

Pablo Anibal Campos Yucailla

Contribución a la detección y
análisis del impacto del problema
de terminal oculto en despliegues
de redes 4G en bandas no
licenciadas

Director/es

Hernández Solana, María Ángela
Valdovinos Bardají, Antonio

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>

© Universidad de Zaragoza
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606



Universidad
Zaragoza

Tesis Doctoral

CONTRIBUCIÓN A LA DETECCIÓN Y ANÁLISIS
DEL IMPACTO DEL PROBLEMA DE TERMINAL
OCULTO EN DESPLIEGUES DE REDES 4G EN
BANDAS NO LICENCIADAS

Autor

Pablo Anibal Campos Yucailla

Director/es

Hernández Solana, María Ángela
Valdovinos Bardají, Antonio

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
Escuela de Doctorado

Programa de Doctorado en Tecnologías de la Información y
Comunicaciones en Redes Móviles

2022



Universidad de Zaragoza

Tesis Doctoral

Contribución a la Detección y
Análisis del Impacto del
Problema de Terminal Oculto en
Despliegues de Redes 4G en
Bandas no Licenciadas

Autor:

Pablo Aníbal Campos Yucailla

Directores:

Dra. María Ángela Hernández Solana

Dr. Antonio Valdovinos Bardají

Zaragoza, 2022

Agradecimientos

Agradezco a mis directores, Ángela y Toni por su paciencia e invaluable apoyo en cada etapa de este camino.

A mi querida esposa Cecilia, y al ser que es la alegría de nuestro hogar, nuestra hija Emilia, por su amor, comprensión, palabras de aliento y entre las dos darme motivos para continuar en los momentos difíciles.

A mis padres, Joffre y Guillermina, mis tías, mis primos y amigos. Por su preocupación, consejos y compañía. Siempre han estado junto a mí en cada tropiezo en cada triunfo.

A mis compañeros de Laboratorio 2.05, José María, Carmen, Jorge, Suria, Rubén, Luis y otros, que enriquecieron mis vivencias durante mi estancia en Zaragoza.

Finalmente, a mi Padre celestial por su amor y cuidado.

Desde lo más profundo de mi ser gracias. Sin la ayuda, compañía o aliento de cada uno de Ustedes este final no sería posible.

Resumen

El crecimiento exponencial que el tráfico de datos móviles tiene en la actualidad y con igual pronóstico para el futuro, ha motivado a los operadores móviles a considerar el uso del espectro no licenciado para solventar la necesidad de mayor capacidad, en especial en ambientes *indoor* de las redes inalámbricas. En este sentido, el 3GPP ha estandarizado el uso de LTE en la banda no licenciada de 5GHz, en la que los operadores móviles pueden expandir la capacidad de sus redes en una forma rentable, eficiente y de fácil implementación.

El uso eficiente del espectro libre representa el principal reto que la industria aún tiene que solventar para una efectiva integración entre las bandas licenciada y la no licenciada cuando LTE adquiere la capacidad de transmitir en el espectro no licenciado. Además, esta entrada ha generado la preocupación de los vendedores y administradores de las redes Wi-Fi, quienes han empleado la banda libre por varios años, ante la posibilidad de verse afectados por un comportamiento injusto de LTE en el espectro libre. Por este motivo la 3GPP, estandariza un nuevo método de acceso al medio para LTE, el cual trabaja en forma similar al empleado por Wi-Fi, lo que permitiría una coexistencia justa entre estos dos actores tecnológicos. Sin embargo, el uso de este nuevo método de acceso por parte de LTE conlleva que esta tecnología debe lidiar con los mismos problemas que las redes de espectro compartido tienen en relación a gestión de interferencias y originará nuevos desafíos en el escenario de coexistencia con otras redes en el contexto de la presencia de terminales ocultos.

Son estos problemas los que son abordados en esta tesis, en donde se plantea varios escenarios de coexistencia entre LTE en banda no licenciada y Wi-Fi considerando la presencia de nodos ocultos. En este sentido se analiza cuáles son los efectos que la presencia de nodos ocultos puede originar sobre las redes LTE y Wi-Fi, se estudia un conjunto de métricas asociados al estándar LTE que permitan la identificación de las interferencias provenientes de nodos ocultos. Y, finalmente, se proponen diferentes algoritmos que permitan la detección de qué equipos de usuarios están siendo afectados por la presencia de terminales ocultos en forma independiente de la tecnología asociada a la fuente de interferencia en escenarios sin coordinación.

Palabras clave: LAA, LTE, Banda no licenciada, Nodo oculto, Interferencias, CQI, RSRQ.

Índice General

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABLAS	vii
LISTA DE ACRÓNIMOS	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación y Objetivos	1
1.2 Contexto de la Investigación	5
1.3 Contribuciones	5
1.4 Estructura de la Tesis	7
2. LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES	9
2.1 Evolución de LTE en Banda No Licenciada	9
2.1.1 Integración de LTE licenciado y LTE no licenciado	12
2.1.2 Tecnología IEEE 802.11 (Wi-Fi).....	17
2.1.3 Interfaz aire LTE.....	22
2.1.4 Tecnología LTE-U	28
2.1.5 Tecnología LAA Licensed-Assisted Access.....	32
2.2 Coexistencia LAA y Wi-Fi	40
2.2.1 Comparación entre LAA y Wi-Fi.....	40
2.2.2 Revisión de estudios de coexistencia LAA y Wi-Fi	44
2.2.3 Problema de nodo oculto en LAA	48
3. PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA	53
3.1 Estado del Arte	55
3.1.1 Estudios que evalúan la degradación del servicio.....	55
3.1.2 Propuestas que evalúan métodos de detección de nodos ocultos o alternativas de mitigación/solución a sus efectos.....	57
3.2 Impacto de la Presencia de Nodos Ocultos en las Prestaciones de la Red.....	64
3.2.1 Escenarios de análisis.....	64
3.2.2 Evaluación del impacto del nodo oculto en condiciones de canal ideal	73
3.3 Análisis de Métricas LTE para la Detección de Nodos Ocultos	86

3.3.1	<i>PRB y métricas basadas en las señales de referencia</i>	86
3.3.2	<i>Impacto de la presencia de nodos ocultos sobre el CQI</i>	91
3.4	Conclusiones	111
4.	DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA	116
4.1	Análisis de Métricas LTE en un Canal con Multitrayectoria	118
4.1.1	<i>Distribución CQI</i>	118
4.1.2	<i>RSRP, RSRQ, RSSI y número de PRB</i>	125
4.1.3	<i>Reporte de medidas del UE</i>	128
4.2	Algoritmo de Detección de Nodo Oculto Basado en Método Heurístico	133
4.2.1	<i>Análisis de resultados numéricos</i>	137
4.2.2	<i>Resultados del algoritmo DCD en la detección de colisiones</i>	144
4.3	Algoritmo de Detección de Nodo Oculto Basado en Métodos de Aprendizaje Automático	152
4.3.1	<i>Análisis del conjunto de datos</i>	153
4.3.2	<i>Métodos de aprendizaje automático y redes neuronales para la identificación de colisiones</i>	161
4.4	Resultados Numéricos y Discusión	172
4.4.1	<i>Resultados de precisión y sensibilidad</i>	178
4.4.2	<i>Tiempos de procesamiento</i>	179
4.5	Conclusiones	180
5.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	184
5.1	Conclusiones	184
5.1.1	<i>Impacto de la presencia de nodos ocultos</i>	184
5.1.2	<i>Análisis de la variable CQI para la detección de nodos ocultos</i>	186
5.1.3	<i>Desarrollo de soluciones para la detección de UE afectados por la presencia de nodos ocultos</i>	187
5.2	Líneas Futuras de Investigación	189
	ANEXO - CONTRIBUCIONES CIENTÍFICAS	193
	BIBLIOGRAFÍA	194

Lista de Figuras

Figura 2.1: Espectro y regulaciones para la banda no licenciada de 5 GHz	10
Figura 2.2: Evolución de los estándares 3GPP para bandas no licenciadas.....	12
Figura 2.3: Integración LTE licenciado y LTE no licenciado y modos de operación.	13
Figura 2.4: Diferentes escenarios considerados por la 3GPP para despliegue en banda no licenciada para LTE-LAA.....	14
Figura 2.5: Operación conjunta en bandas licenciada y no licenciada para 4G/5G.....	16
Figura 2.6: Mecanismo básico de acceso de IEEE 802.11.....	18
Figura 2.7: Mecanismo básico de acceso de IEEE 802.11.....	19
Figura 2.8: Mecanismo RTS/CTS de acceso de IEEE 802.11	20
Figura 2.9: Asignación de Categorías de acceso (CA) en EDCA.....	21
Figura 2.10: Comparación entre AIFS[AC] definidos en EDCA con SIFS, PIFS.	22
Figura 2.11: Representación de una señal OFDMA en frecuencia y tiempo.....	23
Figura 2.12: Estructura de la trama radio LTE.	24
Figura 2.13: Señales de sincronización en LTE.....	26
Figura 2.14: Diferentes reportes generados desde UE hacia eNode B.	27
Figura 2.15: Diagrama de flujo para LTE-U [7].....	29
Figura 2.16: Ciclo de trabajo ON-OFF para CSAT	30
Figura 2.17: Activación/desactivación de SCell en LTE-U SDL.	31
Figura 2.18: Procedimiento 3GPP LBT	35
Figura 2.19: MCOT y señal de reserva de canal en LAA.....	36
Figura 2.20: Transmisión de señales DRS en LAA	37
Figura 2.21: Procesos HARQ y generación de ACK/NACK en eNB LAA	39
Figura 2.22: Umbrales de ED y problema de nodo oculto asimétrico y expuesto.....	41
Figura 2.23: Comparación de los métodos de acceso de Wi-Fi y LAA en la banda no licenciada.....	43
Figura 2.24: Nodos ocultos para escenarios homogéneos y heterogéneos.	49
Figura 3.1: Escenarios de simulación con tráfico downlink	65
Figura 3.2: Ejemplo de traza para desvanecimiento Rayleigh, velocidad peatonal, 5 GHz.	68

Figura 3.3: Tasa de satisfacción para UE_{HA} y $*UE_{GA}$ para escenario LAA LAA con un solo tipo de nodo en zona oculta $UE_{HA ser}$. UE_{HA} en posiciones A (Pos A), B (Pos B) y C (Pos C).....	73
Figura 3.4: Tasa de satisfacción para UE_{HA} y $*UE_{GA}$ para escenario LAA LAA con dos tipos de nodos en zona oculta $UE_{HA ser}$ y $UE_{HA int}$. UE_{HA} en posiciones A (Pos A), B (Pos B) y C (Pos C).....	76
Figura 3.5: Tiempo de ocupación del canal para escenario LAA LAA para diferentes posiciones de $UE_{HA ser}$ a) Presencia solo de $UE_{HA ser}$ b) Presencia conjunta de $UE_{HA ser}$ y $UE_{HA int}$	77
Figura 3.6: Tasa de satisfacción para UE celda servidora. LAA Wi-Fi con un tipo de $UE_{HA ser}$ escenario (1).....	79
Figura 3.7: Degradación del throughput del AP en DL para escenarios con un ($UE_{HA ser}$) (1) y dos ($UE_{HA ser}$ y $STA_{HA int}$) (2) tipos de nodos en zona oculta, coexistencia LAA Wi-Fi.....	80
Figura 3.8: Tasa de satisfacción para $UE_{HA ser}$ y COT del AP para escenarios con un ($UE_{HA ser}$) (1) y dos ($UE_{HA ser}$ y $STA_{HA int}$) (2) tipos de nodos ocultos.	81
Figura 3.9: Escenario LAA Wi-Fi con transmisiones en DL y UL. a) Escenario con $UE_{HA ser}$ b) Escenario con $UE_{HA ser}$ y $STA_{HA int}$	82
Figura 3.10: Tiempo de Ocupación del canal para AP Wi-Fi con tráfico en DL y UL a) el escenario no tiene $STA_{HA int}$ (1) b) el escenario tiene los dos tipos de nodos ocultos $STA_{HA int}$ y $UE_{HA ser}$ (2) cada uno ubicado en la posición C (PosC). Coexistencia LAA Wi-Fi... ..	83
Figura 3.11: Tasa de satisfacción para UE celda servidora. LAA Wi-Fi, donde el AP transmite en DL y UL para diferentes tipos de nodos en zona oculta.....	85
Figura 3.12: Modelo de medidas 3GPP 36.133.	88
Figura 3.13: CQI wideband vs CQI subbanda	90
Figura 3.14: Distribuciones CQI reportados por $UE_{HA ser}$ coexistencia LAA LAA para escenario con un tipo de nodo oculto $UE_{HA ser}$ (Fig. 3.1 a.1) y dos tipos de nodos ocultos $UE_{HA ser}$ y $UE_{HA int}$ (Fig. 3.1 a.2) para un canal ideal.....	93
Figura 3.15: Distribuciones CQI reportados por $UE_{HA ser}$ coexistencia LAA Wi-Fi para escenario con un tipo de nodo oculto $UE_{HA ser}$ (Fig. 3.1 b.1) y dos tipos de nodos ocultos $UE_{HA ser}$ y $STA_{HA int}$ (Fig. 3.1 b.2) para un canal ideal. El AP solo transmite en DL.	96
Figura 3.16: Distribuciones CQI reportados por $UE_{GA ser}$ escenario LAA LAA canal ideal.	98
Figura 3.17: Distribución de CQI escenario LAA LAA y sus respectivos diagrama de barras para la distribución CQI collision, CQI collision Sinc y el COT del eNB interferente. .	100
Figura 3.18: Distribución de CQI escenario LAA Wi-Fi con un solo tipo de nodo oculto ($UE_{HA ser}$) y los diagramas de barras de la distribución CQI collision, CQI collision Sinc y el COT del AP interferente que transmite en DL.....	102
Figura 3.19: Distribución de CQI escenario LAA Wi-Fi con un solo tipo de nodo oculto ($UE_{HA ser}$) y los diagramas de barras de la distribución CQI collision y el COT del AP interferente que transmite en DL y UL.	103
Figura 3.20: Distribución de CQI escenario LAA Wi-Fi con dos tipos de nodo oculto ($UE_{HA ser}$ y $STA_{HA int}$) y los diagramas de barras de la distribución CQI collision y el COT del AP interferente que transmite en DL y UL.	105
Figura 3.21: Distribuciones CQI reportados por $UE_{HA ser}$ coexistencia LAA LAA para escenario con un tipo de nodo oculto $UE_{HA ser}$ Fig. 3.1 a.1) y dos tipos de nodos ocultos $UE_{HA ser}$ y $UE_{HA int}$ Fig. 3.1 a.2) para un canal real.	108
Figura 3.22: Distribuciones CQI reportados por $UE_{GA ser}$ escenario LAA LAA canal real.	109

Figura 3.23: Distribuciones CQI reportados por $UE_{HA\ ser}$ y $UE_{GA\ ser}$ coexistencia LAA LAA para escenario con un tipo de nodo oculto (Fig. 3.1 a.1)) canal ideal y canal real.	110
Figura 4.1: TCQI(5) para UE_{GA} canal real escenario LAA LAA	121
Figura 4.2: Distribución TCQI(5). Coexistencia LAA LAA, las figuras a), c) y e) corresponden al escenario con un tipo de nodo en zona oculta $UE_{HA\ ser}$. Para las figuras b), d) y f) corresponden al escenario con dos tipos de nodos en zona oculta $UE_{HA\ ser}$ y $UE_{HA\ int}$ canal real.	122
Figura 4.3: Distribución TCQI(5). Coexistencia LAA Wi-Fi, las figuras a), c) y e) corresponden al escenario con un tipo de nodo en zona oculta $UE_{HA\ ser}$. Las figuras b), d) y f) corresponden al escenario con dos tipos de nodos en zona oculta $UE_{HA\ ser}$ y $STA_{HA\ int}$. AP transmite sólo en DL.	124
Figura 4.4: RSRP vs RSRQ a) Potencia interferente variable, b) caso UE_{GA} y c) caso UE_{HA}	131
Figura 4.5: Algoritmo DCD (Dynamic Collision Detector)	134
Figura 4.6: RSRP y RSRQ vs tiempo. Las Fig. a), c) y e) corresponden a las medidas reportados por UE_{GA} . Mientras que las Fig. b), d) y f) corresponden a las medidas reportadas por el UE_{HA} . Tráfico FTP (archivos/segundo), escenario LAA LAA.	140
Figura 4.7: Las Fig. a), c) y e) muestran RSRP vs RSRQ para UE_{HA} y UE_{GA} ambos a una distancia (B, B'). Fig. b), d) y f) representan histogramas RSRQ para UE_{HA} y UE_{GA} para iguales condiciones que a), b) y c), tráfico FTP (archivos/segundo), escenario LAA LAA.	142
Figura 4.8: RSRP vs RSRQ e histogramas RSRQ. Las Fig. a), c) y e) muestran RSRP vs RSRQ para UE_{HA} y UE_{GA} a una distancia (B, B'). Fig. b), d) y f) representan los histogramas RSRQ para UE_{HA} y UE_{GA} para iguales condiciones que a), c) y e), tráfico UDP, escenario LAA LAA.	143
Figura 4.9: Número de colisiones vs tráfico λI para $UE_{HA\ ser}$. Tráfico FTP, escenario LAA LAA con un solo tipo de nodo en zona oculta.	145
Figura 4.10: Número de colisiones vs tráfico λI para $UE_{GA\ ser}$. Tráfico FTP, escenario LAA LAA con un solo tipo de nodos en zona oculta.	147
Figura 4.11: Sensibilidad y Precisión para nodos de prueba UE_{HA} y UE_{GA} . Para tráfico tipo ráfaga (FTP) y tráfico a tasa constante (UDP) para coexistencia LAA LAA con uno ($UE_{HA\ ser}$) y dos tipos de nodos ($UE_{HA\ ser}$ y $UE_{HA\ int}$) en zona oculta.	150
Figura 4.12: Número de veces que el algoritmo DCD determina que el UE_{HA} está localizado en el interior de una zona oculta. Escenario de coexistencia LAA LAA, tráfico tipo ráfaga FTP.	151
Figura 4.13: Función de densidad de probabilidad (PDF) para las medidas RSRP para los UE_{HA} y UE_{GA} . Escenario LAA LAA.	155
Figura 4.14: Función de densidad de probabilidad (PDF) para las medidas RSRQ tomadas desde UE_{HA} y UE_{GA} . Escenario LAA LAA.	156
Figura 4.15: PDF y CDF de la métrica TCQI para datos que provienen desde UE_{HA} y UE_{GA} , escenario LAA LAA.	157
Figura 4.16: PDF y CDF de la métrica PRBr para datos que provienen desde UE_{HA} y UE_{GA} , escenario LAA LAA.	158
Figura 4.17: Matriz de correlación para escenarios LAA LAA y LAA Wi-Fi.	159
Figura 4.18: Gráficas de puntos dispersos para las clases colisión y no colisión en el sub-espacio 3D, para los escenarios LAA LAA y LAA Wi-Fi. $RSRP \geq -110$ dBm.	160
Figura 4.19: Clasificador de vectores de soporte. Ejemplo en 2D.	165
Figura 4.20: Diagrama de la red neuronal para 2 capas ocultas (2 CO) y 1 salida.	168
Figura 4.21: Valor óptimo de k para el modelo kNN.	173

