre, da acceso a todo el código fuente para que pueda ser modificado.
- Las implementaciones SDR requieren de equipos de cómputo con buenas características de procesamiento y memoria RAM para que las señales sean procesadas correctamente y el hardware del computador no afecte el desempeño de la implementación.

#### 4.1.3 Conclusiones de la fase de evaluación y análisis

- La implementación del algoritmo permitió determinar que la técnica de aprendizaje reforzado utilizada en [22], [27] y [35] no es eficiente en condiciones de movilidad de las STAs. La reinicialización periódica de la tasa de aprendizaje garantiza que el algoritmo adecue la potencia de transmisión



rápidamente en condiciones de movilidad y que las STAs se adapten a los cambios del escenario.

- El algoritmo de PC basado en GT reduce notablemente la energía consumida por las STAs, evitando un gasto innecesario de potencia. En un escenario de interiores, el ahorro de energía es aún más significativo en comparación con un escenario de exteriores.
- El algoritmo de PC basado en GT logra minimizar la FER experimentada por cada STA, siendo más significativa la disminución para distancias cortas entre el AP y la STA. Además, la FER en esta implementación, depende de la cantidad de iteraciones que el algoritmo realice hasta seleccionar una potencia que logre estabilizar su valor de SNR dentro del rango de satisfacción.
- La FER en escenarios interiores es mayor en comparación con escenarios exteriores y esto se debe a que en interiores la SNR presenta mayor variación por lo que las STAs se ven obligadas a cambiar de estrategias constantemente y en ese cambio de estrategias hay un mayor número de tramas perdidas.
- El *throughput* generado a partir de la FER experimentada por cada STA, incrementa cuando se implementa el algoritmo de PC basado en GT, sin embargo, en esta implementación no es posible enviar datos a la velocidad de 6 Mbps que utiliza el estándar con el MCS 0 ya que, las tramas se envían a intervalos del orden de los microsegundos y en el estándar IEEE 802.11 se envían a intervalos de los milisegundos.
- La implementación del algoritmo requirió la transmisión de parámetros adicionales a los que se intercambian regularmente entre dispositivos WLAN, sin embargo, las modificaciones realizadas a la trama no son invasivas sobre el estándar.

## 4.2. TRABAJOS FUTUROS

Los resultados del presente trabajo de grado sirven de referencia para trabajos futuros, que busquen implementar algoritmos de control de potencia más completos o utilizar la teoría de juegos como herramienta para modelar la RRM. Para ello se proponen los siguientes trabajos futuros:



- Implementar el algoritmo de control de potencia basado en teoría de juegos en dispositivos WLAN comerciales (APs, computadores portátiles y celulares) mediante la modificación del firmware de los mismos.
- Añadir al sistema, el mecanismo de acceso al medio CSMA/CA utilizando USRPs con capacidad de embeber la configuración software en la FPGA, a fin de reducir el tiempo de procesamiento de la información hasta obtener tiempos del orden de los microsegundos, los cuales son utilizados en el estándar 802.11.
- Implementar el algoritmo de control de potencia en LabView Communications y/o Matlab para realizar una comparación entre herramientas, analizando parámetros como tiempo de procesamiento, tiempo de desarrollo, potencia de transmisión, entre otros.
- Implementar el algoritmo de control de potencia en el enlace descendente y analizar su capacidad de mitigar la interferencia entre APs.
- Implementar técnicas de RRM presentes en las redes de comunicaciones diferentes al control de potencia como mecanismos de contienda, asignación de canal radio, control de velocidad, enrutamiento, que permitan evidenciar los beneficios de aplicar teoría de juegos en las telecomunicaciones.
- Crear bloques específicos para emplear las técnicas de espectro ensanchado en GNU Radio y adicionarlos a la implementación del algoritmo, para comparar estas técnicas con OFDM.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. Huehn and C. Sengul, "Practical power and rate control for WiFi," *21st Int. Conf. Comput. Commun. Networks, ICCCN*, 2012.
- [2] S. K. Suman, D. Kumar, and L. Bhagyalakshmi, "SINR pricing in non cooperative power control game for wireless ad hoc networks," *KSII Trans. Internet Inf. Syst.*, vol. 8, no. 7, pp. 2281–2301, 2014.
- [3] S. Kim, "Adaptive online power control scheme based on the evolutionary game theory," *IET Commun.*, vol. 5, no. 18, pp. 2648–2655, 2011.
- [4] V. M. Quintero, "Evaluación del desempeño de sistemas de comunicación móvil celular de tercera generación -WCDMA," 2010.
- [5] I. Wang-Hei and L. Chang, "Impact of power control on performance of IEEE 802.11 wireless networks," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 6, no. 11, pp. 1245–1258, 2007.
- [6] C. Chang and H. Chang, "Power control and fairness MAC mechanisms for 802.11 WLANs," *Comput. Commun.*, vol. 30, no. 7, pp. 1527–1537, 2007.
- [7] D. Qiao, S. Choi, and K. G. Shin, "Interference analysis and transmit power control in IEEE 802.11a/h wireless LANs," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 15, no. 5, pp. 1007–1020, 2007.
- [8] D. B. Smith, M. Portmann, W. L. Tan, and W. Tushar, "Multi-source-destination distributed wireless networks: Pareto-efficient dynamic power control game with rapid convergence," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 6, pp. 2744–2754, 2014.
- [9] Z. Cheng, X. Zhou, Y. Ding, and X. Miao, "A Cooperative Differential Game of Transmission Power Control in Wireless Networks," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 72, no. 4, pp. 2015–2027, 2013.
- [10] L. Chen and J. Leneutre, "A Game Theoretic Framework of Distributed Power and Rate Control in IEEE 802.11 WLANs," *Sel. Areas Commun. IEEE J.*, vol. 26, no. 7, pp. 1128–1137, 2008.
- [11] D. Hucaby, *CCNA Wireless 640-722 Official Cert Guide*. 2014.
- [12] F. Garcia and V. Quilez, "IEEE 802.11(Wi-Fi) El estándar de facto para WLAN," pp. 28–33, 2011.
- [13] F. Simo, J. Pascual, and A. Martinez, "Modelado y optimización de IEEE 802.11 para su aplicación en el despliegue de redes extensas en zonas rurales aisladas de países en desarrollo," p. 238, 2007.
- [14] C. Moses and J. Jacksonville, "United States Patent Sorrells. Date of Patent : Unified Downconverting and Dignal," vol. 1, no. 12, 2006.