Figura 4.22: Pérdidas y Exactitud vs Epoch para valores de pesos (ω) optimizados, para 1 y 2 CO, con dos y tres variables de entrada.	175
Figura 4.23: ROC y AUC para diferentes algoritmos de clasificación para 3 variables de entrada.	177

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Integración de LTE licenciado y no licenciado.	14
Tabla 2.2: Categorías de Acceso (AC) definidos en EDCA	22
Tabla 2.3: Clasificación familia LBT.....	33
Tabla 2.4: Prioridad de acceso al canal para LAA [35]	34
Tabla 2.5: Comparación de Prioridades y categorías de acceso LAA y 802.11 ac/n	44
Tabla 3.1: Perfil de retardo multitrayectoria Modelo Peatonal-A (3 Km/h).....	67
Tabla 3.2: Parámetros generales de simulación	72
Tabla 3.3: Relación entre CQI, SINR, MCS y eficiencia espectral considerando un valor umbral de 10% BLER	89
Tabla 4.1: Relación entre CQI, SINR, MCS y eficiencia espectral considerando un valor umbral de 10% BLER para CQI=5	120
Tabla 4.2: Umbrales de RSRQ para diferentes marSinr y carga de celda	127
Tabla 4.3: Definición de parámetros del algoritmo DCD	133
Tabla 4.4: Parámetro adicional incorporado a la simulación	138
Tabla 4.5: Valores de los parámetros aplicados a la clase búsqueda en cuadrícula.....	174
Tabla 4.6: Precisión y sensibilidad para diferentes algoritmos de clasificación.....	178
Tabla 4.7: Tiempo de procesamiento para diferentes algoritmos de clasificación	179

Lista de Acrónimos

3GPP	Third Generation Partnership Project
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
5G NR	5G New Radio Access
5G NR-U	5G New Radio Unlicensed
AC	Access Category
ACK	Acknowledgment
AIFS	Arbitration Interframe Space
AIFSN	Arbitration Interframe Space Number
AP	Access Point
AUC	Area Under Curve
BC	Contador de backoff
BLER	Block Error Rate
CA	Carrier Aggregation
CB-MAB	Clustering Based Multi Armed Bandit
CBR	Constant Bit Rate
CC	Component Carriers
CCA	Clear Channel Assessment
CDF	Cumulative Distribution Function
CNN	Convolutional Neural Network
CO	Capas Ocultas
COT	Channel Occupancy Time
CP	Cyclic Prefix

CQI	Channel Quality Indicator
CSAT	Carrier Sense Adaptive Transmission
CSI	Channel State Information
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CW	Contention Window
DCF	Distributed Coordination Function
DCI	Downlink Control Information
DIFS	DCF Interframe Space
DL	Downlink
DMTC	Discovery Measurement Timing Configuration
DNN	Deep Neural Networks
DRL	Deep Reinforcement Learning
DRS	Discovery Reference Signals
ED	Energy Detection
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
eLAA	Enhanced LAA
eNB	Evolved Node B
FBE	Frame-Based Equipment
FCNN	Full Connected Neural Network
FDD	Frequency Division Duplexing
FDR	Full Duplex Radio
FeLAA	Further enhanced LAA
FPR	False Positive Rate
FTP	File Transfer Protocol
GBR	Guaranteed Bit Rate
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
ICI	Inter Cell Interference
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ITU	International Telecommunication Union
LAA	Licensed Assisted Access
LBE	Load-Base Equipment
LBT	Listen Before Talk
LDS	LTE-U Discovery Signal
LTE	Long Term Evolution
LTE-U	LTE in Unlicensed Band
MAC	Medium Access Control
MCOT	Maximum Channel Occupancy Time
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIB	Master Information Block

MIMO	Multiple Input Multiple Output
ML	Machine Learning
MSE	Mean Square Error
NAS	Non Access Stratum
NAV	Network Allocation Vector
NN	Neural Networks
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCell	Primary Cell
PCF	Point Coordination Function
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PCI	Physical-layer Cell ID
PD	Preamble Detection
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDF	Probability Density Function
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PF	Proportional Fair
PIFS	PCF Interframe
PRB	Physical Resource Blocks
PSCH	Primary Synchronization Channel
PSS	Primary Synchronization Signal
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QCI	Quality Channel Indicator
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technologies
RE	Resource Element
RL	Reinforcement Learning
RLC	Radio Link Control
RL-LSTM	Reinforcement Learning based on Long Short Term Memory
ROC	Receptor Operative Curve
RRC	Radio Resource Control
RRM	Radio Resource Management
RS	Reference Signal
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSS	Received Signal Strength
RSSI	Received Signal Strength Indicator

RTS/CTS	Ready to Send/Clear to Send
SCell	Secondary Cell
SDL	Supplemental Downlink
SIB	System Information Block
SIFS	Short Interframe Space
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SSCH	Secondary Synchronization Channel
SSS	Secondary Synchronization Signal
STA Wi Fi	Station Wi-Fi
TB	Transport Block
TCQI	Truncated CQI
TDD	Time Division Duplexing
TPR	True Positive Rate
TTI	Transmission Time Interval
TxOP	Transmission Opportunity
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UL	Uplink
U-NII	Unlicensed National Information Infrastructure
WLAN	Wireless LAN

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación y Objetivos

El explosivo incremento de tráfico y dispositivos móviles durante la última década [1], en conjunto con las altas velocidades de transmisión para la interfaz aire determinadas por 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) con la evolución de la red LTE (*Long Term Evolution*) y la estandarización de la quinta generación móvil (5G), generan una serie de desafíos y oportunidades para los operadores de telefonía móvil que, si son abordados correctamente, generará varios beneficios a los mismos. Con esto en mente, y para responder al incesante incremento de la demanda de tráfico móvil, considerando que el principal cuello de botella para incrementar la capacidad del interfaz aire es la poca disponibilidad de espectro licenciado, el 3GPP ha planteado el desarrollo de una tecnología que sea capaz de competir en el rango de las bandas no licenciadas. Por este motivo, ha planteado el uso de LAA (*Licensed Assisted Access*) para apalancar el ingreso de LTE en el espectro no licenciado, logrando el incremento de su cobertura y capacidad mediante el uso de celdas de menor cobertura (*small cells*) que operan conjuntamente en ambas bandas licenciada y no licenciada de una forma eficiente. En este contexto, los canales licenciados se mantienen para la portadora primaria, en donde se realiza la gestión del control y señalización, mientras que la banda no licenciada puede ser usada para servicios basados en *best effort* en función de su disponibilidad.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Uno de los principales motivos que incentiva el uso del espectro no licenciado por parte de los operadores móviles es el ahorro económico que generará el uso de este segmento del espectro libre tanto para el despliegue de 4G y más recientemente 5G NR-U (*New Radio Unlicensed*). El uso de diseños comunes a lo largo de las bandas licenciadas y no licenciadas genera eficiencia y flexibilidad en la administración de los recursos y también simplicidad en su implementación. Adicionalmente, el empleo de las bandas no licenciadas, en especial de aquellas ubicadas bajo los 7 GHz, ofrece alrededor de 2 GHz de espectro compartido que actualmente están siendo sub-utilizados por sistemas basados principalmente en IEEE 802.11.

LAA es la versión estandarizada de LTE en banda no licenciada que fue introducida por 3GPP en la Release 13, el cual emplea el algoritmo basado en sensado de portadora para acceder al medio y, de este modo, permite a los usuarios el acceso a ambos segmentos del espectro licenciado y no licenciado sobre una misma infraestructura de red LTE. LAA extiende LTE al espectro no licenciado por medio del uso de la tecnología de agregación de portadoras en conjunto con una modificación en su capa MAC (*Medium Access Control*) con la introducción del algoritmo LBT (*Listen Before Talk*) para competir en condiciones similares con otras tecnologías por el acceso al canal. La operación de LTE, que es una tecnología enfocada en la maximización de la eficiencia espectral en comparación con Wi-Fi, sobre el espectro no licenciado tiene el beneficio potencial de lograr una mejor cobertura y mayor capacidad, al mismo tiempo que permite el flujo de información de una manera fluida entre ambos espectros. Desde el punto de vista del usuario, significa una mejor experiencia de banda ancha móvil, mayores velocidades, un uso continuo de los dos tipos de banda con una mayor confiabilidad, robustez y facilidad en el acceso a la banda libre administrada por LTE. Para los operadores, LAA implica una gestión de una red asíncrona sobre los cimientos de una red síncrona como LTE, manteniendo sus sistemas de autenticación, mayor eficiencia en la utilización de recursos y menores costos operacionales.

La presencia de LTE en banda no licenciada no implica el desplazamiento de Wi-Fi, sino el incremento de la eficiencia y la capacidad en la banda libre de 5 GHz, por medio de una tecnología que está integrada completamente dentro de los operadores móviles. De hecho, se espera que Wi-Fi y LTE tengan beneficios complementarios en el momento que se logre una eficiente integración, ya que, debido a la naturaleza descentralizada del acceso al medio por parte de Wi-Fi, se genera una gran competencia entre usuarios, en especial cuando están asociados a *hotspots*, lo que induce a un elevado deterioro de su *throughput*. Por tal motivo, la inclusión de LAA en el espectro libre permitirá una mejor gestión de tráfico entre bandas licenciada y no licenciada, complementando a Wi-Fi en aquellos escenarios en donde se requiere una mejor y eficiente gestión de recursos, para aliviar la interferencia y disminuir la congestión. Adicionalmente, se pronostica que los escenarios típicos para 4G/5G en la banda no licenciada tendrán muchas similitudes con las redes Wi-Fi actualmente desplegadas, en donde características como pequeña cobertura, ambientes hostiles y baja movilidad son una premisa. Por tal motivo, se espera que la

principal aplicación de LAA será en ambientes *indoors* y *hotspots*, siendo estos escenarios en donde se centra la investigación desarrollada en la presente tesis.

El uso del espectro libre tiene un costo asociado, ya que LAA deberá compartir el espectro con múltiples tecnologías que actualmente están operando en la banda no licenciada, siendo la principal Wi-Fi. En el momento que varias redes pertenecientes a diferentes operadores con diferentes tecnologías de acceso radio RAT (*Radio Access Technologies*) comiencen a operar sobre un área geográfica común, existe una alta probabilidad de que aparezcan áreas de cobertura solapadas entre los nodos que comparten el mismo canal. Esto es, aunque los dispositivos apliquen sus respectivas técnicas para seleccionar el canal o para acceder al medio, se prevé que exista un elevado nivel de interferencia en el canal común utilizado. Esta situación puede ser más frecuente en zonas con una alta densidad de usuarios, en donde debido a altos valores de carga de tráfico y de número de dispositivos (ej. red de sensores) demandarán un uso extensivo de la banda no licenciada.

Los sistemas basados en LTE son más robustos que Wi-Fi para manejar los problemas asociados a la interferencia entre celdas (ICI) en el borde de la celda, debido a su gestión centralizada de recursos y el uso de estrategias de coordinación de la gestión de recursos radio (RRM) con nodos vecinos. Sin embargo, la pérdida de exclusividad en el uso del espectro hace que para LAA estas estrategias se vuelvan menos efectivas o disfuncionales cuando existen diferentes operadores o tecnologías compitiendo por el mismo canal y el problema se torna más complejo si existe la presencia de nodos ocultos, los cuales son una constante en redes que comparten el medio. El problema del nodo oculto es un problema típico en tecnologías que usan sensado de portadora para acceder al medio. Aparece cuando dos nodos contiguos se encuentran fuera del alcance de su respectiva área de sensado, de tal modo que no pueden detectar la presencia del otro. El problema surge cuando debido a su incapacidad de escuchar la transmisión del otro nodo, ambos nodos transmiten simultáneamente provocando colisiones sobre cualquier nodo situado en la zona de solape de coberturas. Los nodos ocultos no están asociados a una tecnología u operador específicos; al contrario, cualquier dispositivo que pueda transmitir una señal de radio en la banda no licenciada puede ser una potencial fuente de interferencia.

La presencia de nodos ocultos sobre los dispositivos UE (*User Equipment*) provoca que estos reciban ráfagas con un alto nivel de interferencia, de tal modo que cada vez que el dispositivo UE LAA recibe datos y el nodo oculto transmite las colisiones aparecen; así también, se generan amplias fluctuaciones para la SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) debido a la alternancia que se da entre colisiones y no colisiones. Bajo estas condiciones, la implementación de un *scheduling* en la estación base LTE (denominada eNodeB o simplemente eNB) que tome en consideración la coordinación/mitigación de la ICI con nodos de otros operadores o de otras tecnologías no es factible. En forma paralela, el eNB tratará de satisfacer los requerimientos de servicios de todos los UE asociados a su celda. Debido a esto, el eNB podría asignar una excesiva cantidad de recursos para los

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

nodos afectados por el terminal oculto, lo que puede conllevar una total degradación del servicio ofrecido por el eNB. Esto se debe principalmente a que los nodos ubicados en zonas ocultas se sitúan generalmente en el límite de la cobertura de la celda en donde son afectadas por fuertes interferencias, lo que genera continuas retransmisiones con el consiguiente uso excesivo de recurso radio con valores bajos de modulación y codificación. En consecuencia, los nodos ubicados en zona oculta roban recursos a los otros nodos ubicados en zonas libres de interferencias, llegando incluso a afectar el desempeño de estos últimos pese a ser ajenos a la interferencia.

A pesar de que no es posible asegurar la calidad del servicio (QoS) en banda no licenciada debido a la imposibilidad de garantizar el acceso al canal, la detección de nodos ocultos es necesaria para evitar o reducir los problemas de degradación del rendimiento de la red debido al desperdicio de recursos asociados a los nodos ubicados en zona oculta. Por lo tanto, para lograr una mejor coexistencia, minimizar la interferencia en el contexto del problema de terminales ocultos, evitar el desperdicio de recursos y optimizar el rendimiento de la red es necesario un conocimiento de cuál es el impacto que los nodos ubicados en zonas ocultas ejercen en su respectivo nodo servidor e incluso sobre el nodo interferente. En este sentido, es importante tomar ventaja de las fortalezas que posee LTE y emplear las métricas actualmente estandarizadas en esta tecnología para identificar a los nodos que están siendo afectados por terminales ocultos, haciendo posible tomar decisiones inteligentes acerca de su continuidad en la banda no licenciada.

En este contexto, esta tesis presenta un estudio detallado de cómo la presencia de terminales ocultos afecta el desempeño de la red LAA, así como de la red Wi-Fi en escenarios de coexistencia LAA LAA y LAA Wi-Fi. Así también, analiza el uso potencial de diferentes métricas de capa física reportadas por el UE para permitir la detección de UE ubicados en zona oculta. En concreto, se estudiarán parámetros como RSRP (*Reference Signal Received Power*), RSRQ (*Reference Signal Received Quality*), CQI (*Channel Quality Indicator*) y número de PRB (*Physical Resource Blocks*) para establecer cómo las malas condiciones del canal y/o las interferencias afectan a cada una de estas métricas. Estas métricas se obtienen tanto de la banda licenciada como no licenciada, pero para la detección del nodo oculto se emplean las mediciones provenientes de la banda libre. Después de este análisis se empleará una combinación de estas métricas para la implementación de algoritmos basados en técnicas de aprendizaje automático y heurístico para la detección de UE LAA que están siendo afectados por la presencia de nodos ocultos con un nivel alto de precisión. Los escenarios toman en cuenta diferentes niveles de interferencias, cargas de tráfico, condiciones de canal y movilidad de usuarios, logrando de esta manera generar datos de buena calidad que son útiles en la fase de prueba de los algoritmos desarrollados.

1.2 Contexto de la Investigación

Esta tesis ha sido desarrollada en el Grupo de Redes de Comunicaciones y Tecnologías de la Información (CENIT), en el Instituto de Ingeniería e Investigación de Aragón (I3A) y en el Departamento de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de Zaragoza.

El trabajo ha recibido el apoyo de Banco Santander por parte de las Ayudas al estudio de Doctorado para Estudiantes de Latinoamérica.

1.3 Contribuciones

La operación de LTE en banda no licenciada basada en LAA es actualmente una opción para el incremento de la capacidad de las redes inalámbricas de 4G/5G. Esta solución permite al eNB competir con otros nodos por el acceso al medio compartido. Sin embargo, el problema del terminal oculto en tecnologías que emplean el espectro libre es un obstáculo que siempre está presente, el cual debe ser manejado adecuadamente para evitar la degradación del rendimiento de la red.

La presente tesis discute los problemas que a nivel de capa MAC se generan en redes LAA por la presencia de nodos ocultos, analizando y proponiendo alternativas que, empleando los parámetros y métricas ya establecidos en el estándar LTE, permiten la detección de UE que están siendo afectados por interferencias cuya fuente son cualquier tipo de nodo oculto, antes que éstos puedan constituir un problema para la red. Por tal motivo, un adecuado entendimiento y análisis de las métricas inherentes a LAA permitirá determinar cuáles son las medidas y los rangos asociados a estas mediciones que definen si un UE está siendo afectado por las interferencias provenientes de la presencia de nodos ocultos, en forma independiente de la tecnología fuente de la interferencia.

De este modo, el análisis aquí desarrollado, a diferencia de otros trabajos, considera el uso potencial de las medidas de capa física proporcionadas por los UE y el eNB para desarrollar algoritmos que permitan la detección de UE ubicados al interior de zonas ocultas. Específicamente, se estudian las métricas reportadas por los UE tales como RSRP, RSRQ, CQI y PRB en forma aislada y en conjunto para establecer cómo las malas condiciones del canal, así como las interferencias provenientes de terminales ocultos, afectan a cada una de estas métricas. Este estudio conducirá al desarrollo de un algoritmo heurístico y soluciones basadas en aprendizaje automático.

Las siguientes condiciones deberán ser alcanzadas por las diferentes soluciones propuestas:

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

- Solo se permite el uso de métricas que ya están presentes en LTE, no se permite cambios al actual estándar LTE.
- Los escenarios considerados deberán ser similares a aquellos en los que actualmente Wi-Fi, *bluetooth* u otras tecnologías están trabajando; en donde una cobertura reducida, baja movilidad y un ambiente hostil constituyen una premisa.
- Las soluciones deben trabajar limitando el exceso de señalización entre el UE y el eNB. Así también, no se requiere la coordinación entre nodos de diferentes operadores.
- Las soluciones deberán ser independientes de la tecnología del nodo interferente. Esto implica que los algoritmos deben funcionar sin importar si la fuente de interferencia es otro nodo LAA, LTE-U, Wi-Fi o cualquier otra tecnología trabajando en la misma banda.

La presente tesis tiene las siguientes contribuciones:

Se realiza el análisis de las métricas RSRP, RSRQ, CQI reportadas por los UE y del número de PRB del eNB que se ven afectados por una gran variedad de cargas de tráfico de los nodos servidor e interferente y de condiciones de canal para un ambiente *indoor/hotspot*, que es donde se espera el mayor despliegue de la tecnología LAA. Los UE han sido clasificados en UE en zona oculta y UE en zona libre de colisión. Esta clasificación permite discernir en cada una de las métricas cuándo los valores reportados corresponden solo a malas condiciones de canal o a interferencias provenientes de terminales ocultos.

Se desarrolla un algoritmo heurístico que utiliza las métricas CQI, RSRP y RSRQ que son combinadas de una manera conveniente para permitir la detección de UE que están siendo afectados por interferencias provenientes de nodos ocultos. Esta detección es independiente de los valores umbrales que los diferentes algoritmos de ED (*Energy Detection*) puedan presentar.

Se aplican métodos de aprendizaje automático y redes neuronales para las fases de entrenamiento y puesta en marcha de soluciones basadas en la clasificación de UE afectados por colisiones y de UE libres de colisión, para cualquier dispositivo LAA operando en la banda de 5 GHz en la banda no licenciada y utilizando únicamente métricas ya definidas en el estándar LTE.

Los datos de entrenamiento han sido obtenidos por medio de una adaptación de la herramienta de simulación NS-3, desarrollada durante la realización de esta tesis doctoral. Para garantizar la generalización de resultados se ha empleado una gran variedad de escenarios, en conjunto con diferentes tipos de tráfico, intensidades de carga, movilidad de UE y tipos de canal. Es bajo estas condiciones que se ha obtenido el valor de precisión y sensibilidad en la clasificación para los diferentes algoritmos propuestos, siendo contrastados entre sí. El objetivo es determinar cuál de las diferentes soluciones presenta el mejor rendimiento, menor tiempo de decisión y menor complejidad para su implementación.

1.4 Estructura de la Tesis

El contenido de la tesis se estructura en los siguientes capítulos:

Capítulo 2: Introduce una breve sinopsis de la tecnología LTE en banda no licenciada, exponiendo cómo ha evolucionado LTE hacia su implementación en el espectro libre, indicando los escenarios posibles de implementación para esta tecnología, enfocándose en la Release 13 que es la versión abierta de LTE en banda no licenciada. Así también, se detallan las principales similitudes y diferencias que se presentan entre LAA y Wi-Fi, esto con la finalidad de ser un punto de partida para el análisis de la problemática de nodo oculto en escenarios de coexistencia homogéneos (LAA LAA) y heterogéneos (LAA Wi-Fi) que se propone en los siguientes capítulos.

Capítulo 3: Realiza una cuantificación de la degradación que la presencia de nodos ocultos genera sobre las redes LAA y Wi-Fi en escenarios homogéneos y heterogéneos mediante la herramienta de simulación. Las simulaciones correrán sobre diferentes escenarios que permiten controlar el nivel de interferencia que incide sobre los UE ubicados en el interior de la zona oculta. Posteriormente, se introduce un grupo de métricas estandarizadas en LTE con potencial uso en el análisis de nodos ocultos para, finalmente, centrar el estudio en la distribución estadística de los CQI que son generados por los UE afectados por la presencia de terminales ocultos y en la correlación entre esta distribución y el tiempo de ocupación del canal del nodo interferente.

Capítulo 4: Este capítulo toma en cuenta un canal más dinámico en donde la movilidad y las pérdidas multitrayectoria son consideradas. De esta manera, se continúa con el análisis de la métrica CQI reportada por los UE ubicados en zona oculta y zona libre de colisión en los límites de la cobertura de la celda. Así también, se procede con el análisis de otras métricas reportadas por el UE y definidas en el estándar LTE provenientes de la banda no licenciada, para evaluar los patrones que se desarrollan ante la presencia de nodos ocultos. Finalmente, se desarrollan algoritmos basados en métodos heurísticos, de aprendizaje automático y redes neuronales que permiten la detección de UE afectados por la presencia de nodos ocultos basados en las métricas estudiadas anteriormente.

Capítulo 5: Finalmente se presentan las principales conclusiones de esta tesis, así como las futuras líneas de investigación.

Capítulo 2

LTE en Banda No Licenciada y su Coexistencia con Otras Redes

2.1 Evolución de LTE en Banda No Licenciada

Se espera que para el año 2025 existirán más de 40.000 millones de dispositivos conectados [2]. Por este motivo, el organismo de estandarización 3GPP ha considerado en sus releases números 13 y 14 el uso de las bandas no licenciadas para LTE. El objetivo es buscar alternativas capaces de asumir el incremento constante de dispositivos inalámbricos y aumentar la capacidad de la red de los operadores móviles, permitiendo a estos expandir su espectro de operación en un nuevo segmento de frecuencias de acceso libre. El uso de la tecnología desarrollada por LTE en banda licenciada permitirá obtener un ahorro económico, una mejor gestión de recursos radio y una fácil implementación, de tal modo que las transmisiones en banda licenciada y no licenciada puedan ser desplegadas en forma nativa desde un mismo nodo. Su introducción supone realizar algunas adaptaciones, ya que LTE fue diseñado para tener un acceso exclusivo al canal y trabajar en una forma ininterrumpida y de manera síncrona. LTE usa un factor de reuso de frecuencia de uno, emplea una retroalimentación del estado del canal CSI (*Channel State Information*) para permitir una adaptación dinámica de los parámetros de transmisión al canal inalámbrico. Adicionalmente, un requerimiento crítico para el diseño de LTE en banda no licenciada es

CAPÍTULO 2: LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES

que tiene que coexistir con otras tecnologías ya establecidas en estas bandas de frecuencias como Wi-Fi, *Bluetooth*, *ZigBee*, etc., en una forma “justa” y “amigable” [3], [4]. Es decir, un nodo LTE operando en banda no licenciada no debería interferir a otros puntos de acceso (AP) Wi-Fi más que otro nodo AP Wi-Fi operando en el mismo canal. Wi-Fi, la tecnología predominante en banda no licenciada, tiene una gestión descentralizada y asíncrona, empleando protocolos basados en sensado de portadora para alcanzar un uso equitativo del espectro.

El espectro no licenciado ha permitido el uso de un amplio número de terminales de bajo coste, como dispositivos de monitoreo, teléfonos inalámbricos, *bluetooth*, Wi-Fi, etc. La ITU (*International Telecommunication Union*) es el organismo regulador que define a las bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). Las principales bandas son las de 2,4 GHz y 5 GHz, siendo esta última en la actualidad la menos congestionada y usada principalmente para Wi-Fi (802.11a/n/ac) [5]. Actualmente, existe un gran interés en el uso de altas frecuencias en el desarrollo de 5G [6] para alcanzar una mayor capacidad, por ejemplo, las bandas milimétricas (mmWave) tales como son las bandas de 28 y 60 GHz. La banda no licenciada de 60 GHz tiene un mayor ancho de banda que la banda de 28 GHz, sin embargo, la severa atenuación a los 60 GHz constituye un desafío por resolver.

En este momento, el uso de LTE en banda no licenciada se encuentra enfocado en la banda de 5 GHz. La Fig. 2.1 resume los rangos de frecuencias no licenciadas en la banda de 5 GHz empleados en diferentes países, donde se puede apreciar que cada país tiene su propio requerimiento para operar en este espectro. La banda de 5,15 – 5,35 GHz está disponible en EE. UU., China, Corea, Europa, Japón e India. La banda de 5,47 – 5,725 GHz está abierta para libre acceso en EE. UU., Corea, Europa y Japón. Mientras que, la banda de 5,725 – 5,85 GHz está disponible en EE. UU., China, Corea e India [7]. Las regiones marcadas en amarillo son bandas U-NII (*Unlicensed National Information Infrastructure*) propuestas para su liberación y uso en dispositivos no licenciados a futuro, ya que actualmente la banda de 5,35 – 5,47 GHz se solapa con varios sistemas de radar, mientras que la banda de 5,85 – 5,925 GHz se superpone con el espectro asignado al sistema de transporte inteligente.

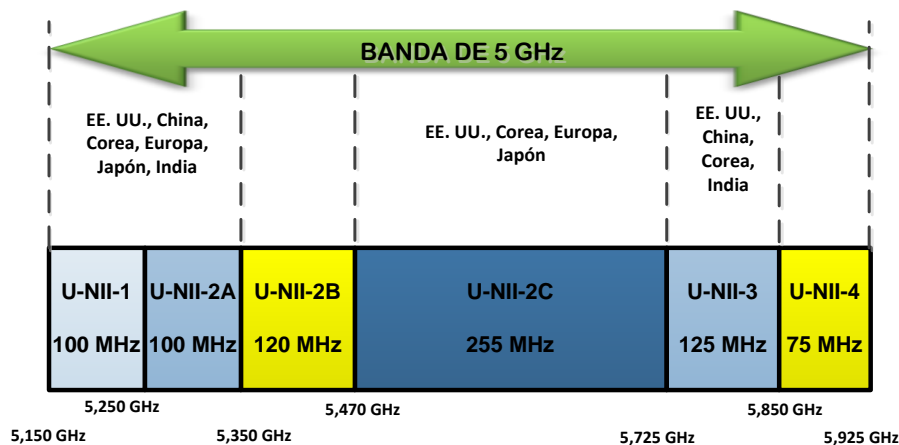


Figura 2.1: Espectro y regulaciones para la banda no licenciada de 5 GHz

Como se aprecia en la Fig. 2.1, no existe uniformidad en los organismos de regulación locales para el acceso al canal no licenciado. Por tal motivo, cada país establece su propio conjunto de requerimientos para el uso de este segmento del espectro. Al considerar las políticas para el acceso en banda licenciada de cada país, existen algunos mercados tales como Europa y Japón en donde para cumplir el requerimiento de coexistencia justa y amigable exigen la implementación de técnicas de acceso basados en sensado de la portadora tales como LBT durante el CCA (*Clear Channel Assessment*). De este modo, el 3GPP introduce en la release 13 la especificación LAA [3] para el uso de la banda no licenciada en el DL (*Downlink*), denominada SDL (*Supplemental Downlink*). En la release 14 de la 3GPP el uso de la banda no licenciada se extiende al UL (*Uplink*), denominándose eLAA (*Enhanced LAA*) [8], mientras que en la release 15 se estandariza la transmisión en uplink conocida como FeLAA (*Further enhanced LAA*), usando subtramas parciales y la transmisión autónoma en UL [9]. Todas estas soluciones se desarrollan en un contexto de agregación de portadoras CA (*Carrier Aggregation*), en el que cada celda mantiene obligatoriamente una portadora primaria en banda licenciada, soportando todos los procedimientos de gestión y tráfico con QoS, y las transmisiones en bandas no licenciadas corresponden a portadoras secundarias, habilitadas para extender la capacidad. Por otro lado, en otras regiones tales como EE. UU., China, India y Corea no consideran el requerimiento de coexistencia amigable LBT. Para estos mercados que no requieren LBT, el *Forum LTE Unlicensed* especifica una solución propietaria para LTE en banda no licenciada basada en la release 12 del 3GPP, la cual es referida como LTE-U [10], y al igual que su contraparte LAA ha adoptado las funcionalidades definidas en las releases 3GPP 14 y 15. Finalmente, la alianza MulteFire [11] propone una solución para LTE en banda no licenciada que opera en modo *standalone* (sin necesidad de mantener una portadora en banda licenciada) en el espectro libre utilizando las recomendaciones dadas por 3GPP releases 13 y 14 usando LAA. En esta tesis, se usa el término LTE no licenciado como el paraguas que cubre todas las implementaciones de LTE en el espectro libre. De estos tres métodos para la operación de LTE en banda no licenciada, LAA y LTE-U son las que mayor acogida han tenido en el mercado debido a que ambas tecnologías usan la misma red de acceso radio (RAN) tanto en la banda licenciada como en la no licenciada y soportan agregación de portadoras.

De manera general, se espera que LTE en banda no licenciada será desplegada mayormente en topologías con nodos de baja potencia (*small cells*), usualmente en ambientes *indoor* tal como sucede con las tecnologías Wi-Fi. Adicionalmente, LTE no licenciado puede ser ubicado conjuntamente con macro celdas, que deberá ser desarrollado con cuidado debido a las características de propagación en el espectro de 5 GHz.

Finalmente, los esfuerzos enfocados en mejorar las comunicaciones celulares en banda no licenciada no están limitados a LTE, y han continuado con el desarrollo en 5G de un nuevo acceso radio (5G NR). El 3GPP ha estandarizado NR (*New Radio*) en el espectro no licenciado (NR-U) a partir de la release 16 [12]. 5G NR-U es considerado para las operaciones basadas en LAA, en modo *standalone* en bandas inferiores a 7 GHz y en el

CAPÍTULO 2: LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES

espectro de bandas milimétricas mmWave [13]. La Fig. 2.2 [14] permite tener una visión general de la evolución de las tecnologías LTE no licenciadas por parte del 3GPP.

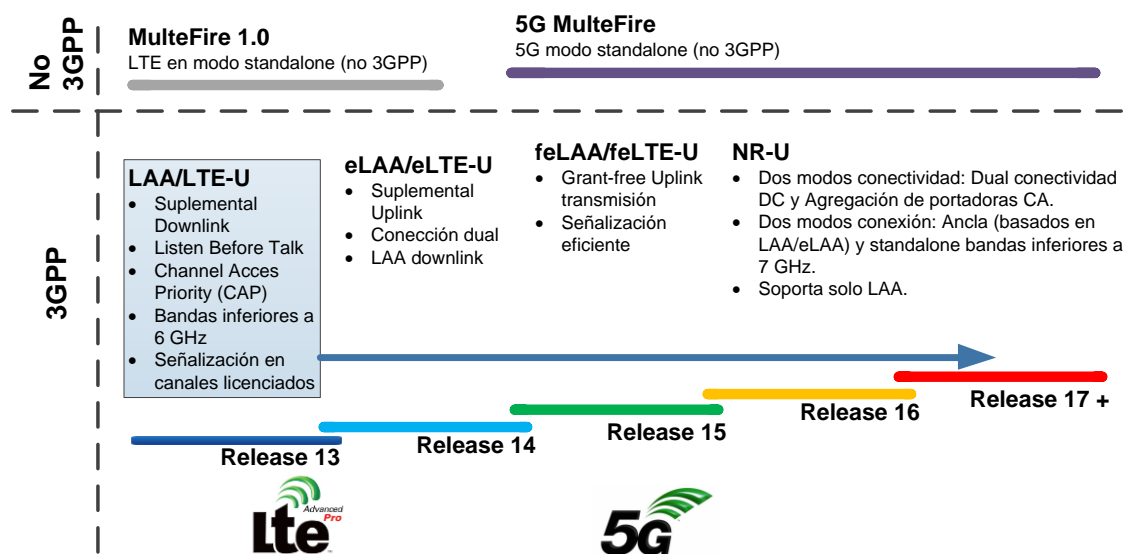


Figura 2.2: Evolución de los estándares 3GPP para bandas no licenciadas.

2.1.1 Integración de LTE licenciado y LTE no licenciado

Tanto LAA como LTE-U aplican las consideraciones indicadas en 3GPP en las releases 13 SDL, 14 y 15 (uso de *Downlink/Uplink*) empleando agregación de portadoras. Como se ha comentado y tal como se muestra en la Fig. 2.3, el 3GPP considera 3 modos de operación para 4G/5G en banda no licenciada siendo estos: a) SDL, b) Agregación de portadora con UL habilitado en banda no licenciada, y c) *Standalone*. Debido a que LTE LAA es un estándar abierto y definido por el 3GPP se espera que este se convertirá en un estándar global y que cumplirá con los requerimientos de los organismos de regulación, a pesar de su tardía introducción en el mercado a diferencia de LTE-U. Por este motivo, el trabajo de investigación desarrollado en esta tesis se centrará en la tecnología LAA tal como se encuentra detallada en la release 13, en donde sólo se considera el enlace *downlink* para el uso del espectro no licenciado.

Debido a las limitaciones en relación con la potencia de transmisión que existen en el espectro no licenciado, las tecnologías LAA y LTE-U son más adecuadas para zonas de limitada cobertura. Estas áreas son las que más interés originan en los operadores para el despliegue de nuevas redes, lo cual permite el acceso a ambos espectros, licenciado y no licenciado, para ambientes *indoor* o *hotspots outdoor*. En general, se puede decir que LTE en banda no licenciada es un caso especial de agregación de portadoras en el que la portadora primaria usada como celda primaria PCell (*Primary Cell*), también conocida como el ancla, usa el espectro licenciado y la(s) portadora(s) secundaria(s) usadas como celdas secundarias SCells (*Secondary Cells*) están en el espectro no licenciado [15].