- [15] J. Torres and J. Yunquera, “Diseño de una red Wi-Fi para la E.S.I,” 2008.
- [16] F. López Ortiz, “El estándar IEEE 802.11 Wireless LAN.”
- [17] IEEE, “International Standar ISO / IEC / IEEE Telecommunications and information,” vol. 2012, 2012.
- [18] S. El, E. Ieee, M. Oliver, and A. Escudero, “Redes de Area Local Inalambrica segun el estandar IEEE 802.11,” pp. 19–24, 1997.
- [19] Cisco Systems and Cisco Networking Academy Program, “Fundamentals of Wireless LANs Companion Guide,” 2004.
- [20] Escudero Pascual Alberto, “Redes de Area Local Inalambrica segun el estandar IEEE 802.11,” pp. 1–22, 2007.
- [21] P. Nicopolitidis, M. Obaidat, G. Papadimitriou, and A. Pomportsis, “Wireless Communications Principles and Fundamentals 2.1,” 2003.
- [22] M. Chiang, P. Hande, T. Lan, and C. W. Tan, “Power Control in Wireless Cellular Networks,” *Found. Trends® Netw.*, vol. 2, no. 4, pp. 381–533, 2007.
- [23] J. Romero and M. Jerez, “Efecto del Control rapido de potencia en sistemas de comunicaciones moviles celulares CDMA,” 2010.
- [24] D. Rodríguez, *Sistemas inalabricos de comunicacion personal*. MADRID, 2002.
- [25] A. Cerón and D. Rosero, “Incidencia de un algoritmo de control de potencia en la capacidad de una red heterogenea.,” Universidad del cauca, Popayan, 2016.
- [26] M. J. Osborne and M. J. Osborne, “An Introduction to Game Theory by Please send comments to Department of Economics This version :,” 2000.
- [27] S. L. Hamidou Tembine, “A very short tour of Game Theory,” in *Game Theory and Learning for Wireless Network, Fundamentals and Applications*, Oxford: Academic Press, 2011, pp. 3–40.
- [28] A. J. Vera LOpez, “Metodos de asignacion dinamica de intervalos de tiempo para redes de comunicaiones tacticas militares.” 2006.
- [29] G. Romp, *Game Theory, Introduction and Applications*. New York: Oxford University Press Inc, 1997.
- [30] C. Lopez de la Torre, “Aplicación de la teoría de juegos en el balanceo de carga y asignación de precios en redes de acceso heterogéneas,” 2013.
- [31] V. Mirama and V. Quintero, “Control de potencia basado en teoría de juegos en sistemas de comunicaciones inalámbricas,” *Gerenc. Tecnol. Inform.*, vol. 15, pp. 69–78, 2016.



- [32] J. Mamian and J. Rodriguez, “Modelo para el proceso de eleccion de tiempo de back-off en CSMA basado en teoria de juegos para redes VANET,” 2014.
- [33] C. Narvaez and J. Teran, “Análisis del throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos.” 2016.
- [34] I. Sanchez Cuenca, “Teoria de Juegos.” 2009.
- [35] A. Condon, “The Complexity of Stochastic Games,” *Inf. Comput.*, vol. 96, no. 2, pp. 203–224, 1992.
- [36] A. B. Mackenzie and S. B. Wicker, “Game Theory in Communications: Motivation , Explanation , and Application to Power Control,” in *GLOBECOM '01*, 2001, pp. 821–826.
- [37] M. Cardenas and J. Chapid, “Implementación de un algoritmo de control de potencia basado en la teoría de juegos en un sistema multicelular limitado por interferencia con portadora única.,” 2015.
- [38] L. Raju, R. S. Milton, S. Suresh, and S. Sankar, “Reinforcement Learning in Adaptive Control of Power System Generation,” *Procedia - Procedia Comput. Sci.*, vol. 46, no. Icict 2014, pp. 202–209, 2015.
- [39] R. S. Pressman, “El proceso del software,” in *Ingeniería del software. Un enfoque práctico*, 7th ed., The McGraw-Hill, Ed. New York, 2010, pp. 25–80.
- [40] E. Maida and J. Pacienza, “Metodologias de desarrollo de software,” 2015.
- [41] S. K. Suman, D. Kumar, and L. Bhagyalakshmi, “Non cooperative power control game with new pricing for wireless ad hoc networks,” *Int. Rev. Comput. Softw.*, vol. 9, no. 1, pp. 18–28, 2014.
- [42] Y. M. El-Sabe, M. Esameldin, and M. Ashour, “Enhanced Rank Based Cooperative Game (ERBCG) strategy for IEEE 802.11s Mesh WLAN power management,” *2013 9th Int. Wirel. Commun. Mob. Comput. Conf. IWCMC 2013*, pp. 375–380, 2013.
- [43] E. Hoyos, D. Trujillo, and H. Bermudez, “Access point selection in 802 . 11 Wireless networks ensuring minimum capacity for QoS based on power control,” vol. 10, pp. 167–177, 2013.
- [44] S. Ginde, J. Neel, R. M. Buehrer, and V. Tech, “Game Theoretic Analysis of Joint Link Adaptation and Distributed Power Control in GPRS,” vol. 00, no. C, pp. 1–5, 2003.
- [45] J. Martinez, “Diseño e implementación sobre hardware reconfigurable de una arquitectura para la emulación en tiempo real de redes neuronales celulares,” pp. 1–17, 2013.



- [46] T. Mancilla, C. H. Clavijo, and J. de J. Rugeles, “Caracterización de la plataforma de radio definido por software USRP N210 - WBX,” vol. 12, pp. 91–101, 2013.
- [47] A. A. Soriano., L. Marín., R. Juan., J. Cazalilla., A. Valera., M. Vallés., P, “Plataforma Robótica De Bajo Coste Y Recursos Limitados Basada En Arduino Y Dispositivos Móviles.,” *Univ. Politècnica Val.*, p. 9.
- [48] “Raspberry Pi - Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi.” [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/>. [Accessed: 18-May-2018].
- [49] S. D. Brown, R. J. Francis, J. Rose, and Z. G. Vranesic, *Field programmable gate arrays*. .
- [50] L. M. A. Erazo Ruiz S, “Análisis de un sistema de comunicaciones con codificación Golay basado en hardware reconfigurable,” 2016.
- [51] “USRP B210 USB Software Defined Radio (SDR) - Ettus Research.” [Online]. Available: <https://www.ettus.com/product/details/UB210-KIT>. [Accessed: 18-May-2018].
- [52] “MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink.” [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/>. [Accessed: 18-May-2018].
- [53] “Suite para Comunicaciones de LabVIEW - National Instruments.” [Online]. Available: <http://www.ni.com/labview-communications/esa/>. [Accessed: 18-May-2018].
- [54] “GNU Radio.” [Online]. Available: <https://gnuradio.org/>. [Accessed: 18-May-2018].
- [55] “Sublime Text - A sophisticated text editor for code, markup and prose.” [Online]. Available: <https://www.sublimetext.com/>. [Accessed: 18-May-2018].
- [56] J. Incera, R. Cartas, and O. Cairó, “Redes Digitales : Presente y Futuro,” *Rep. Técnico LRAV 10507*, no. 1, pp. 1–50, 2007.
- [57] R. Prieto and R. Rojas, “Implementación de un sistema de comunicación CQAM sobre radio definida por software,” 2017.
- [58] “UHD - Ettus Knowledge Base.” [Online]. Available: <https://kb.ettus.com/UHD>. [Accessed: 18-May-2018].
- [59] D. Nguyen, “Implementation of OFDM systems using GNU Radio and USRP,” *New Front. Dyn. Spectrum*, ..., pp. 1–117, 2013.
- [60] B. Bloessl, M. Segata, C. Sommer, and F. Dressler, “Performance Assessment of IEEE 802.11p with an Open Source SDR-Based Prototype,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 17, no. 5, pp. 1162–1175, 2018.
- [61] J. P. Montero Hidalgo, “Implementación de un sistema de comunicaciones



basado en Software Radio,” 2014.

- [62] “Wime Project.” [Online]. Available: <https://www.wime-project.net/>. [Accessed: 19-May-2018].
- [63] M. M. Alam, M. R. Islam, and M. Y. Arafat, “FER Performance Evaluation and Enhancement of IEEE 802 . 11 a / g / p WLAN over Multipath Fading Channels in GNU Radio and USRP N200 Environment,” vol. 12, no. 1, pp. 178–203, 2018.
- [64] “Analizadores de redes | Test y medida | Rohde & Schwarz.” [Online]. Available: [https://www.rohde-schwarz.com/es/productos/test-y-medida/analizadores-de-redes/pg\\_64043.html](https://www.rohde-schwarz.com/es/productos/test-y-medida/analizadores-de-redes/pg_64043.html). [Accessed: 21-May-2018].
- [65] M. R. Sal, “REGULACIÓN TÉCNICA DE LOS SISTEMAS Wi-Fi,” 2008.
- [66] O. Internacionales, C. Europea, and A. Postales, “CAPÍTULO 4 : ASPECTOS LEGISLATIVOS Y DESPLIEGUE DE REDES WI-FI Bandas ICM y su canalización,” pp. 99–114, 2003.
- [67] “RSSI con NetSpot.” [Online]. Available: <https://www.netspotapp.com/es/what-is-rssi-level.html>. [Accessed: 20-May-2018].
- [68] “Guías de consulta del estudio sobre el sitio para el despliegue de WLAN - Cisco.” [Online]. Available: [https://www.cisco.com/c/es\\_mx/support/docs/wireless/5500-series-wireless-controllers/116057-site-survey-guidelines-wlan-00.html](https://www.cisco.com/c/es_mx/support/docs/wireless/5500-series-wireless-controllers/116057-site-survey-guidelines-wlan-00.html). [Accessed: 20-May-2018].
- [69] E. Monachesi *et al.*, “Estudio de viabilidad de un enlace WiFi.”
- [70] K. Cheung, “Statistical ARQ Link Analysis and Planning for Dynamic Links,” pp. 1–8, 2016.
- [71] S. H. Calculation, “A Performance Analysis of HICCUPS – a Steganographic System for WLAN Krzysztof Szczypiorski Abstract 2 . The Analysis of Saturation Throughput for the Corrupted Frame Mode – S H,” pp. 0–4.