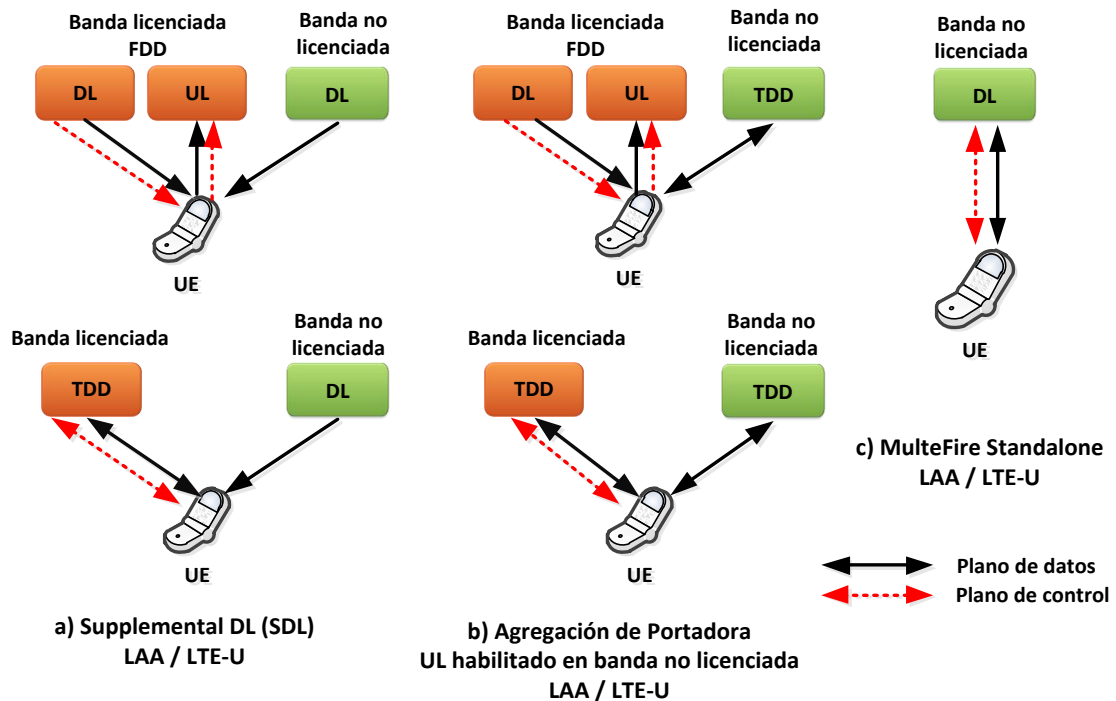


Figura 2.3: Integración LTE licenciado y LTE no licenciado y modos de operación.

La Fig. 2.3 muestra los 3 modos de operación definidos por 3GPP para la operación de LTE en banda no licenciada y la manera como se realiza la integración entre el espectro licenciado y no licenciado en cada modo de operación. En la release 13, que se corresponde con la Fig. 2.3 a), la celda primaria gestiona el plano de control para ambas portadoras, y por tanto es muy importante para la asignación de tráfico, pudiendo agregar o eliminar dinámicamente SCell(s). La PCell es también usada para el tráfico de datos en el UL y DL del espectro licenciado. La SCell está limitada a la transmisión de datos de usuario, en donde se permite el acceso de datos sólo en el enlace descendente (*Supplementary Downlink*), mientras que el control y el UL se desarrolla en el espectro licenciado. En las releases 14 y 15 Fig. 2.3 b), también es posible una implementación completa de CA en la banda no licenciada, en donde los enlaces UL/DL son utilizados para la transmisión de datos, mientras que el plano de control permanece en el espectro licenciado. En este caso, las portadoras primarias pueden emplear duplexación por división de frecuencia (FDD) o de tiempo (TDD), mientras que las portadoras secundarias usan TDD. En otra configuración, como se muestra en la Fig. 2.3 c), el espectro no licenciado puede operar en un modo *standalone* con todas sus portadoras operando en la banda no licenciada. Esta alternativa ha sido propuesta por la alianza *MulteFire*, compuesta por Nokia y Qualcomm, no formando parte de las propuestas de 3GPP.

Centrándonos en la release 13, contexto en el que se iniciaron los trabajos de esta tesis, para maximizar la contribución de las portadoras combinadas, la PCell usualmente es usada para tráfico GBR (*Guaranteed Bit Rate*). Además, la portadora primaria es usada para la gestión de la movilidad en estado *Idle* y activo, y todos los procedimientos de configuración

CAPÍTULO 2: LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES

y gestión del acceso en la interfaz radio (registro, autenticación, etc.) Las SCells pueden ser usadas por el operador para transmitir tráfico de una forma oportunista, ya que debido a su naturaleza no se puede garantizar un nivel de calidad de servicio (QoS), pues el canal es compartido con otras tecnologías que operan en el mismo espectro, siendo utilizadas especialmente para incremento de capacidad en tráfico en DL, en conjunto con una política de balanceo de carga [7]. La Tabla 2.1 resume las características principales de LTE en banda licenciada y no licenciada cuando operan en configuración de CA.

Tabla 2.1: Integración de LTE licenciado y no licenciado.

LTE licenciado	LTE no licenciado
Celda primaria, ancla para SCell	Celda secundaria
FDD o TDD	TDD (si UL y DL)
Preferido para tráfico GBR en UL/DL	Preferido para tráfico DL
QoS garantizado	<i>Best Effort</i>
Soporta movilidad	Uso oportunista

Como se mencionó anteriormente, la principal aplicación de LTE en banda no licenciada será en nodos de baja potencia (*small cell*). El 3GPP en su TR 36.889 ha previsto cuatro escenarios para el despliegue de LAA para *small cells* [3], asociadas a nodos de baja potencia (por ejemplo, pico celdas) en el contexto de 4G y 4.5G como se ilustra en la Fig. 2.4.

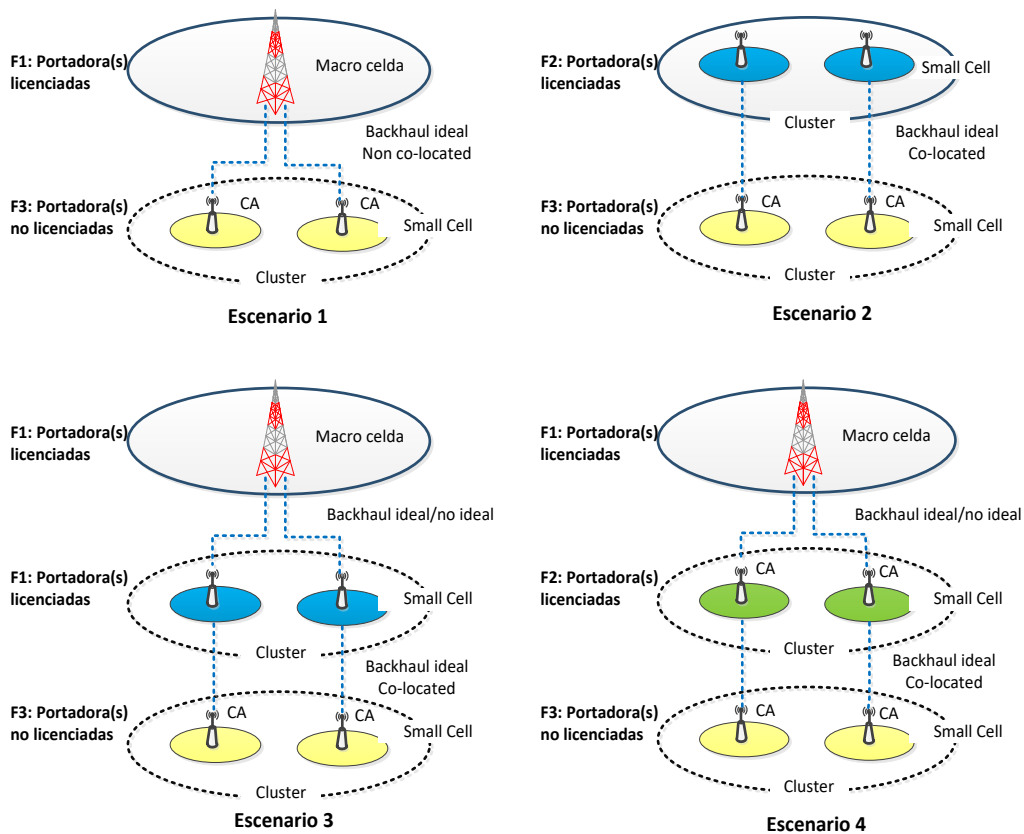


Figura 2.4: Diferentes escenarios considerados por la 3GPP para despliegue en banda no licenciada para LTE-LAA.

- Escenario 1: Agregación de portadora entre macro celda utilizando banda licenciada (Pcell portadora F1) y la *small cell* utilizando la banda no licenciada LAA (portadora F3).
- Escenario 2: Agregación de portadora entre la *small cell* licenciada (F2) y la *small cell* no licenciada LAA (portadora F3) sin cobertura de una macro celda PCell. Su uso más común será en ambientes *indoor*.
- Escenario 3: Macro celda y *small cell* utilizando la portadora licenciada (Pcell F1), con CA en los nodos de baja potencia entre la portadora licenciada (F1) y la no licenciada LAA (F3).
- Escenario 4: Macro celda utilizando portadora licenciada F1 y la *small cell* utilizando portadora licenciada F2. El nodo de baja potencia aplica agregación de portadora entre la portadora licenciada (F2) y una portadora no licenciada LAA (F3).

Como se puede apreciar, la implementación de LAA abarca escenarios con y sin coberturas de macroceldas, implementaciones en interiores y exteriores y escenarios *co-located* y *non-located* (con *backhaul* ideal) entre bandas licenciadas y no licenciadas. El término *co-located* se refiere a que las tecnologías que operan en la banda licenciada y no licenciada están ubicadas sobre el mismo equipo físico. Para la opción *non co-located* cada equipo físico tiene una sola tecnología LTE ó LAA habilitada. Es importante resaltar que el *backhaul* (enlace de conexión) entre las *small cells* y la macrocelda puede ser ideal o no ideal, pero cuando la agregación de portadoras se produce entre la *small cell* operando en banda sin licencia y la macrocelda, el *backhaul* debe ser ideal. Sin embargo, cuando la agregación se produce en la *small cell*, el *backhaul* entre la *small cell* y la macro puede ser tanto ideal como no ideal (escenarios 3 y 4). El término *backhaul* ideal se refiere a enlaces dedicados punto a punto usando fibra óptica o enlaces con línea de vista (LOS), donde la latencia es menor que 2,5 μ s y el *throughput* del orden de los Gbps, tal como se encuentra definido en la Tabla 6.1-2 de [16]. Cualquier otro tipo de *backhaul*, con mayor latencia, es no ideal. La opción de escenario dependerá de la disponibilidad del *backhaul* ideal por parte del operador.

Durante los últimos años, los operadores celulares han sido testigos de cómo la topología de la red celular ha cambiado desde aquellas en la que la cobertura era el factor primordial a considerar en un despliegue, hasta aquellas en las que incrementar la capacidad es el criterio dominante, traducándose en el despliegue de celdas de menor cobertura (*small cells*), o lo que es lo mismo, nodos de baja potencia, en LTE y 5G [17] [18]. Así también, en el caso de banda no licenciada, las diferentes *small cells* podrán ser desplegadas no solo por el operador sino también de forma independiente por parte de un usuario/cliente (es el caso de las femtoceldas), requiriéndose en este caso la existencia de un enlace *backhaul* que conecte el nodo del usuario con la infraestructura de red del operador celular. Por este motivo, el escenario seleccionado para los análisis en esta tesis es el escenario 2, tal como se indica en la Fig. 2.4, en donde los nodos de baja potencia desplegados en ambientes *indoor* o *hotspots* pertenecientes a uno o varios operadores son el principal escenario de despliegue previsto para operaciones en banda no licenciada.

CAPÍTULO 2: LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES

En forma similar que 4G, el 3GPP ha evaluado la necesidad de incorporar el espectro no licenciado en 5G. Por este motivo, se desarrolla 5G NR-U que en un principio compartirá las bandas UNII no licenciadas menores a los 7 GHz con LTE LAA y con sistemas basados en 802.11. La especificación de 5G NR-U comparte características comunes con LAA tales como el uso de LBT, ventanas de contienda, tiempos máximos de ocupación del canal y uso de NACK para la adaptación de ventanas de contienda entre otras como punto de referencia para el diseño del método de acceso de NR-U, adaptado a las particularidades de 5G [13] [19]. Por este motivo esta tecnología también enfrentará el problema de terminales ocultos y en consecuencia las lecciones aprendidas en LAA serán aplicables en el contexto de 5G NR-U [20]. Adicionalmente, tal como sucedió entre LTE y LAA, la operación conjunta de 5G y 5G NR-U permite un diseño común entre las bandas licenciadas y no licenciadas ya que, por ejemplo, se puede emplear igual numerología en la capa física, múltiples esquemas de acceso, estructura de trama, codificación, lo que permite una menor complejidad, mejor integración y convergencia. De igual manera, tanto para 5G NR-U como LAA, el espectro licenciado puede trabajar como PCell para tráfico de alta prioridad en donde se requiere garantizar cierto nivel QoS mientras que el espectro no licenciado es usado en forma oportunista como espectro suplementario para transferencia de tráfico (*offloading*) desde la banda licenciada, tal como se muestra en la Fig. 2.5 [21] [22].

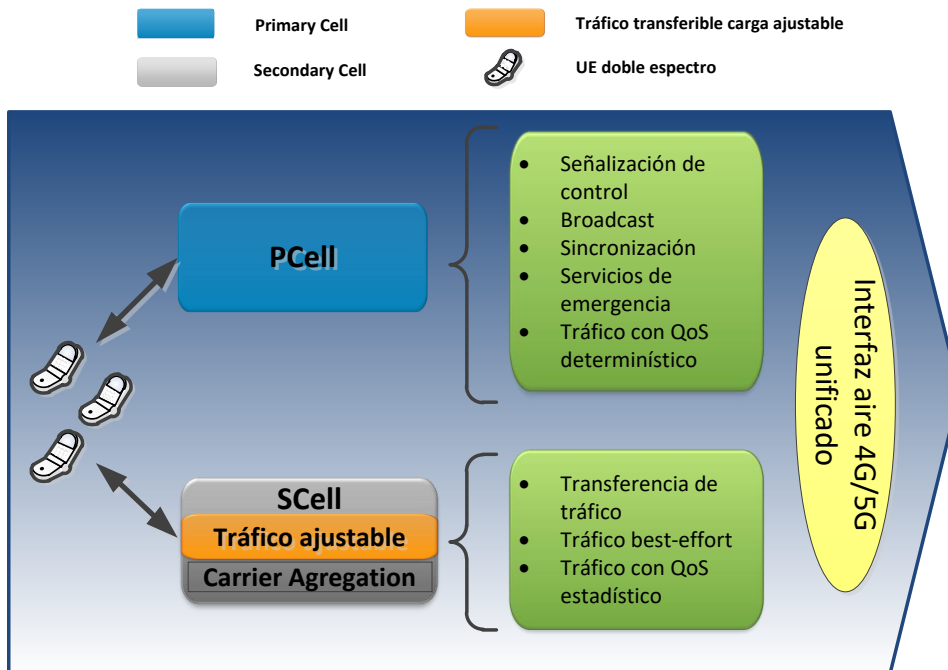


Figura 2.5: Operación conjunta en bandas licenciada y no licenciada para 4G/5G.

En esta tesis, aunque la investigación está centrada en LAA, también se mencionan aspectos básicos LTE-U, ya que al momento representan las dos tecnologías más prometedoras y con mayor difusión en relación con las tecnologías LTE en banda no licenciada. Además, como paso previo se incluye una breve descripción de los aspectos relevantes de la interfaz radio de LTE a tener en cuenta en el desarrollo de la tesis. Así también, puesto que LTE comparte espectro con otras tecnologías, siendo la más

representativa de ellas Wi-Fi, se describen brevemente los aspectos más relevantes de esta tecnología a tener en cuenta en las evaluaciones de coexistencia que se desarrollarán en esta tesis y así tener un punto de referencia de las diferencias entre tecnologías.

2.1.2 Tecnología IEEE 802.11 (Wi-Fi)

La tecnología predominante en la banda no licenciada y que ha sido considerada para evaluar la coexistencia entre redes que operan en el espectro libre y realizar comparaciones de tecnologías es IEEE 802.11. El estándar IEEE 802.11, conocido como Wi-Fi, define la arquitectura y especificaciones para las WLAN (*Wireless LAN*), permitiendo dos modos de operación para la comunicación entre dos clientes inalámbricos, también denominados estaciones (STA). 1) Red Ad-Hoc: las STA se comunican directamente 2) Red de Infraestructura: las STA se comunican entre sí utilizando un punto de acceso (AP Wi-Fi) que proporciona además conectividad con la red cableada.

En esta tesis nos centramos en el modo infraestructura y, en concreto, se analizará el estándar 802.11n con un canal de 20 MHz en la banda de 5 GHz. A continuación, se detalla un resumen de las características principales asociadas a esta tecnología.

a) *Wi-Fi Mac Protocol*. – La capa MAC de Wi-Fi se basa en el mecanismo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access con Collision Avoidance*) con *beacons* periódicos generados por el AP [23], por lo que un sistema Wi-Fi no requiere un controlador centralizado como es el caso de LTE. El mecanismo CSMA/CA aplicado en la capa MAC es también conocido como DCF (*Distributed Coordination Function*). Si un dispositivo Wi-Fi tiene datos que transmitir, primero sensa el canal y, si el medio es evaluado como ocupado, la capa MAC difiere la transmisión hasta que el medio es evaluado como libre. Cuando el canal pasa a estar libre debe asegurarse de que sigue libre durante un período de tiempo DIFS (*DCF Interframe Space*), y posteriormente espera un tiempo aleatorio (algoritmo de *backoff*) tras el cual se procede a la transmisión de datos siempre que el canal siga libre. En el caso de que el canal se encuentre libre en el momento de requerirse la transmisión y no existe un procedimiento de *backoff* en ejecución, simplemente se espera un tiempo DIFS y se procede con el envío de datos. Cuando el dispositivo Wi-Fi receptor recibe correctamente una trama de datos, espera un tiempo SIFS (*Short Interframe Space*) y manda la confirmación pertinente (ACK). SIFS es más pequeño que DIFS para proporcionar prioridad a los envíos de los ACK respecto a otros nodos que estuviesen a la espera de que el canal quede libre para transmitir sus tramas de datos.