## APÉNDICES

### APÉNDICE A. CODIGOS DE IMPLEMENTACIÓN

#### A.1 CÓDIGO DE ALGORITMO DE CONTROL DE POTENCIA BASADO EN GT.

```
void cálculos (float snr2) {
    PotElegida = 0;
    if (auxprob == 0){ // permite que se haga la asignación aleatoria solo en la primera iteración
        float max = drand48();
        float max1;
        float suma =0;
        float resultado;
        int cont = 1;
        //***** cálculo aleatorio de probabilidades *****
        for (int i=0; i<15; i++) {
            if (i == 14){
                probabilidad[i] = max1;
            } else {
                probabilidad[i]=drand48()*(max-0);
                for (int j=0; j<cont; j++) {
                    suma = suma + probabilidad[j];
                }
            }
            cont = cont +1;
            max1 = 1-suma;
            max = drand48()*(1 - suma);
            suma = 0;
            dout << probabilidad[i] << std::endl;
        }
        //se imprime la suma de los componentes del vector para verificar que sea igual a1
        for (int j=0; j<15; j++) {
            resultado = resultado + probabilidad[j];
            if (j == 14) {
                dout << "resultado: " << resultado << std::endl;
            }
        }
        //***** se calcula la mayor probabilidad y la posición de esta *****
        maxProba = probabilidad [0];
        for (int i=0; i<15; i++) {
            if (probabilidad[i]>maxProba) {
                maxProba=probabilidad[i];
                pos2=i;
            }
        }
    }
}
```



```
PotElegida = potencias[pos2];
//**** se saca el valor de potencia elegido a través del puerto "parameter1"
float ja = PotElegida;
pmt::pmt_t ja1 = pmt::from_double(ja);
message_port_pub(pmt::mp("parameter1"), pmt::cons(pmt::PMT_NIL, ja1));
auxprob = auxprob + 1;
}
//***** para todas las demás iteraciones el vector ya fue actualizado en la función "void //*****
cálculos ()", aquí solo se elige la potencia asociada a la mayor probabilidad y //***** se saca
a través del puerto "parameter 1".
else {
    maxProba = probabilidad [0];
    for (int m=0; m<15; m++){
        if (probabilidad[m]>=maxProba) {
            maxProba=probabilidad[m];
            pos2=m;
        }
    }
    PotElegida = potencias[pos2];
    float ja = PotElegida;
    pmt::pmt_t ja1 = pmt::from_double(ja);
    message_port_pub (pmt::mp ("parameter1"), pmt::cons(pmt::PMT_NIL, ja1));
}
}

void cálculos (float snr2) {
    float M = 32;
    float Y = 10;
    float utilidad = snr2;
    float b = (M + utilidad - Y) / (2*M) ; // cálculo del parámetro

    //***** actualizar vector de probabilidades *****
    float NumPot = 14; // número de valores discretos de potencia menos 1
    float lambda;
    if (iteracion2 < 50) {
        lambda = 1/(1+(iteracion2*0.1)); // cálculo de la tasa de aprendizaje
        iteracion2++; // contador para reinicio de tasa de aprendizaje

    //***** se reinicia la tasa de aprendizaje a cada 50 iteraciones *****
    else{
        iteracion2=0;
        lambda = 1/(1+(iteracion2*0.1));
    }
    iteracion++; // incremento del contador de iteraciones del algoritmo
    float sumando = 0;
```



```
// se verifica si la SNR está dentro del rango de satisfacción y se actualiza el vector de
//probabilidades
if (utilidad > 14 && utilidad < 20) {
    for (int i=0; i<15; i++) {
        if (i == pos2){
            probabilidad[i] = probabilidad[i] + lambda*b*(1-probabilidad[i]);
        }else {
            probabilidad[i] = probabilidad[i] + lambda*b*(0-probabilidad[i]);
        }
    }
}
else {
    for (int i=0; i<15; i++) {
        if (i != pos2){
            probabilidad[i] = probabilidad[i] + lambda*b*((1/NumPot)-probabilidad[i]);
        } else {
            probabilidad[i] = probabilidad[i] + lambda*b*(0-probabilidad[i]);
        }
    }
}
}
```

## A.2. COMPARACIÓN Y VERIFICACIÓN DE DIRECCIONES MAC.

// función de verificación de dirección MAC. Recibe dirección MAC de fuente y de destino.

```
int check_mac_address(uint8_t *addr_fuente,uint8_t *addr_destino,
bool new_line = false) {
int auxiliar = 0;
std::cout << std::setfill('0') << std::hex << std::setw(2);
// comparación de direcciones de fuente con la dirección MAC previamente configurada.
if ((addr_fuente[0] == 65 &&
addr_fuente[1] == 65 && addr_fuente[2] == 65 && addr_fuente[3] == 65 &&
addr_fuente[4] == 65 && addr_fuente[5] == 65) && ((addr_destino[0] == 32 &&
addr_destino[1] == 32 && addr_destino[2] == 32 && addr_destino[3] == 32 &&
addr_destino[4] == 32 && addr_destino[5] == 32) || (addr_destino[0] == 25 &&
addr_destino[1] == 25 && addr_destino[2] == 25 && addr_destino[3] == 25 &&
addr_destino[4] == 25 && addr_destino[5] == 25)))
{
    // si la dirección MAC coincide se captura la dirección MAC destino para
realimentar la información hacia la STA
    auxiliar = 1;
    std::string dir_string[6];
    std::string dir_string_total = "";
    std::cout << std::setfill('0') << std::hex << std::setw(2);
    int direccion[6] = {0,0,0,0,0,0};
    for(int i = 0; i < 6; i++)
    {
```



```
        direccion[i] = addr_destino[i];
        dir_string[i] = boost::to_string(direccion[i]);
        dir_string_total = dir_string[i] + dir_string_total;
    }
    // se envía la mac destino de la STA por un puerto independiente
    message_port_pub(pmt::mp("mac_destino"), pmt::intern(dir_string_total));

}
else
{
    auxiliar = 0;
}
}
```

### A.3. CÓDIGO PARA LA ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE TRAMAS RECIBIDAS Y PERDIDAS.

```
// función de verificación MAC para snr
void check_mac_address_for_snr(uint8_t *addr_destino,
char *buf, bool new_line = false) {
    mac_header* h = (mac_header*)buf;
    int auxruido = 0;
    float fer_thosiba = 0;
    float fer_samsung = 0;
    float seq_no_toshiba = 0;
    float seq_no_samsung = 0;
    // Comparacion de MAC para determinar que STA envía las tramas
    if (addr_destino[0] == 32 && addr_destino[1] == 32 && addr_destino[2] == 32 &&
addr_destino[3] == 32 && addr_destino[4] == 32 && addr_destino[5] == 32)
    {
        // Para conteo de tramas recibidas y pérdidas se hace uso del número de
secuencia de cada trama
        seq_no_toshiba = int(h->seq_nr >> 4);
        dout << "Numero secuencia Thosiba: " << seq_no_toshiba << std::endl;
        float lost_frames_toshiba = seq_no_toshiba - d_last_seq_no_toshiba - 1;
        fer_thosiba = lost_frames_toshiba / (lost_frames_toshiba + 1);
        // Se hace un cálculo de FER instantánea y se hace el conteo de las tramas recibidas
exitosamente y pérdidas para cada STA
        dout << "FER TOSHIBA instantanea: " << fer_thosiba << std::endl;
        d_last_seq_no_toshiba = seq_no_toshiba;

        if(lost_frames_toshiba == 0)
        {
            contadorBuenas_toshiba = contadorBuenas_toshiba+1;
        }
        else
        {
```



```
        contadorBuenas_toshiba = contadorBuenas_toshiba+1;
        contadorMalas_toshiba = contadorMalas_toshiba+ lost_frames_toshiba;
    }
    std::cout <<"Tramas recibidas: " << contadorBuenas_toshiba
        <<" Tramas perdidas : " << contadorMalas_toshiba<< std::endl;

    auxruido = 1;
}

else if
// Comparación de la dirección MAC de destino con la dirección MAC previamente configurada
(addr_destino[0] == 25 && addr_destino[1] == 25 &&
addr_destino[2] == 25 && addr_destino[3] == 25 &&
addr_destino[4] == 25 && addr_destino[5] == 25)
{
    seq_no_samsung = int(h->seq_nr >> 4);
    dout << "Numero secuencia Samsung: " << seq_no_samsung << std::endl;
    float lost_frames_samsung = seq_no_samsung - d_last_seq_no_samsung - 1;
    fer_samsung = lost_frames_samsung / (lost_frames_samsung + 1);
    dout << "FER SAMSUNG instantanea: " << fer_samsung << std::endl;
    d_last_seq_no_samsung = seq_no_samsung;

    if(lost_frames_samsung == 0)
    {
        contadorBuenas_samsung = contadorBuenas_samsung+1;
    }
    else
    {
        contadorBuenas_samsung = contadorBuenas_samsung + 1;
        contadorMalas_samsung = contadorMalas_samsung +
lost_frames_samsung;
    }
    std::cout <<"Tramas recibidas: " <<contadorBuenas_samsung<<" Tramas perdidas
:" <<contadorMalas_samsung<< std::endl;

}
}
```

#### A.4. RECEPCIÓN Y ENVIÓ DEL PARAMETRO DE SNR PARA REALIMENTACIÓN DEL ALGORITMO.

```
// Función encarga de recibir y enviar la información de datos
void message_strobe_impl::in_snr(pmt::pmt_t msg) {
```

```
    //Variables
    std::string snr_leng_string;
    std::string snr_string2;
```



```
std::string snr_string;
char snr_char[10] = {0};
char snr_char2[10] = {0};

msg = pmt::cdr(msg);

float snr = pmt::to_double(msg);
if(snr == 2)
{
    snr_leng_string = "2";
    snr_string2 = "22";
}
else
{
//Recepcion del valor de SNR desde el bloque verificación MAC para la conformación del mensaje.
    snr_string = boost::to_string(snr);
    strcpy(snr_char,snr_string.c_str());
//Modificaciones necesarias para el envío de un dato con punto flotante (conversión de punto a
coma) y envío de la longitud del valor de SNR
    for(int m = 0; m < 3; m++)
    {
        if(snr_char[m]!='.')
        {
            snr_char[m]=',';
        }
    }
    int snr_leng = strlen(snr_char);
    if(snr_leng < 6)
    {
        snr_leng_string = boost::to_string(snr_leng);
        snr_string2 = snr_string;
    }
    else
    {
        // Conversión de variable tipo char a tipo string
        snr_char2[0] = snr_char[0];
        snr_char2[1] = snr_char[1];
        snr_char2[2] = snr_char[2];
        snr_char2[3] = snr_char[3];
        snr_char2[4] = snr_char[4];
        snr_string2 = boost::to_string(snr_char2);
        snr_leng_string = "5";
    }
}
// Envío del valor de SNR y datos de información.
std::cout << valor3 << std::endl;
```



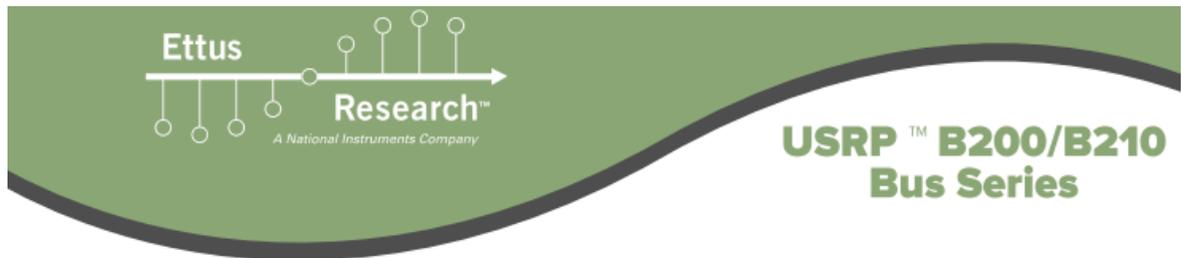
```

std::string valor2 = "=====ACCESS POINT DELL INSPIRON-
3459 ACCESS POINT DELL INSPIRON-3459 ACCESS POINT DELL INSPIRON-3459
=====";
valor3 = snr_leng_string+snr_string2+pmt::symbol_to_string(d_msg);
std::cout << "Mensaje: "<<valor3 << std::endl;

}

```

### APÉNDICE B. CARACTERISTICAS TECNICAS DEL USRP B210.



Spec	Typ.	Unit
<b>Power</b>		
DC Input	6	V
<b>Conversion Performance and Clocks</b>		
ADC Sample Rate (max)	61.44	MS/s
ADC Resolution	12	bits
ADC Wideband SFDR	78	dBc
DAC Sample Rate (max)	61.44	MS/s
DAC Resolution	12	bits
Host Sample Rate (16b) **	61.44	MS/s
Frequency Accuracy	±2.0	ppm
W/ GPS Unlocked TCXO Reference	±75	ppb
W/ GPS Locked TCXO Reference	< 1	ppb

Spec	Typ.	Unit
<b>RF Performance (single channel)</b>		
SSB/LO Suppression	-35/50	dBc
3.5 GHz	1.0	deg RMS
6 GHz	1.5	deg RMS
Power Output	>10	dBm
IIP3 (@ typ NF)	-20	dBm
Receive Noise Figure	<8	dB
<b>Physical</b>		
Dimensions	9.7x15.5x1.5	cm
Weight	350	g

\*All specifications are subject to change without notice.  
\*\* See benchmark results for sample rates in various configurations.