Los diferentes tiempos entre tramas, incluido DIFS, se definen en función del valor de SIFS y del denominado *aSlotTime* o *slot time*, otro tiempo considerado por el estándar es PIFS (*PCF Interframe*), el cual es igual a SIFS + *aSlotTime* y es usado por el AP en el modo PCF (*Point Coordination Function*), definido como opcional en el estándar, para conseguir el acceso al medio para enviar las balizas (*beacons*) utilizadas para

CAPÍTULO 2: LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES

indicar su presencia y las características de la red. La duración de PIFS es menor que DIFS y mayor que SIFS ($DIFS > PIFS > SIFS$). Si un dispositivo Wi-Fi transmite una trama y no recibe confirmación en un tiempo determinado, dará la trama por perdida, procediendo a su retransmisión. Para ello inicia de nuevo el proceso de sensado del canal.

- b) *Algoritmo de backoff.* – Como se ha comentado, el protocolo DCF espera un tiempo DIFS y un intervalo aleatorio de *backoff* cuando el canal es evaluado como ocupado. Para realizar el proceso de *backoff*, el dispositivo Wi-Fi configura el contador de *backoff* seleccionando un número entero utilizando una distribución uniforme en el intervalo $[0, CW]$, siendo *CW* (*Contention Window*) el tamaño de la ventana de contienda actual. Dicho contador representa el número de slots de tiempo ($9 \mu s$) que debe esperar. Es decir, el nodo Wi-Fi decreta en uno este contador por cada slot de tiempo ($9 \mu s$) que el canal se encuentre libre. Si el medio está ocupado, la estación detiene el decremento del contador de *backoff* hasta que finalice la transmisión que ocupa el canal. La transmisión del paquete de datos se efectúa cuando el contador alcanza el valor 0. El valor de la ventana actual (*CW*) se encuentra entre un mínimo (CW_{min}), cuyo valor se dobla cuando la estación detecta colisiones o no recibe respuestas ACK asociadas a los paquetes que envía, y un límite máximo (CW_{max}). Si se alcanza el límite de retransmisiones infructuosas de un paquete, se resetea la *CW* a CW_{min} y el paquete es descartado. Destacar que un nodo Wi-Fi utiliza el intervalo EIFS antes de transmitir, en lugar del DIFS, cuando detecta el medio libre tras haber recibido una trama errónea. El esquema básico de acceso de IEEE 802.11 se muestra en la figura Fig. 2.6 [24].

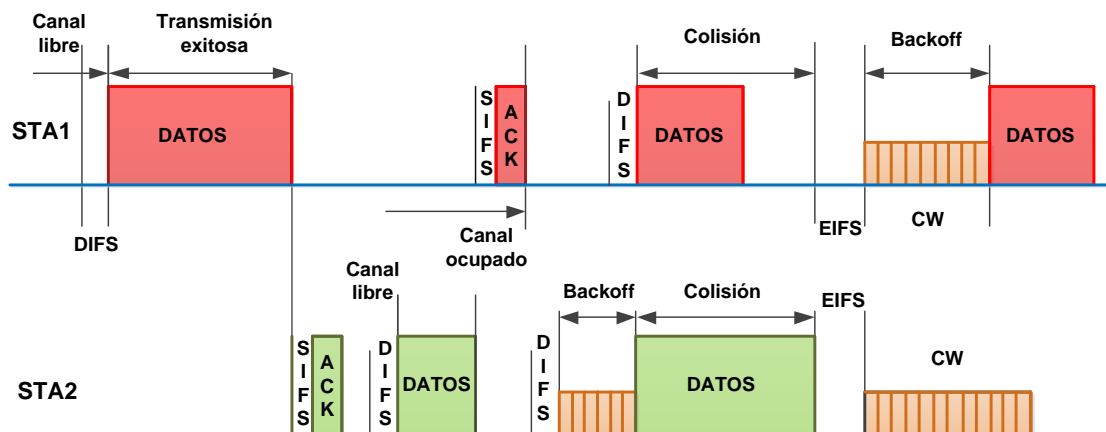


Figura 2.6: Mecanismo básico de acceso de IEEE 802.11.

- c) *Detección de Energía (ED).* – El sensado del canal se realiza por medio de detección de energía durante el CCA. Los dispositivos de forma general tienen configurado un valor umbral de ED igual a -62 dBm para detectar otros RAT presentes en el canal compartido. La detección de señales de preámbulo PD (*Preamble Detection*) para tramas 802.11 está configurado a -82 dBm. El ajuste de estos parámetros tiene una incidencia en la capacidad del AP Wi-Fi de detectar la presencia de nodos de diferentes

tecnologías en su entorno, ya que niveles de señal menores que -62 dBm no serán detectados por el nodo, lo cual afecta directamente a la aparición de terminales ocultos. Además, al tener dos niveles de detección de energía (ED y PD), se crean dos niveles de cobertura. En el rango $[-82\text{dBm}, -62\text{dBm}]$ en ausencia de otras transmisiones Wi-Fi se mantiene la transmisión de la señal Wi-Fi aun cuando se producen transmisiones simultáneas desde otros nodos, lo que impacta sobre la coexistencia entre diferentes tecnologías como se explica más adelante.

- d) *Esquema de modulación y codificación de canal.* – El modelo usado en esta tesis cumple con el estándar 802.11n, con un MIMO 2×2 y un MCS (*Modulation and Coding Scheme*) máximo igual a 15 para un intervalo de guarda igual a 400 ns. Adicionalmente, se emplea un algoritmo adaptativo ideal para controlar la tasa de transmisión, el cual selecciona el mejor *throughput* en función de la SINR del anterior paquete enviado. El valor de SINR es enviado desde el receptor hacia el transmisor embebido en el mensaje de ACK. El AP usa la información de SINR para seleccionar la velocidad de transmisión basándose en un grupo de valores umbrales de SINR.
- e) *Resolución del problema de terminal oculto.* – Adicionalmente, el protocolo puede usar las señales de reserva RTS/CTS (*Ready to Send/Clear to Send*) para evitar las colisiones ocasionadas por la presencia de nodos ocultos Wi-Fi. La Fig. 2.7 muestra el uso de señales RTS/CTS. En este escenario el nodo A y el nodo C son nodos ocultos que desean transmitir, de modo que el nodo A envía una señal RTS al nodo receptor B, de tal modo que este nodo responderá con una señal CTS indicando que está dispuesto a recibir los datos (n). La señal RTS contiene la información de la cantidad de datos a transmitir y en forma equivalente la señal CTS recibe e incluye esta información en su trama. Al momento que estas señales se intercambian, cualquier nodo que fue capaz de escuchar, retrasa sus transmisiones el tiempo indicado en las tramas RTS(n)/CTS(n). De esta manera tanto el nodo X como el nodo C son conscientes de la transmisión de A hacia B y retrasan cualquier intento de transmisión. En el caso del nodo C lo retrasa el tiempo previsto hasta la recepción del CTS, de tal modo que si no recibe el CTS podría empezar a transmitir, y el nodo X hasta la finalización de la transmisión de los datos enviados por A a B. Como se ilustra en la Fig. 2.7, el terminal A ya no está oculto para C. Concluido el intercambio de señales, el nodo A procede a transmitir sus datos.

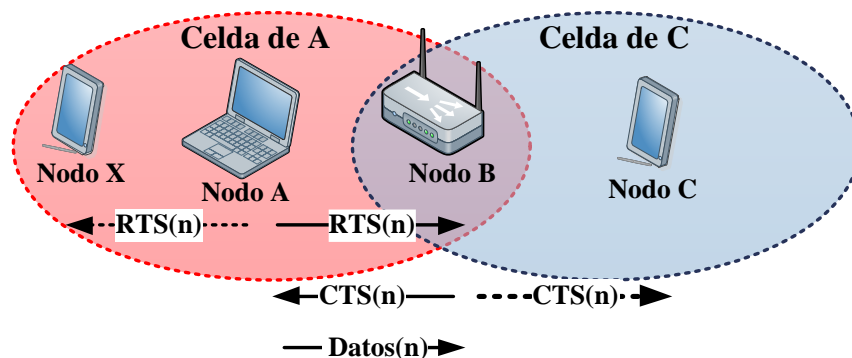


Figura 2.7: Mecanismo básico de acceso de IEEE 802.11

CAPÍTULO 2: LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES

Las señales de RTS/CTS, al igual que los ACK, se transmiten tras un período de tiempo menor que DIFS, denominado SIFS, que es igual a $16 \mu\text{s}$ en la banda de 5GHz. La Fig. 2.8 muestra el mecanismo de funcionamiento de RTS/CTS. Las señales de RTS, CTS y ACK incluyen el campo “Duración” en sus cabeceras, de tal modo que, si una estación decodifica estas tramas, será capaz de determinar cuándo el canal estará nuevamente disponible sin la necesidad de evaluar constantemente el medio. Este tiempo que la estación no sensa el medio se denomina NAV (*Network Allocation Vector*), existiendo un NAV(RTS) y NAV(CTS) en función de la señal procesada (RTS o CTS) por la STA.

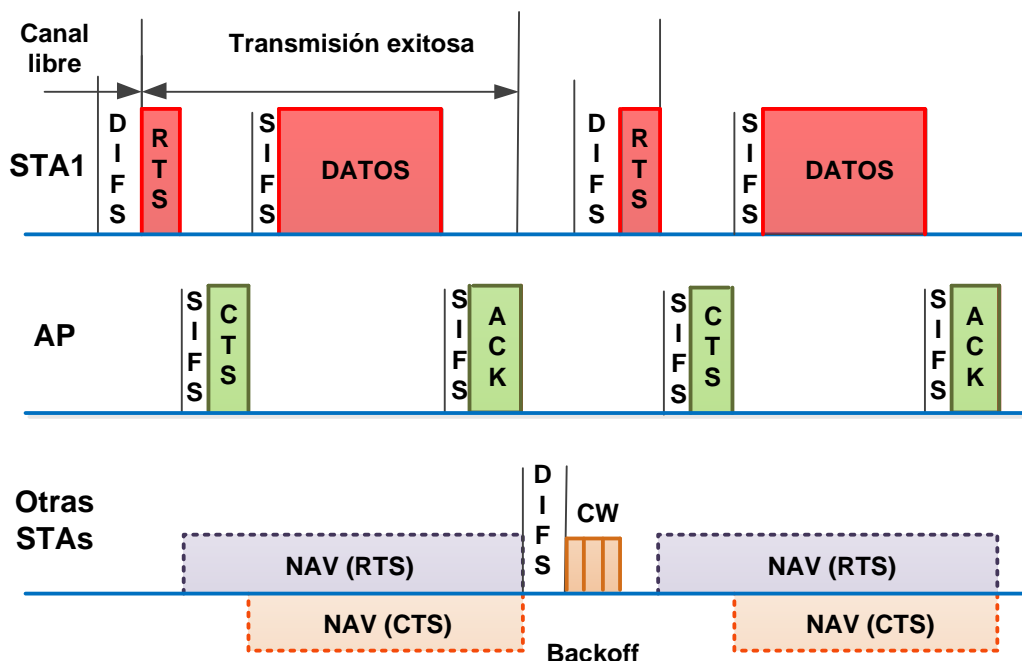


Figura 2.8: Mecanismo RTS/CTS de acceso de IEEE 802.11

Sin embargo, al mismo tiempo que las señales RTS/CTS tratan de resolver el problema de terminal oculto en las redes CSMA, este mecanismo crea nuevos problemas derivados de la interacción entre las señales de control y los datos transmitidos, que en casos de redes WLAN densas puede generar un exceso de señalización y congestión sobre la red CSMA, de tal modo que los nodos son incapaces de transmitir sus paquetes por periodos largos de tiempo, lo que conduce a una reducción de capacidad de la red [25], [26].

- f) *Calidad de servicio en redes Wi-Fi.* – El mecanismo que gestiona la QoS y permite la diferenciación de servicios en redes 802.11, introducido en la especificación 802.11e, se llama EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*). EDCA presenta cuatro categorías de acceso (AC) por sus siglas en inglés, para proveer diferente QoS en función de la prioridad del tráfico. Las categorías son, comenzando con la de mayor prioridad: Voz (VO), Video (VI), *Best effort* (BE) y *Background* (BK). Esto permite que cada trama que arriba a la capa MAC sea asignada, de acuerdo a su prioridad, a una AC apropiada. Existen cuatro colas, una para cada tipo de AC, tal como lo ilustra la

Fig. 2.9. La diferenciación del tráfico es alcanzada por medio de la configuración de parámetros de acceso, los cuales toman diferentes valores dependiendo del tipo de AC. Los parámetros son: el AIFSN (*Arbitration InterFrame Space Number*), la CW donde existen dos límites (CW_{min} y CW_{max}) y el TxOP (*Transmission Opportunity*) [27], [28].

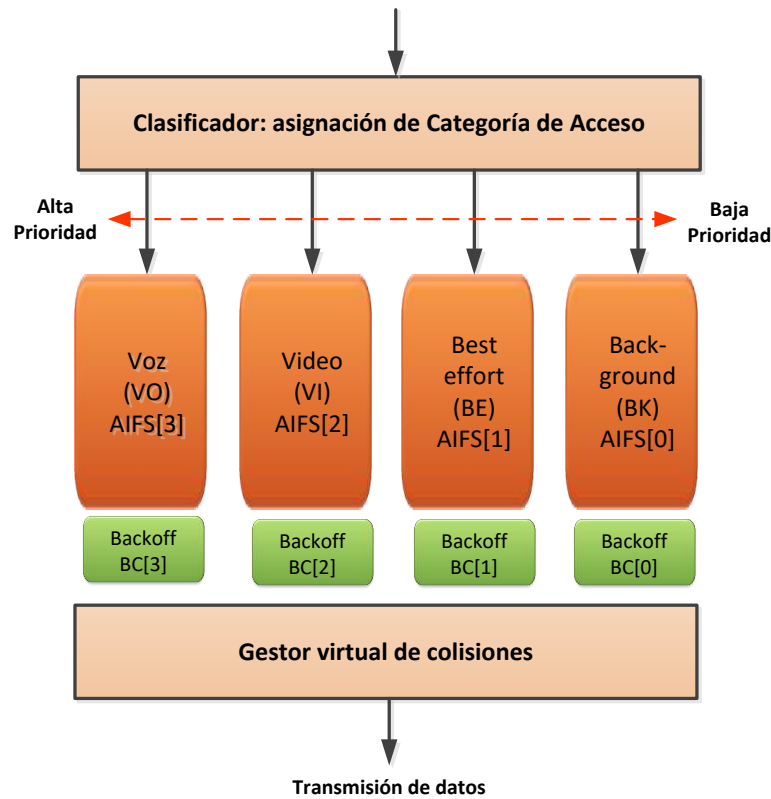


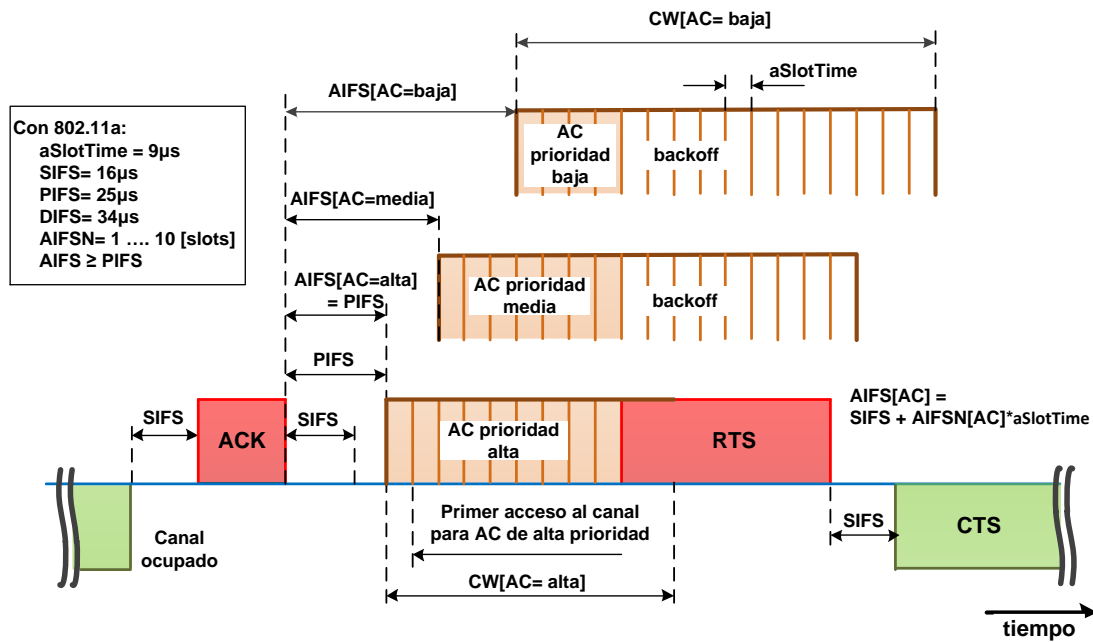
Figura 2.9: Asignación de Categorías de acceso (CA) en EDCA.