## APÉNDICE C. CARACTERIZACIÓN DE LA POTENCIA DE TRANSMISION DEL USRP B210.

### C.1 EQUIPOS Y MONTAJE PARA LA CARACTERIZACIÓN.

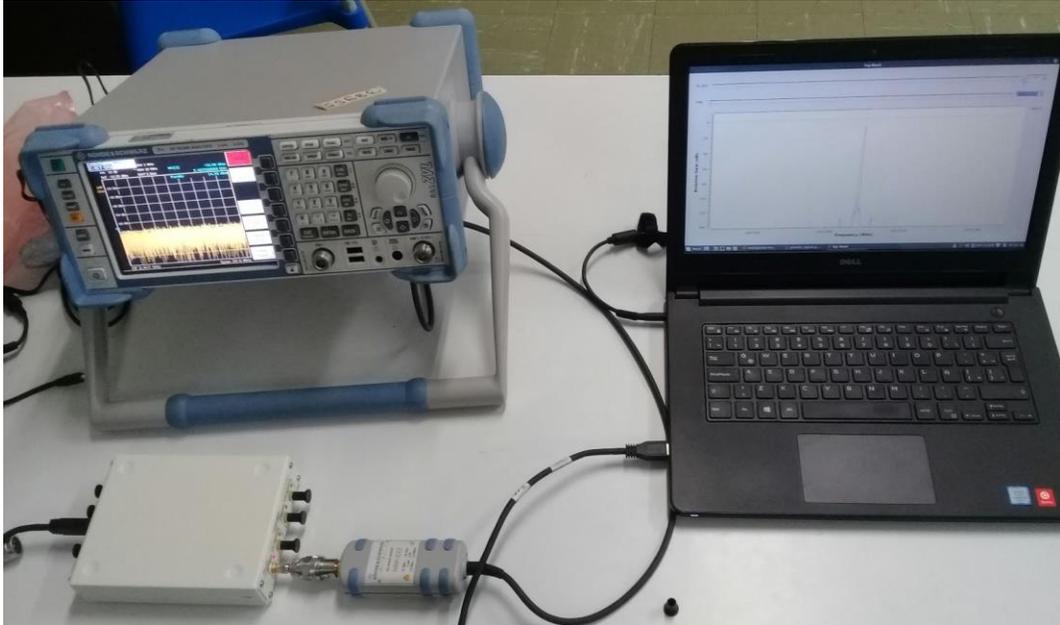


Figura C.1 Equipos y montaje para la caracterización.

### C.2. RESULTADOS DE CARACTERIZACION DEL USRP B210.

Tabla C.2 Resultados de la caracterización del USRP B210.

Ganancia GNU radio	Potencia de Tx del USRP [dBm]	Ganancia GNU radio	Potencia de Tx del USRP [dBm]	Ganancia GNU radio	Potencia de Tx del USRP [dBm]
<b>0,2</b>	-44,32	<b>0,47</b>	-25,61	<b>0,74</b>	-1,07
<b>0,21</b>	-44,01	<b>0,48</b>	-24,62	<b>0,75</b>	-0,02
<b>0,22</b>	-43,8	<b>0,49</b>	-23,83	<b>0,76</b>	0,49
<b>0,23</b>	-43,4	<b>0,5</b>	-22,86	<b>0,77</b>	1,53
<b>0,24</b>	-42,93	<b>0,51</b>	-21,85	<b>0,78</b>	2,58
<b>0,25</b>	-42,55	<b>0,52</b>	-21,04	<b>0,79</b>	3,05
<b>0,26</b>	-41,98	<b>0,53</b>	-19,99	<b>0,8</b>	4,14
<b>0,27</b>	-41,6	<b>0,54</b>	-19,25	<b>0,81</b>	4,88
<b>0,28</b>	-40,97	<b>0,55</b>	-18,28	<b>0,82</b>	5,75



<b>0,29</b>	-40,27	<b>0,56</b>	-17,24	<b>0,83</b>	6,54
<b>0,3</b>	-39,65	<b>0,57</b>	-16,46	<b>0,84</b>	7,48
<b>0,31</b>	-38,94	<b>0,58</b>	-15,47	<b>0,85</b>	8,48
<b>0,32</b>	-38,31	<b>0,59</b>	-14,69	<b>0,86</b>	9,02
<b>0,33</b>	-37,39	<b>0,6</b>	-13,64	<b>0,87</b>	10,01
<b>0,34</b>	-36,53	<b>0,61</b>	-13,01	<b>0,88</b>	10,69
<b>0,35</b>	-35,89	<b>0,62</b>	-12,01	<b>0,89</b>	11,65
<b>0,36</b>	-34,95	<b>0,63</b>	-11,01	<b>0,9</b>	12,44
<b>0,37</b>	-34,22	<b>0,64</b>	-10,24	<b>0,91</b>	13,06
<b>0,38</b>	-33,3	<b>0,65</b>	-9,23	<b>0,92</b>	14,12
<b>0,39</b>	-32,29	<b>0,66</b>	-8,43	<b>0,93</b>	14,65
<b>0,4</b>	-31,53	<b>0,67</b>	-7,51	<b>0,94</b>	15,61
<b>0,41</b>	-30,77	<b>0,68</b>	-6,47	<b>0,95</b>	16,24
<b>0,42</b>	-30,04	<b>0,69</b>	-5,74	<b>0,96</b>	16,84
<b>0,43</b>	-29,02	<b>0,7</b>	-4,67	<b>0,97</b>	17,97
<b>0,44</b>	-28,26	<b>0,71</b>	-4,01	<b>0,98</b>	18,52
<b>0,45</b>	-27,26	<b>0,72</b>	-2,98	<b>0,99</b>	19,22
<b>0,46</b>	-26,19	<b>0,73</b>	-1,94	<b>1</b>	19,88

#### APENDICE D. PORCENTAJES DE AHORRO DE ENERGÍA EN ESCENARIOS DE INTERIORES Y EXTERIORES

El procedimiento para calcular el ahorro de energía se describe en la ecuación D.1.

$$\%Ahorro = (Pot_{sinPC} [mW] - Pot_{conPC} [mW]) \left( \frac{100}{Pot_{sinPC} [mW]} \right) \quad (D.1)$$

Donde  $Pot_{sinPC}$  es la potencia de transmisión de una STA sin control de potencia en [mW],  $Pot_{conPC}$  es la potencia de transmisión de una la STA con control de potencia.