El AIFS es la cantidad de tiempo que una estación debe sentir el canal *Idle* antes de decrementar su contador de *backoff* (BC) o intentar una transmisión. El TxOP indica el máximo intervalo de tiempo que una estación (STA) Wi-Fi tiene el derecho de comenzar una transmisión ininterrumpida de tramas consecutivas y las ventanas de contención CW_{min} y CW_{max} son usadas por el contador *backoff*, el cual selecciona un número del rango $[1, CW+1]$ en vez de $[0, CW]$ como lo realiza con DCF. Básicamente, EDCA define parámetros como $AIFS[AC]$, $CW_{min}[AC]$, $CW_{max}[AC]$ en vez de DIFS, CW_{min} y CW_{max} definidos en DCF, respectivamente, para la fase de contienda en función a la AC de la trama. La $AIFS[AC]$ es igual a:

$$AIFS[AC] = SIFS + AIFSN[AC] * slotTime$$

donde, $AIFS[AC]$ es un valor entero mayor a cero. La Fig. 2.10 muestra una comparativa entre los valores de $AIFS[AC]$, SIFS y PIFS conforme a lo definido por 802.11e y DCF. En cambio, la Tabla 2.2 muestra los valores de los parámetros definidos en EDCA en función de AC. Los parámetros asignados a cada AC estadísticamente priorizan el acceso al canal a tramas con mayor valor de AC sobre otras.

CAPÍTULO 2: LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES



DCF: Contador *backoff* aleatorio es seleccionado del intervalo 0...CW.

El mínimo espacio *interframe* es DIFS.

El primer acceso al canal es asignado después de un DIFS.

EDCA: Contador *backoff* aleatorio es seleccionado del intervalo 1...CW+1.

El mínimo espacio *interframe* es PIFS.

El primer acceso al canal es asignado después de un DIFS.

Figura 2.10: Comparación entre AIFS[AC] definidos en EDCA con SIFS, PIFS.

Tabla 2.2: Categorías de Acceso (AC) definidos en EDCA

Prioridad	AC	AIFSN	CWmin	CWmax	Designación
Mayor	VO	2	7	15	Voz
	VI	2	15	31	Video
	BE	3	31	1023	<i>Best effort</i>
Menor	BK	7	31	1023	<i>Background</i>

2.1.3 Interfaz aire LTE

Las redes LTE se basan en la técnica de capa física OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), empleando OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) como técnica de acceso al medio para el enlace descendente (DL). A rasgos generales, el ancho de banda total del sistema se divide en N_{FFT} subportadoras OFDM ortogonales, separadas entre sí Δf Hz. Cada una de estas subportadoras puede transportar un símbolo de datos distinto con una modulación diferente, lo que permite adaptar la transmisión de cada símbolo a las condiciones de canal.

OFDMA permite el reparto de recursos radio en dos dimensiones (tiempo y frecuencia), lo que se refleja en la distribución de diferentes subportadoras o bloques de subportadoras entre diferentes usuarios en el mismo intervalo de tiempo. De este modo, múltiples usuarios tienen una asignación de diferentes recursos espectrales, los cuales están

adaptados a las condiciones del canal, a la calidad de servicio y al tipo de tráfico demandado por cada usuario, lo que permite tener un sistema robusto en relación a problemas de desvanecimientos selectivos en frecuencia y eficiente en términos de diversidad multiusuario.

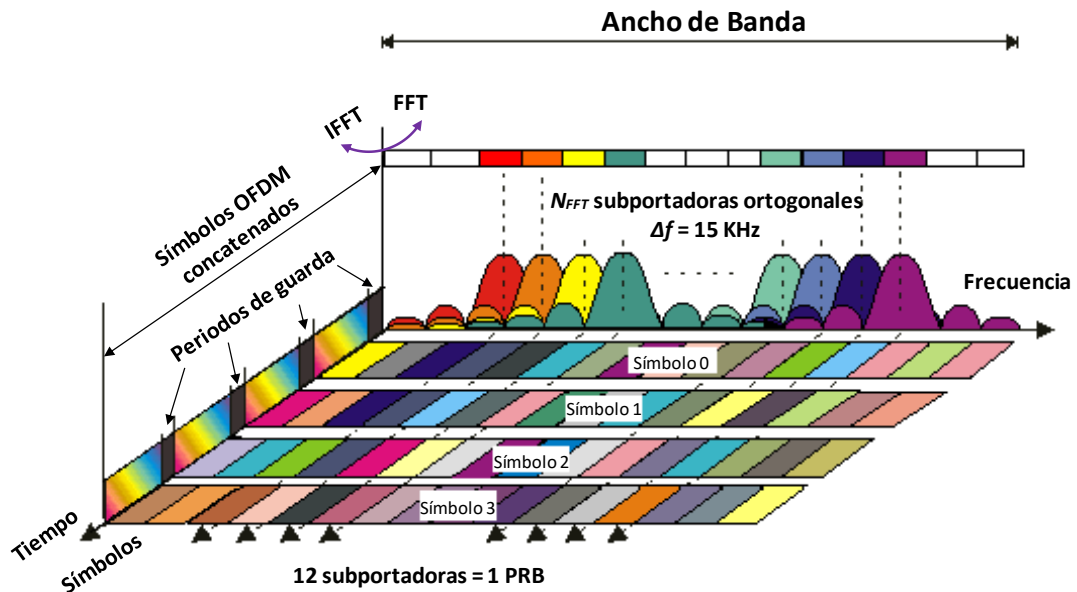


Figura 2.11: Representación de una señal OFDMA en frecuencia y tiempo.

La Fig. 2.11 [29] muestra una representación de una señal OFDMA y la relación que existe entre los dominios de frecuencia y tiempo, en donde las subportadoras ortogonales están separadas entre sí un $\Delta f = 15 \text{ KHz}$. Como se aprecia en la ilustración, la unidad temporal básica es el símbolo OFDM, en el cual se insertan prefijos cíclicos CP (*Cyclic Prefix*) o periodos de guarda al inicio de cada símbolo para prevenir la interferencia inter-simbólica que puede aparecer en el lado del receptor causada por la dispersión generada por la propagación multitrayectoria. A partir del símbolo OFDM, se define una estructura de transmisión temporal jerárquica formada por la concatenación de varios símbolos OFDM. Específicamente, los símbolos OFDM se agrupan en tramas de duración 10 ms, cada una de las cuales está compuesta por 10 subtramas de 1ms.

La Fig. 2.12 permite apreciar dicha estructura temporal. Se definen dos tipos de estructura denominados trama tipo 1 para el modo FDD, siendo esta la seleccionada para la presente tesis, y trama tipo 2 para el modo TDD. Para el caso de la estructura tipo 1, cada subtrama se divide en 2 slots de 7 o 6 símbolos OFDM, la selección del número de símbolos depende de la configuración seleccionada para el CP. LTE ha definido 2 tipos de prefijos cíclicos: normal (7 símbolos OFDM por slot), que es el elegido en esta tesis, y extendido (6 símbolos). La trama determina la periodicidad del envío de los parámetros que permanecen estables en el sistema, mientras que la subtrama (1ms) determina la periodicidad con la que en LTE se actualizan las decisiones de *scheduling* de recursos frecuenciales y temporales TTI (*Transmission Time Interval*).

CAPÍTULO 2: LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES

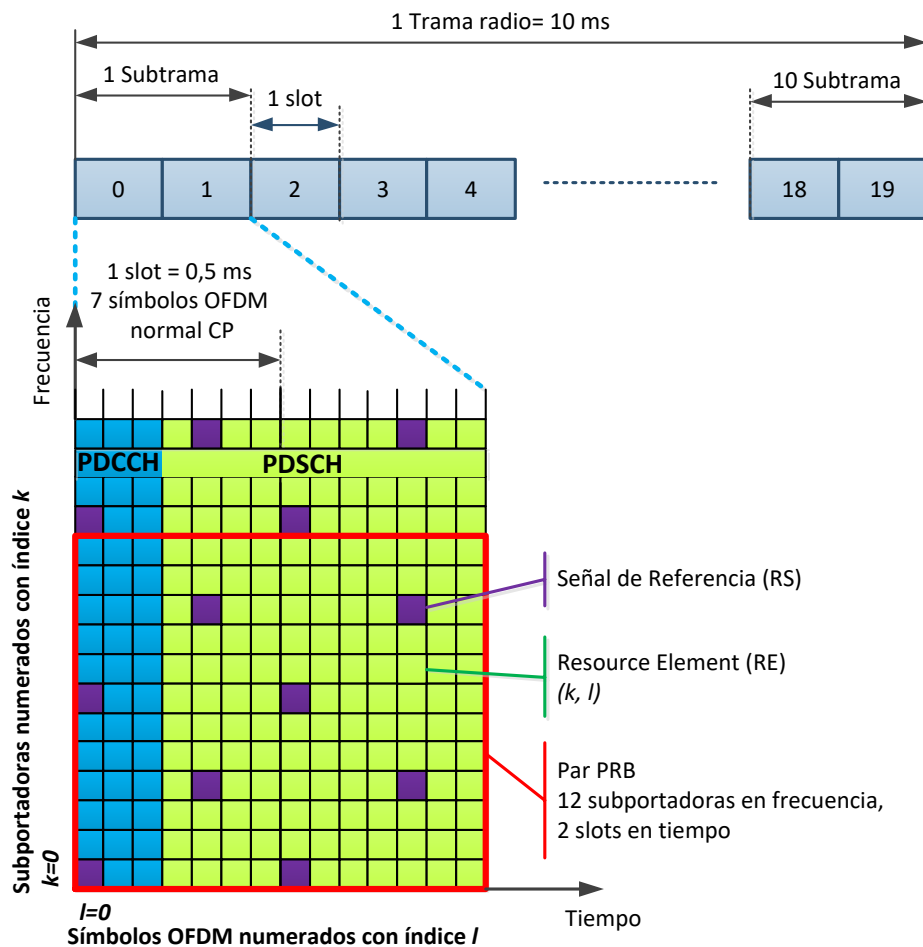


Figura 2.12: Estructura de la trama radio LTE.

Idealmente, el mecanismo de acceso OFDMA permitiría realizar cualquier reparto de subportadoras entre usuarios y con la granularidad deseada. Sin embargo, se requeriría una cantidad de señalización desmesurada para cubrir cualquier posibilidad. Por ello, la asignación recurre a bloques de un tamaño predefinido. La Fig. 2.12 detalla el mínimo elemento de información que el eNB puede asignar a un UE en el enlace descendente; este elemento se denomina par de PRB (*Physical Resource Block*). Un PRB ocupa 180 KHz de banda equivalente a 12 subportadoras ortogonales entre sí, durante un slot (0,5 ms o lo que es lo mismo 6 o 7 símbolos OFDM dependiendo de la duración de CP). El número total de PRB varía en función del ancho de banda seleccionado. Por ejemplo, para un canal de 20 MHz el número de PRB es igual a 100. Así pues, los datos son asignados a los UE en términos de pares de PRB; es decir un UE recibirá valores enteros de pares de PRB en el dominio de la frecuencia, los cuales no deben ser necesariamente adyacentes. En el dominio del tiempo, la decisión de *scheduling*, que siempre es tomada por el eNB, puede cambiar cada 1 TTI (1ms). Los datos de usuario son transmitidos en el canal PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*), así como otros tipo de señalización de nivel L3 y NAS (*Non Access Stratum*) o información variable de sistema SIB (*System Information*

Block), siendo estos canales los únicos que pueden ser modulados con QPSK, 16 QAM, 64 QAM y 256 QAM [9]. Los datos de señalización de niveles L1 y L2 de LTE, para el soporte de la transmisión a través de la interfaz radio (por ejemplo, indicaciones de *scheduling*), se envían en el PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*), que se ubica en los primeros símbolos OFDM. El número de símbolos OFDM empleados para la transmisión de datos de control PDCCH es variable (1, 2 o 3) y se indica a través del PCFICH (*Physical Control Format Indicator Channel*) mapeado en el primer símbolo utilizado por el canal de control. En el caso de la Fig. 2.12 el PDCCH ocupa los 3 primeros símbolos OFDM de la subtrama, mapeándose en el resto el canal PDSCH. Siendo el par de PRB la unidad mínima de asignación de recursos en el PDSCH, el PRB es un bloque compuesto por un número de RE (*Resource Element*) equivalente a 12 subportadoras durante los símbolos contenidos en un *slot* temporal. Las señales de referencia (RS) en el enlace descendente tienen una ubicación específica dentro de los RE de la subtrama y por tanto del PRB, manteniendo una separación de seis subportadoras en el dominio de la frecuencia. Su ubicación depende del número de antenas usadas por el eNB para la transmisión. La figura muestra el caso de una única antena (*Antenna Port 0*).

El UE necesita sincronizarse en tiempo y frecuencia con el eNB LTE para acceder a sus servicios. Para este fin, el UE necesita conocer la frecuencia de trabajo, así como cuándo inicia o termina una trama/slot/símbolo en LTE. La Fig. 2.13 muestra cómo se distribuyen las señales de sincronización y *broadcast* al interior de una estructura frecuencia-tiempo LTE. Los procedimientos de búsqueda de celda se realizan utilizando las señales de sincronización primaria y secundaria denominadas PSS (*Primary Synchronization Signal*) y SSS (*Secondary Synchronization Signal*), respectivamente. Estas señales se transmiten mediante 6 PRB ubicados en el centro del ancho de banda disponible por medio de 62 subportadoras, que aparecen ubicadas a la izquierda y derecha de la subportadora DC central, en los símbolos 5 (para el caso de SSS) y 6 (para el caso de PSS) del *slot* temporal. Las PSS y SSS se transmiten en forma periódica en las subtramas 0 y 5 de una trama radio LTE y permiten la identificación de la celda (*Physical Layer Cell ID*). El canal de radiodifusión (PBCH) se ubica en los símbolos 0,1, 2 y 3 del segundo slot temporal de la subtrama 0 y ocupa 72 subportadoras situadas 36 a la izquierda y 36 a la derecha de la subportadora DC central (el PBCH no usará los RE que contienen RS ubicados al interior de los PRB usados por este canal). A partir de las RS el UE puede estimar la respuesta impulsiva del canal asociado al ancho de banda total y completar la sincronización a nivel de bit si fuera necesario. Esta información es necesaria para posteriormente demodular el canal de radiodifusión, así como el resto de canales de tráfico y señalización del sistema. El canal PBCH aparece inmediatamente después de las señales de sincronización y contiene el MIB (*Master Information Block*), en donde se encuentra información de la celda tal como: el ancho de banda, número de antenas, numeración de trama, información de relacionada con procedimientos HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*), etc.

CAPÍTULO 2: LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES

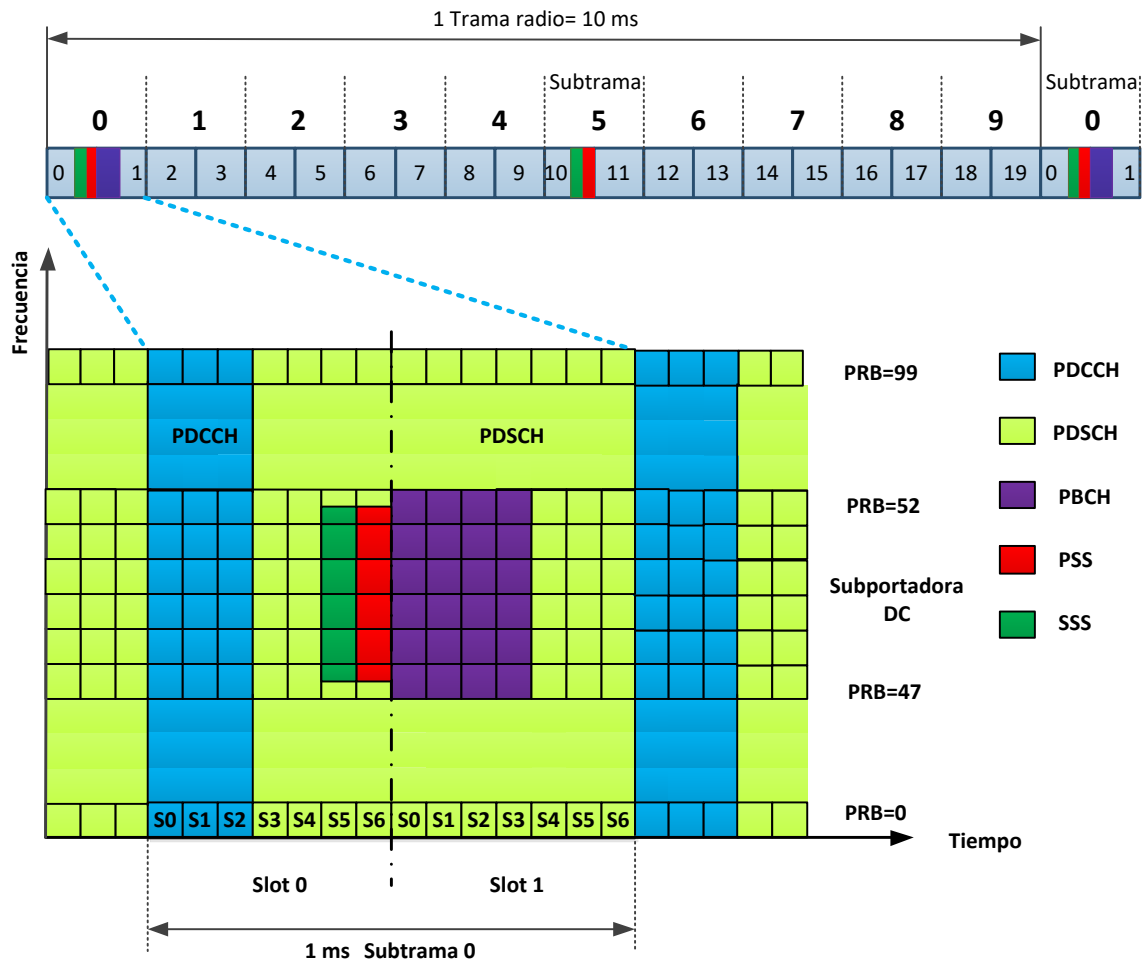


Figura 2.13: Señales de sincronización en LTE

El eNB recibe diferentes niveles de retroalimentación de todos los UE que están asociados en la celda. Esta información se emplea para diversos propósitos. Así, las estimaciones sobre la calidad del canal CSI en el enlace descendente se mapean en los reportes CQI (*Channel Quality Indicator*). El CQI señala el nivel máximo de modulación y codificación que el *scheduler* puede asignar en una transmisión dirigida al UE. Las señales ACK/NACK asociadas a cada bloque de transporte que envía el eNB al UE permiten llevar a cabo los procesos HARQ, que son una combinación de corrección de errores y retransmisión. Los reportes de medidas de capa física basadas en señales de referencia, tales como RSRP, RSRQ, etc. permiten al eNB y al UE gestionar la potencia de transmisión y sirven para dar soporte a los procesos de selección y reelección de eNB por parte del UE en estado *Idle* y gestión de movilidad del UE. Además, el UE solicita también la asignación de recursos en el enlace ascendente informando al eNB del estado de su *buffer*. La Fig. 2.14 muestra un resumen de los procesos de retroalimentación generados desde el UE hacia el eNB.