Tabla D.1 Porcentajes de ahorro de ahorro de energía en escenario de interiores.

Distancia [m]	Con PC [dBm]	Con PC [mW]	Sin PC [dBm]	Sin PC [mW]	Ahorro Sin PC - Con PC [mW]	% Ahorro
3	-3,32	0,47	19,99	99,77	99,30	99,53
4	-3,32	0,47	19,99	99,77	99,30	99,53
5	0,17	1,04	19,99	99,77	98,73	98,96
6	0,17	1,04	19,99	99,77	98,73	98,96
7	2,08	1,61	19,99	99,77	98,16	98,38
8	2,08	1,61	19,99	99,77	98,16	98,38
9	3,64	2,31	19,99	99,77	97,46	97,68
10	3,64	2,31	19,99	99,77	97,46	97,68
11	5,73	3,74	19,99	99,77	96,03	96,25
12	5,73	3,74	19,99	99,77	96,03	96,25
13	7,29	5,36	19,99	99,77	94,41	94,63
14	7,29	5,36	19,99	99,77	94,41	94,63
15	8,90	7,76	19,99	99,77	92,01	92,22
16	8,90	7,76	19,99	99,77	92,01	92,22
17	8,90	7,76	19,99	99,77	92,01	92,22
18	10,63	11,56	19,99	99,77	88,21	88,41
19	10,63	11,56	19,99	99,77	88,21	88,41
20	12,17	16,48	19,99	99,77	83,29	83,48
21	12,17	16,48	19,99	99,77	83,29	83,48
22	13,84	24,21	19,99	99,77	75,56	75,73
23	13,84	24,21	19,99	99,77	75,56	75,73
24	15,59	36,22	19,99	99,77	63,55	63,69
25	17,27	53,33	19,99	99,77	46,44	46,54

Tabla D.2 Porcentajes de ahorro de energía en un escenario de exteriores.

Distancia [m]	Con PC [dBm]	Con PC [mW]	Sin PC [dBm]	Sin PC [mW]	Ahorro Sin PC - Con PC [mW]	% Ahorro
2	-3,32	0,47	19,99	99,77	99,30	99,53
3	-3,32	0,47	19,99	99,77	99,30	99,53
4	0,17	1,04	19,99	99,77	98,73	98,96
5	2,08	1,61	19,99	99,77	98,16	98,38
6	2,08	1,61	19,99	99,77	98,16	98,38
7	3,64	2,31	19,99	99,77	97,46	97,68
8	3,64	2,31	19,99	99,77	97,46	97,68



9	5,73	3,74	19,99	99,77	96,03	96,25
10	5,73	3,74	19,99	99,77	96,03	96,25
11	7,29	5,36	19,99	99,77	94,41	94,63
12	7,29	5,36	19,99	99,77	94,41	94,63
13	7,29	5,36	19,99	99,77	94,41	94,63
14	8,90	7,76	19,99	99,77	92,01	92,22
15	10,63	11,56	19,99	99,77	88,21	88,41
16	10,63	11,56	19,99	99,77	88,21	88,41
17	10,63	11,56	19,99	99,77	88,21	88,41
18	12,17	16,48	19,99	99,77	83,29	83,48
19	12,17	16,48	19,99	99,77	83,29	83,48
20	13,84	24,21	19,99	99,77	75,56	75,73
21	15,59	36,22	19,99	99,77	63,55	63,69
22	15,59	36,22	19,99	99,77	63,55	63,69
23	17,27	53,33	19,99	99,77	46,44	46,54
24	17,27	53,33	19,99	99,77	46,44	46,54
25	18,76	75,16	19,99	99,77	24,61	24,66

**APENDICE E. DATOS DE FER OBTENIDOS CON CONTROL DE POTENCIA Y SIN CONTROL DE POTENCIA EN ESCENARIOS DE EXTERIORES E INTERIORES.**

*Tabla E.1 Valores de FER obtenidos con el control de potencia desactivado en exteriores.*

[m]	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4		Prueba 5		Promedio	
	STA 1	STA 2										
5	0,054	0,057	0,047	0,046	0,051	0,056	0,053	0,052	0,054	0,051	0,0518	0,0524
10	0,054	0,048	0,049	0,053	0,047	0,053	0,052	0,055	0,049	0,045	0,0502	0,0508
15	0,046	0,053	0,054	0,053	0,054	0,049	0,051	0,053	0,045	0,05	0,05	0,0516

*Tabla E.2 Valores de FER obtenidos con el control de potencia activado en exteriores.*

[m]	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4		Prueba 5		Promedio	
	STA 1	STA 2										
5	0,059	0,046	0,036	0,04	0,03	0,05	0,037	0,043	0,04	0,044	0,0404	0,0446
10	0,05	0,049	0,037	0,075	0,045	0,047	0,045	0,052	0,044	0,044	0,0442	0,0534
15	0,033	0,044	0,055	0,054	0,052	0,052	0,054	0,053	0,055	0,05	0,0498	0,0506



Tabla E.3 Valores de FER obtenidos con el control de potencia desactivado en interiores.

[m]	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4		Prueba 5		Promedio	
	STA 1	STA 2										
5	0,055	0,059	0,049	0,046	0,053	0,056	0,053	0,052	0,054	0,051	0,053	0,053
10	0,059	0,057	0,054	0,061	0,060	0,060	0,058	0,058	0,056	0,058	0,057	0,059
15	0,056	0,059	0,054	0,053	0,059	0,049	0,058	0,053	0,050	0,050	0,055	0,053

Tabla E.4 Valores de FER obtenidos con el control de potencia activado en interiores.