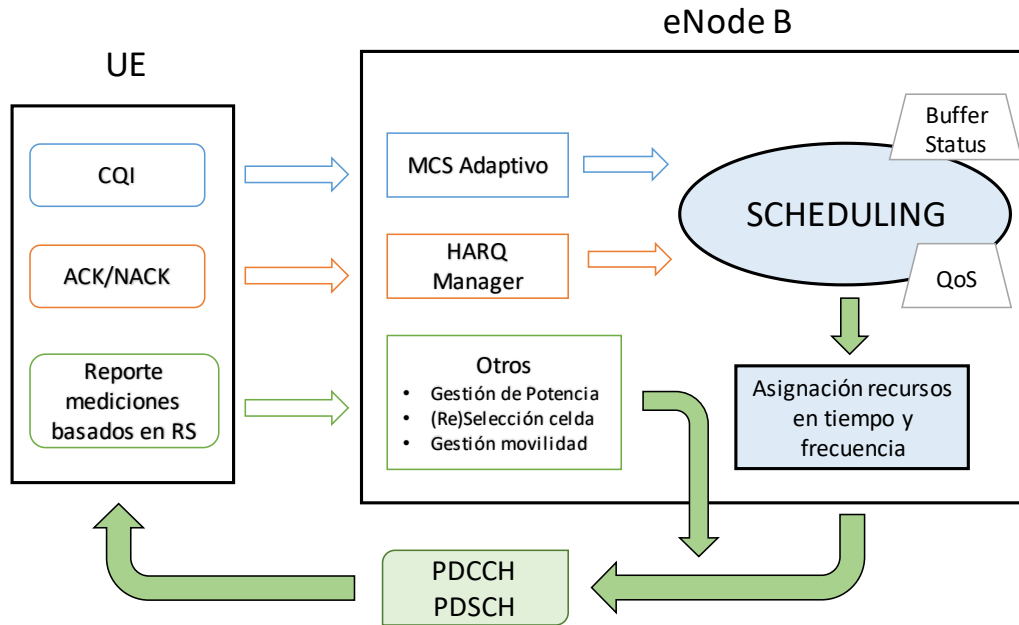


Figura 2.14: Diferentes reportes generados desde UE hacia eNode B.

En el desarrollo de LTE en banda no licenciada existen dos tecnologías que son las principales opciones para los escenarios *indoor*: LAA y LTE-U. Estas dos tecnologías se enfocan en la banda no licenciada de 5 GHz, en donde los organismos de regulación contemplan una potencia para los puntos de acceso ubicados en los edificios de 23 dBm (Europa) o 24 dBm (EE. UU.), mientras que para su uso *outdoor* (ej. *hotspot* pico celda) señalan un máximo de 30 dBm [10], estas tecnologías aplican los lineamientos establecidos en las releases de la 3GPP. Notando que, LTE-U es compatible con las releases 10 y 12, al mismo tiempo que aplica las consideraciones indicadas en 13, 14 y 15 lo que facilitó su rápida implementación; mientras que, LAA es la tecnología estandarizada por la 3GPP en la release 13, cumpliendo con los lineamientos de las releases 14 y 15 a pesar de no ser compatible con las releases 10 y 12 debido a la modificación de su capa MAC en comparación con la del estándar LTE.

Ambas tecnologías comparten características comunes como: el uso del mismo RAN (*Radio Access Network*) desarrollada por LTE, con diferencias en la capa MAC, en ambos espectros (licenciado y no licenciado) lo que permite una integración más sencilla con la *core network*. Además, el empleo del espectro licenciado como ancla para el espectro no licenciado permite una gestión unificada de la movilidad, autenticación, seguridad, administración, mensajes del plano de control, incluyendo señales de control RRC y de capa 1 se transmiten sobre la banda licenciada lo que permite garantizar una QoS sobre esta información [30]. Tanto LTE-U como LAA, realizan un sensado del medio basado en Detección de Energía, aunque LAA sensa el canal y decide si realiza o no la transmisión mientras que LTE-U sensa el medio para decidir el uso o no de su algoritmo de coexistencia. Debido a que estas tecnologías están basadas en LTE, las mismas emplean igual método de detección de colisiones basado en los NACK por medio de las señales HARQ. En forma similar, LTE-U y LAA comparten la transmisión de señales de descubrimiento para obtener y mantener la sincronización en la celda secundaria y las

CAPÍTULO 2: LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES

medidas RRM para la banda no licenciada; siendo posible la desactivación (apagado) de la celda secundaria cuando no existe UE asociados a esta celda o el eNB no tiene datos en sus *buffers* para los UE pertenecientes a la celda secundaria. Adicionalmente, estas dos tecnologías emplean CA con la portadora licenciada, permitiendo obtener un mayor ancho de banda para incrementar la velocidad de transmisión sobre el espectro no licenciado en especial para tráfico oportunístico, así como aplicar QoS en la portadora licenciada para la transmisión de datos de usuarios que requieren de este servicio.

Por último, LTE-U y LAA al estar basadas en LTE, tienen igual esquema de modulación y codificación, estructura de trama, canales lógicos, transporte y físicos, mecanismos de gestión de movilidad, medidas RRM, reportes CQI, etc. siendo la principal diferencia el uso de LBT en la MAC por parte de LAA. En los siguientes apartados se realiza un análisis de las características fundamentales de estas tecnologías, para centrarse finalmente en LAA.

2.1.4 Tecnología LTE-U

LTE-U se refiere a la tecnología LTE en banda no licenciada propuesta por el LTE-U Forum, que es una asociación formada en 2014 por Verizon, Alcatel-Lucent, Ericsson, Qualcomm y Samsung [10], [31] con el objetivo de generar las especificaciones para esta tecnología. LTE-U opera en las bandas de 5 GHz UNII-1 y UNII-3, operando inicialmente en modo SDL en conjunto con despliegues LTE en banda licenciada, siguiendo los alineamientos establecidos en las releases de 3GPP 10 y posteriores. Una característica primordial de LTE-U es que no soporta la funcionalidad LBT. Esto implica que puede ser usado en países donde no se exige LBT, como es el caso de China, India, Corea del Sur y Estados Unidos de América.

Para permitir la coexistencia con otras tecnologías que operan en la banda no licenciada, LTE-U emplea un mecanismo de ciclos de trabajo, en el cual el eNB LTE-U puede transmitir su información en el ciclo ON (estado activo) y no lo puede hacer durante el ciclo OFF (estado *Idle*). Durante el ciclo ON el dispositivo LTE-U puede iniciar su transmisión sin que importe la presencia de otras transmisiones en el mismo canal. Esta característica, por la que cualquier dispositivo LTE-U puede comenzar su transmisión al inicio de cada ciclo ON sin la necesidad de sensar en ese instante el canal, puede provocar la aparición de colisiones, siendo una de las principales objeciones a su uso. Los ciclos ON/OFF son generados a nivel de una o varias subtramas LTE, y de acuerdo a lo indicado en la especificación LTE-U, el ciclo puede ser ajustado a un máximo de 20 ms para el ciclo ON y un mínimo de 1 ms para el ciclo OFF. Cuando la SCell en LTE-U está en el estado ON, transmite como cualquier dispositivo LTE basado en las releases 10, 11 o 12 de la 3GPP.

LTE-U usa un mecanismo de coexistencia de 3 pasos [10], [32] para su operación en el espectro libre de 5GHz. Este mecanismo está representado en el diagrama de flujo de la

Fig. 2.15. A continuación se describen los pasos que intervienen en el mecanismo de acceso al canal en LTE-U.

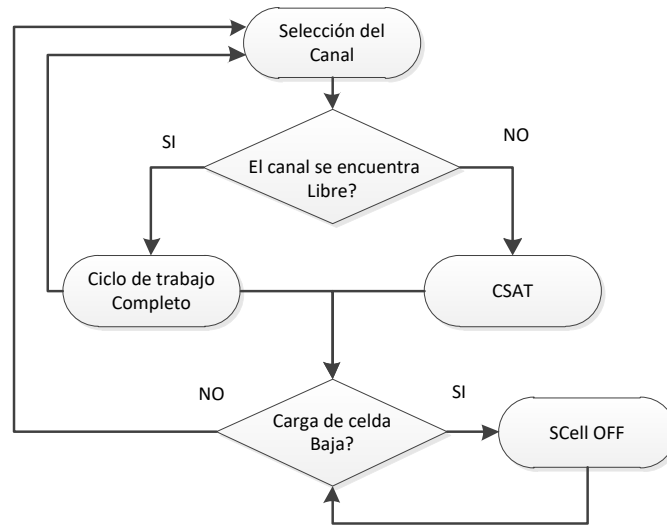


Figura 2.15: Diagrama de flujo para LTE-U [7].

a) *Selección del canal.* – El eNB LTE-U escanea las porciones del espectro correspondientes a la banda(s) no licenciada(s) con la finalidad de encontrar un canal libre de otras transmisiones radio. El canal será considerado libre cuando no existan dispositivos radio transmitiendo en este segmento del espectro o cuando la señal percibida por el eNB LTE-U sea menor a cierto valor umbral. La determinación del canal libre, así como el conjunto de medidas realizadas para evaluar el nivel de ocupación del canal, se realizan tan pronto como el dispositivo eNB LTE-U es encendido, así como en forma periódica durante la operación de la SCell en la banda no licenciada. Si el canal es evaluado como libre durante el encendido del nodo, el eNB LTE-U seleccionará dicho canal para comunicarse con los UE utilizando el mayor ciclo de trabajo posible. Si durante las posteriores mediciones del canal se detecta alguna interferencia, la transmisión puede ser cambiada a otro canal que se encuentre en estado libre; caso contrario entrará en operación el mecanismo denominado CSAT (*Carrier Sense Adaptive Transmission*) [32] en la SCell. Actualmente, el nivel de interferencia de un canal es evaluado usando medidas de detección de energía, lo cual no permite considerar el tipo ni el número de las fuentes interferentes. Se podrían añadir otras técnicas que permitan la decodificación de los preámbulos de las tramas Wi-Fi a los eNB LTE-U para discernir el número de dispositivos Wi-Fi vecinos, pero esto implica la adición de módulos 802.11 que permitan la lectura de este tipo de tramas.

b) *Ciclos de trabajo (Duty Cycles).* – En ambientes con una alta densidad de nodos es probable que no se tenga a disposición canales libres. En estas circunstancias LTE-U emplea CSAT para coexistir con Wi-Fi y/u otros dispositivos de diferente tecnología que se encuentren operando en el mismo canal. Al emplear CSAT, la SCell sensa el canal y en función del nivel de ocupación por encima de un valor umbral (- 62 dBm)

CAPÍTULO 2: LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES

define el tamaño del ciclo ON de tiempo de transmisión [33]. Este proceso se repite periódicamente durante cada ciclo de trabajo como se muestra en la Fig. 2.16. La especificación introducida por el LTE-U Forum no contempla la adaptación dinámica del ciclo de trabajo [34], ni tampoco define el algoritmo conforme al cual se ajusta el ciclo de trabajo, dejándose esto a criterio del fabricante. Sin embargo, el LTE-U Forum define los siguientes parámetros para CSAT [35]:

- $4\text{ ms} \leq T_{ON} \leq 20\text{ ms}$
- $1\text{ ms} \leq T_{OFF} \leq T_{LDS}$

donde T_{ON} corresponde a la duración del estado ON y T_{OFF} es la duración del estado OFF. T_{LDS} es la periodicidad de LDS (*LTE-U Discovery Signal*) que se explica a continuación. La selección de un mínimo de 4 ms para T_{ON} es para descargar bajos volúmenes de tráfico alojado en el *buffer* y se selecciona para evitar cambios frecuentes en la transición de los estados ON/OFF. La duración máxima de 20 ms permite una transmisión ininterrumpida de la LTE-U SCell. Después de alcanzar la duración máxima de transmisión ininterrumpida, el LTE-U tiene que cambiar al estado OFF por un periodo de al menos 1 ms conocido como *puncturing period*. Si la duración del T_{ON} lo permite, un periodo T_{ON} puede contener varios intervalos de duración máxima que deben estar separados entre sí por *puncturing periods*, como se muestra en la Fig. 2.16. Los ciclos de trabajo que se componen de periodos de tiempo T_{ON} y T_{OFF} que se alternan en el tiempo, son adaptivos y se basan en el sensado de la actividad en el canal durante el tiempo T_{OFF} ; es decir, si el eNB LTE-U detecta otras radio transmisiones en el mismo canal puede reducir su T_{ON} de tal modo que los otros nodos pueden utilizar el resto de tiempo T_{OFF} para sus transmisiones.

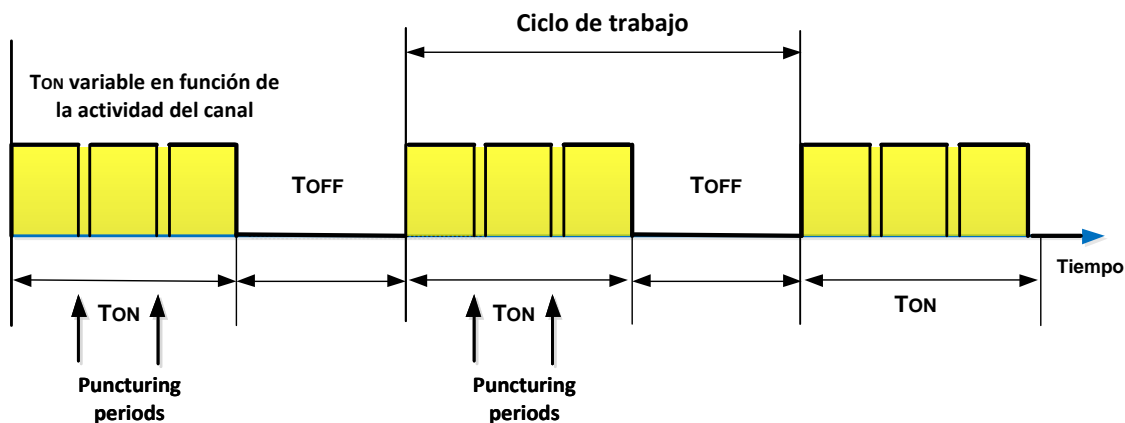


Figura 2.16: Ciclo de trabajo ON-OFF para CSAT

c) *Transmisión de LDS.* – Las señales de descubrimiento LDS permiten a los UE obtener y mantener el alineamiento con la SCell en tiempo y frecuencia, así como realizar la detección y mediciones de capa física [31]. Las señales LDS son transmitidas por el eNB LTE-U en la subtrama 5 del espectro no licenciado, y están conformadas por las señales PSS y SSS para realizar el procedimiento de sincronización (igual que en LTE estándar) y por las RS contenidas en los canales PDCCH y PDSCH para ejecutar las

tareas de medidas RRM, como se mostró en la Fig. 2.13 con la diferencia que solo se transmite en la subtrama 5. Las señales LDS pueden ser transmitidas en el enlace DL en conjunto con datos de usuario o en forma independiente, dentro de ventanas configurables denominadas DMTC (*Discovery Measurement Timing Configuration*) *window*, definidas a tal efecto. Dichas ventanas tienen una duración de 6 ms y aparecen con un periodo fijo configurable (DMTC) de 40/80/160 ms. Más adelante se da más detalles sobre esta señal que también es empleada en LAA [36].

- d) *Desactivación oportunista de la SCell.* – En el espectro no licenciado, las SCell tienen que permanecer activas solo cuando el tráfico o las condiciones de cobertura realmente lo requieran y además exista un claro beneficio en transferir el tráfico a estas bandas. Consecuentemente, las SCell pueden ser desactivadas cuando no existen UE en el área de cobertura de la SCell o cuando el eNB no tiene datos en sus *buffers* para los UE asociados a la SCell. La Fig. 2.17 a) muestra una red LTE-U operando en modo *Supplementary DL* (SDL) con PCell y SCell activas, mientras que la Fig. 2.17 b) es la misma red, pero la SCell está desactivada. En el contexto de agregación de portadoras, se dice que una SCell se encuentra desactivada cuando la red notifica de esta condición a la SCell y a los UE asociados a la SCell. Por defecto la PCell siempre está en estado activo. De este modo el UE no necesita recibir la información contenida en el PDSCH o PDCCH de la portadora secundaria, tampoco precisa enviar informes CQI, señalización RRM o ACK asociados a la portadora secundaria en el UL de la portadora principal, tareas que el UE sí las realiza cuando la SCell está activa. Los procedimientos para la configuración y activación de la SCell siguen las especificaciones del 3GPP release 10. Cuando la SCell está activa, el UE monitorea las subtramas de DL como cualquier dispositivo LTE; en cambio, cuando la SCell está desactivada el UE solo monitorea las señales LDS sin tener que reportar información alguna en uno de los periodos configurados de 40, 80 o 160 ms.