[m]	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4		Prueba 5		Promedio	
	STA 1	STA 2										
5	0,059	0,046	0,046	0,054	0,044	0,050	0,047	0,053	0,045	0,044	0,048	0,049
10	0,055	0,049	0,055	0,075	0,055	0,051	0,049	0,057	0,044	0,044	0,052	0,055
15	0,053	0,054	0,055	0,054	0,052	0,056	0,054	0,053	0,055	0,058	0,054	0,055

## APENDICE F. EXPLICACION DEL SISTEMA TRANSMISOR Y RECEPTOR Y DIAGRAMAS DE FLUJO COMPLETOS DEL AP Y LA STA.

El receptor OFDM se encarga de detectar el inicio de un símbolo OFDM por medio de la autocorrelación de la secuencia de entrenamiento corta, este proceso se realiza dentro del bloque *WIFI Sync Short*, en seguida la señal pasa hacia el bloque *WIFI Sync Long* responsable de la corrección de frecuencia y la alineación del símbolo para que posteriormente el bloque FFT realice la Transformada Rápida de Fourier para pasar la señal del dominio del tiempo a la frecuencia. El primer bloque que procesa la señal en el dominio de la frecuencia es el bloque *WIFI Frame Equalizer* encargado de la corrección de desplazamiento de fase y la estimación del canal. En este bloque se extraen los símbolos OFDM para que sean decodificados en el bloque *WIFI Decode MAC*, el cual recibe vectores de 48 puntos de la constelación en el plano complejo correspondientes a las 48 subportadoras OFDM. La decodificación de la carga útil se realiza dependiendo del MCS configurado en el transmisor, esta información se extrae de los bits contenidos en los primeros símbolos OFDM.

El sistema de transmisión OFDM es más simple, ya que los algoritmos de detección de símbolos, corrección de fase y frecuencia son complejos en el sistema receptor. Bastantes funciones de este sistema se encapsulan dentro del bloque jerárquico *WIFI PHY Hier*, internamente este bloque se compone del sub-bloque *OFDM*



Mapper encargado de recibir la información de carga útil desde el bloque *Message Strobe*, la información de las tramas MAC desde el bloque *WIFI MAC* y el MCS ingresado como parámetro. Además, realiza el *Scrambling* de los bits, codifica los datos con un código convolucional y realiza el *Interleaving*. La información de transmisión pasa al bloque *Packet Header Generator*, en el cual se generan los campos *SIGNAL* y *SERVICE* del encabezado de la trama MAC. Esta información se modula con BPSK en el bloque *Chunks to Symbols*, el resto de la trama se modula con el MCS que se ingresa como parámetro. Finalmente, el bloque *OFDM Carrier Allocator* agrega las sub-portadoras piloto antes de que el bloque *FFT* realice la Transformada Rápida de Fourier Inversa para pasar la señal al dominio del tiempo, finalmente el bloque *OFDM Prefixer* agrega el prefijo cíclico para combatir la interferencia intersimbólica.

En las figuras F.1 y F.2 se muestran los Diagramas de bloques completos para el AP y las STAs, respectivamente, señalado con un recuadro rojo los bloques modificados para llevar a cabo la implementación del algoritmo de PC basado en GT.

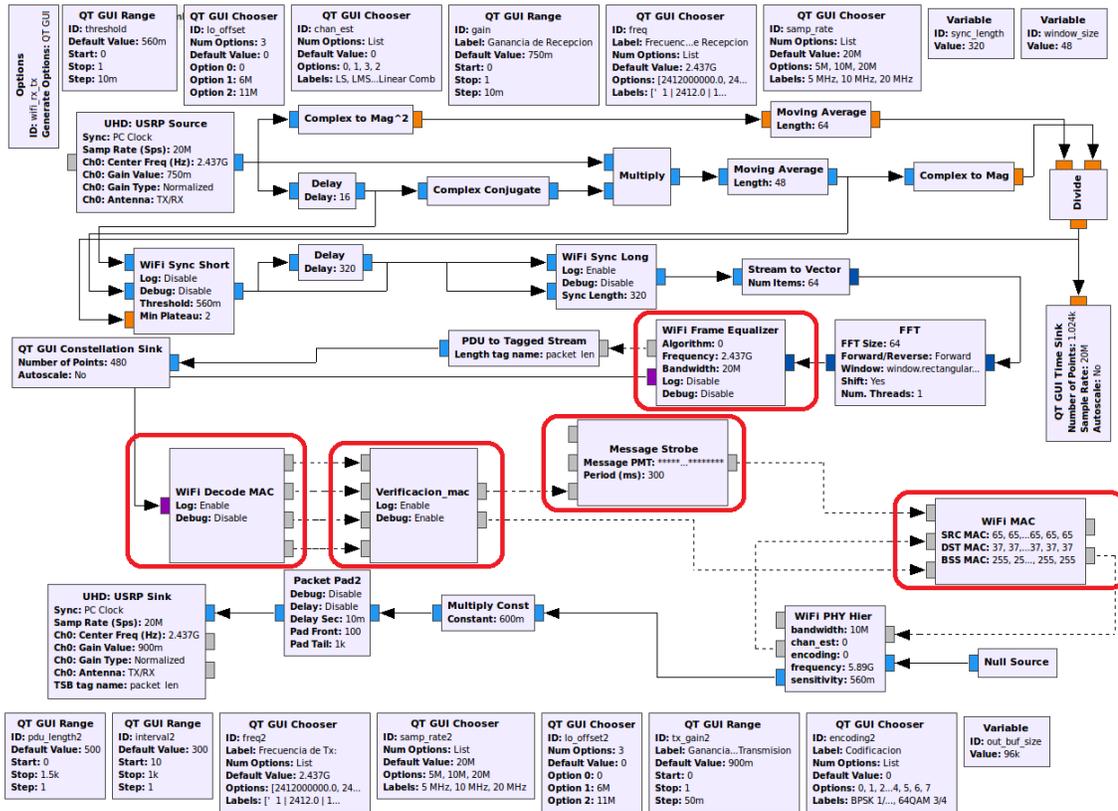


Figura F.1 Diagrama de flujo completo del AP.