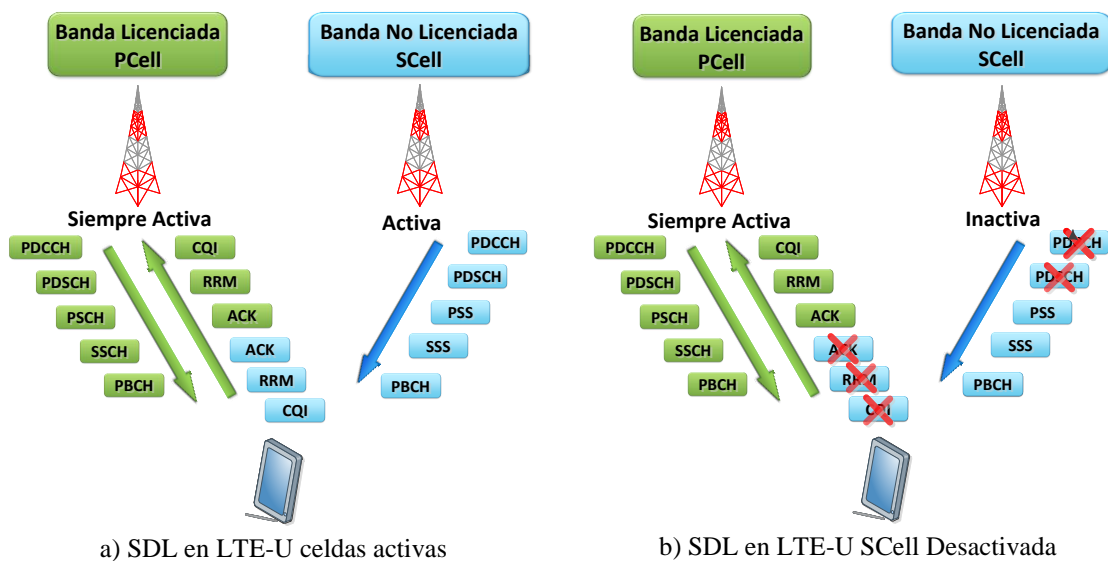


Figura 2.17: Activación/desactivación de SCell en LTE-U SDL.

CAPÍTULO 2: LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES

La ventaja principal de LTE-U es que estos sistemas estuvieron comercialmente disponibles más rápido que aquellos basados en LAA (en torno a 2018). Esto se debió al hecho de que el proceso de estandarización de LTE-U y las especificaciones para la implementación de los dispositivos LTE-U fueron desarrollados en forma rápida por el LTE-U Forum debido a la simplicidad del algoritmo CSAT y a que esta especificación requiere de cambios mínimos en el protocolo LTE existente.

2.1.5 Tecnología LAA Licensed-Assisted Access

La tecnología en la cual centramos el análisis de nodos ocultos es LAA. Como se ha dicho, LTE LAA se estandarizó como parte del 3GPP release 13, en donde el espectro no licenciado es una extensión del protocolo LTE de agregación de portadoras [37], [38]. Se requiere siempre la transmisión sobre la PCell (portadora licenciada), mientras que la transmisión en la SCell (portadora no licenciada) puede ser usada de forma oportunista para la transferencia de datos en el enlace DL. Esto implica que la gestión de RRC (*Radio Resource Control*) para el manejo de conexiones, señalización para la activación de la SCell, monitoreo del enlace radio, gestión de *handovers*, funcionalidades NAS tales como seguridad del intercambio de llaves e información de movilidad se proveen a través de la PCell. Los mensajes asociados al PDCCH, que incluye la información de *scheduling*, las señales de referencia, y el PDSCH, que porta los datos de usuario, pueden ser transmitidos tanto en la banda licenciada como en la banda no licenciada, mientras que para esta release las transmisiones en *uplink* están limitadas a la PCell. Tal como se indicó anteriormente, LAA es solo un tipo particular de escenario LTE con agregación de portadoras, requiriéndose una sincronización perfecta de la transmisión en ambas portadoras. Esto implica que el UE puede reportar a través del UL de la banda con licencia las medidas de RSRP, RSRQ y CQI para cada banda (licenciada y no licenciada) de manera independiente. Estas métricas son calculadas de igual forma sin importar si el origen de las mediciones es la banda libre o la banda licenciada: sus valores dependen exclusivamente de las características del canal y la carga de tráfico que existe en la banda donde son tomadas las medidas.

LAA es un caso particular de CA, en donde la diferencia principal con LTE reside en el método de acceso LBT debido a que el canal no es exclusivo. Por tal motivo, las señales de sincronización pueden ser o no transmitidas en DL en la banda no licenciada durante los *slots* de tiempo predeterminados en función de la disponibilidad del acceso al canal. Si el canal es percibido por LAA como libre, PSS y SSS operan como cualquier celda LTE, pero si el canal no está libre, las señales deberán esperar hasta que el acceso al canal lo permita. Las otras capas que forman parte LAA presentan iguales características que LTE, de tal modo que muchas de las particularidades de LTE (Release 8, 10 y 12) se mantienen en LAA. En un breve resumen se pueden mencionar las principales similitudes. A pesar que LAA presenta una transmisión discontinua en donde se aplica un tiempo máximo de transmisión, la estructura de la subtrama en donde se tienen RE, RS, con el uso de OFDMA es igual a LTE. Las subtramas tienen los canales PDSCH, PDCCH, PSCH (*Primary*

Synchronization Channel), *SSCH* (*Secondary Synchronization Channel*), *PCFICH*, etc. organizados a nivel de RE, slot y PRB, cada una conservando las mismas características y funcionalidades desplegadas en LTE. La sincronización en tiempo y frecuencia en LAA usa las mismas señales de sincronización primaria y secundaria que LTE. En forma similar, las medidas de CSI, RRM (CQI, RSRP y RSRQ) se basan en las mediciones realizadas sobre las RS, siguiendo igual metodología de cálculo, tamaño de ancho de banda, tamaño de ventanas para toma de mediciones, etc. como lo desarrolla 4G, con la particularidad que las mediciones son aplicadas también sobre la banda no licenciada. Finalmente, el *scheduler* de LAA asigna recursos de la banda no licenciada en función de las características del canal (CQI), seleccionando el esquema de MCS adecuado para cada UE con las mismas consideraciones que las empleadas en la banda licenciada. En resumen, a pesar que existen diferencias entre ambas tecnologías, LAA mantiene en lo posible la base de LTE. A continuación, se detallan las características principales asociadas a la tecnología LAA.

- a) *Procedimiento LBT*. – LAA emplea LBT como método de acceso. LBT es un mecanismo por el cual un dispositivo aplica CCA para evaluar la disponibilidad del canal antes de ocuparlo. Este mecanismo es bastante similar a CSMA/CA. En realidad, LBT está constituido por una familia de protocolos FBE (*Frame-Based Equipment*), LBE (*Load-Based Equipment*) y LBT Cat.4 [39]. La Tabla 2.3 resume las principales características de cada uno de estos algoritmos.

Tabla 2.3: Clasificación familia LBT

Protocolo	Tipo de contienda	Parámetros a configurar
Basados en LBT (con CCA)	FBE (No soporta <i>backoff</i>)	Periodos de ON y OFF Periodo fijo de trama Periodo de sensado de canal
	LBE (CW de tamaño fijo)	Tiempo máximo de ocupación del canal (MCOT) Tamaño fijo de CW Duración del slot de <i>backoff</i>
	Cat.4 (CW exponencial binario)	MCOT Tamaño de CWmin Tamaño de CWmax Duración del slot de <i>backoff</i> Número máximo retransmisiones

La opción seleccionada por 3GPP para LAA es LBT Cat.4. En el apartado 2.2.2 se incluirá una revisión de los estudios previos que condujeron a la elección de esta opción. Tal como se mencionó anteriormente, los reguladores en Europa y Japón exigen LBT para operar en la banda de 5 GHz, pero no los de EE. UU., China y Corea. Sin embargo, la adopción de LBT es necesaria para permitir que LAA se convierta en una solución simple y global que cumpla con cualquier regulación.

Específicamente, LBT Cat.4 considera la aplicación de un *backoff* aleatorio junto con una ventana de contienda (CW) variable para transmisiones en el canal de datos de

CAPÍTULO 2: LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES

usuario PDSCH. Al usar LBT, el eNB puede transmitir después de sensar el canal libre durante un tiempo inicial CCA de diferimiento (Td_{cca}) compuesto por un periodo de duración fijo $Tf = 16 \mu s$ y un número mp de slots CCA (cada slot CCA tiene una duración de $Tsl_{cca} = 9 \mu s$) [9]. El valor de mp depende de la prioridad del acceso al canal, la cual es usada para clasificar el tráfico que será transmitido en la banda no licenciada en 4 categorías, tal como se muestra en la Tabla 2.4. Por ejemplo, para la prioridad de acceso al canal PC (*Priority Class*) igual a 3 (que corresponde a tráfico *best effort*), $Td_{cca} = Tf + mp \times Tsl_{cca} = 43 \mu s$. Por tanto, si el canal se encuentra libre durante Td_{cca} , el eNB transmite sus datos. En caso contrario, el eNB deberá realizar el CCA extendido (eCCA), de modo que seleccionará un contador aleatorio N en el rango $[0, CWp]$ y comenzará a evaluar el canal durante un tiempo de diferimiento eCCA (Td_{ecca}).

Tabla 2.4: Prioridad de acceso al canal para LAA [35]

Prioridad acceso canal (PC)	mp	CWmin	CWmax	MCOT	Tamaños de CW permitidos
1	1	3	7	2 ms	3, 7
2	1	7	15	3 ms	7, 15
3	3	15	63	8 o 10 ms	15, 31, 63
4	7	15	1023	8 o 10 ms	15, 31, 63, 127, 255, 511, 1023

El CWp es el tamaño actual de CW, el cual variará entre $CWmin$ y $CWmax$. $CWmin$ y $CWmax$ también se especifican de forma diferenciada para cada clase de prioridad de acceso al canal como se indica en la Tabla 2.4. Una vez que el canal está libre, el eNB continuará sensando el canal durante un intervalo $Td_{ecca} = N \text{ CCA slots}$. En concreto, cada vez que el canal esté libre durante un CCA ($Tsl_{cca} = 9 \mu s$), el contador de *backoff* se reduce en uno ($N = N - 1$). Si durante el proceso de *backoff* el eNB detecta que el canal está ocupado, el contador de *backoff* se detiene hasta que el eNB sensa que el canal se encuentra nuevamente libre y retoma el decremento de N . Finalmente, cuando N alcanza cero el eNB puede iniciar su transmisión. Se debe notar que el tamaño de CW se incrementará de forma exponencial cada vez que exista una colisión. La Fig. 2.18 muestra el procedimiento LBT definido por el 3GPP.

- b) *Detección de Energía (ED)*. – LBT emplea el método de detección de energía para evaluar si un canal está o no libre. El método ED mide la energía total que un dispositivo recibe dentro del ancho de banda de la señal. Si la energía recibida supera cierto umbral, se considera que el canal está ocupado. El 3GPP ha establecido que el ED umbral para LAA es -72 dBm para un canal de 20 MHz.
- c) *Tiempos de Ocupación y Señales de Reservación del canal*. – Una vez que el eNB ha aplicado LBT y el canal es evaluado como libre, el eNB procede con la transmisión por un periodo denominado TxOP, el cual no será mayor que el MCOT (*Maximum Channel Occupancy Time*). El MCOT se aplica para evitar que un eNB pueda monopolizar el

canal y depende de la clase de prioridad de acceso al canal [35]. Por ejemplo, al tráfico *best effort* le corresponde una $PC = 3$ y tiene un MCOT de 8ms o 10ms.

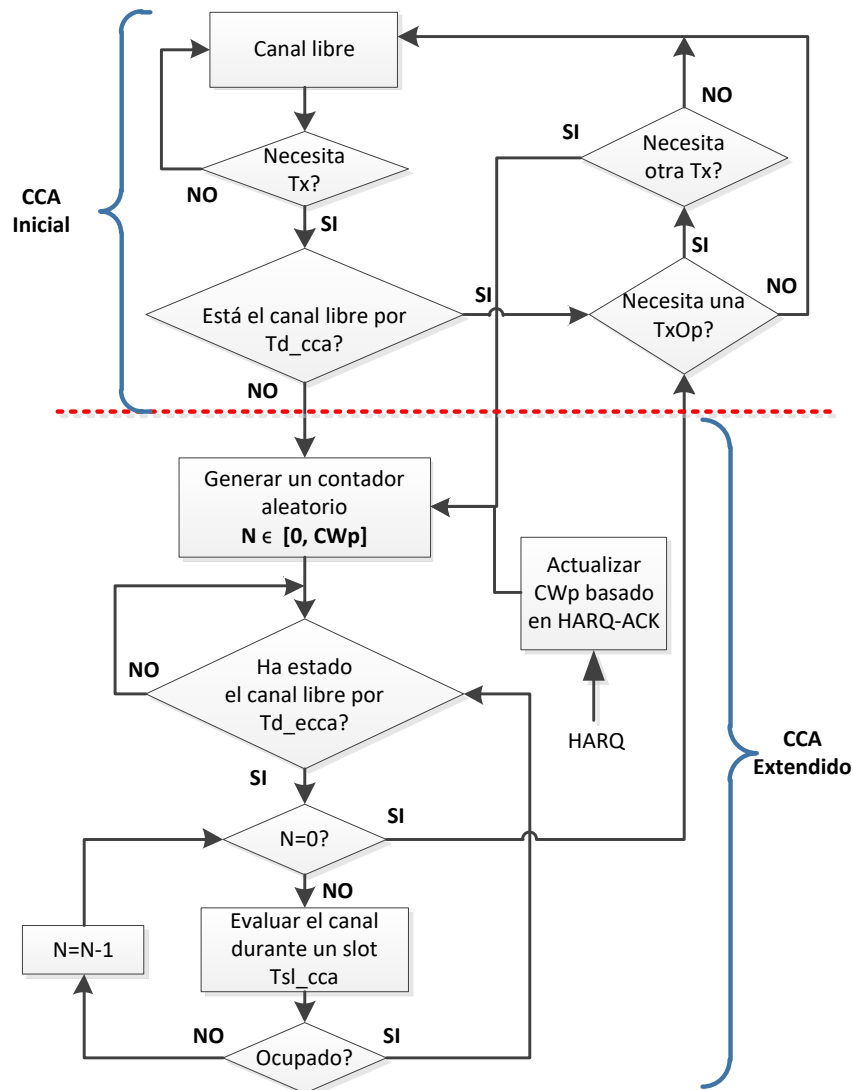


Figura 2.18: Procedimiento 3GPP LBT

El MCOT establece el tiempo máximo que una ráfaga de datos LAA puede usar el medio en forma continua en el DL. Por tanto, después de completar el MCOT, el eNB debe esperar un tiempo Td_cca (*Deferred Time during CCA*) igual a $43 \mu s$ (en caso de una $PC=3$) para continuar con la transmisión de datos almacenados en su *buffer*. Durante el *deferred time*, otros eNB o cualquier AP con diferente tecnología puede competir por acceder al canal con excepción del eNB que estuvo usando el canal por última vez. Después de finalizado el Td_cca , el eNB que fue excluido de la contienda puede participar nuevamente y, si obtiene el canal, continúa con la transmisión DL que fue detenida, como se detalla en la Fig. 2.19.

El eNB que gana el acceso al canal, debido a la naturaleza síncrona de LTE, debe esperar hasta el inicio de la próxima subtrama para iniciar su transmisión: este periodo de tiempo se conoce como tiempo GAP. En este caso, el eNB genera una señal de reserva hasta el

CAPÍTULO 2: LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES

inicio de la próxima subtrama, de modo que todos los contendientes por el canal se enteran del estado reservado del canal. La señal de reserva cumple su rol cuando la potencia recibida por las otras estaciones es mayor que su valor de umbral ED. De otro modo, las otras estaciones pueden transmitir y se pueden producir colisiones en el caso de que existan nodos ocultos.

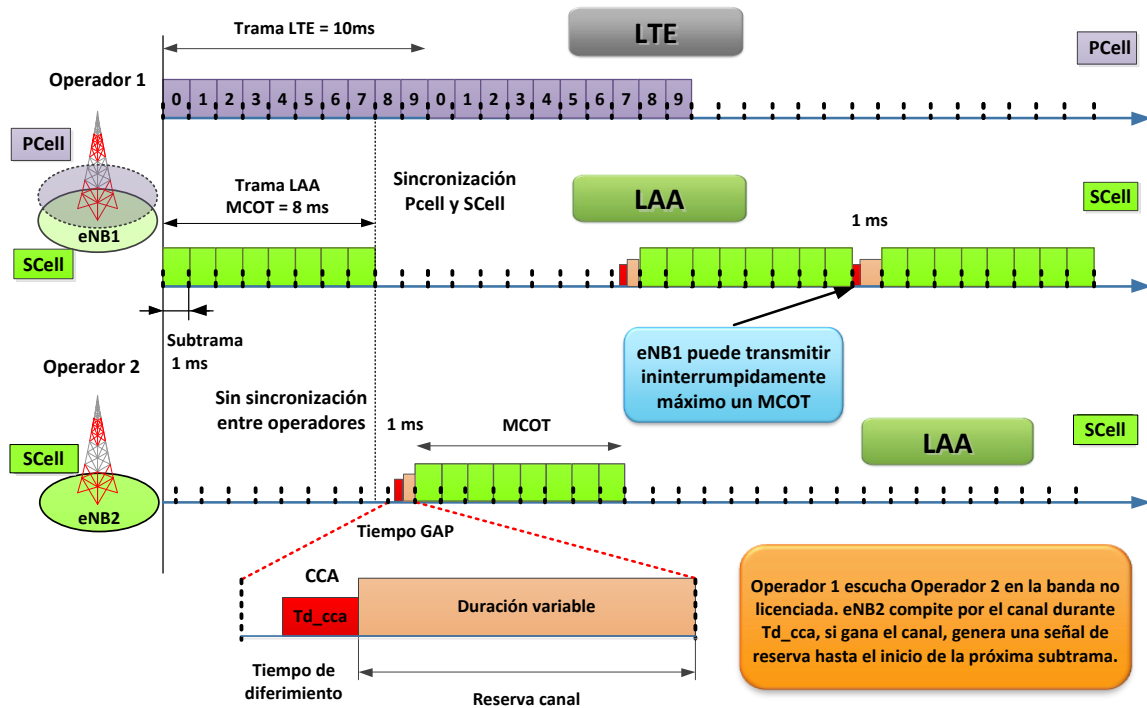


Figura 2.19: MCOT y señal de reserva de canal en LAA.

Discovery Reference Signals (DRS). – El RRM en LTE para ambos espectros (licenciado y no licenciado) en DL se basa en las mediciones de calidad del canal obtenidas por medio de la monitorización de las señales de referencia. En el caso específico de la banda sin licencia, las señales DRS fueron introducidas por el 3GPP para permitir la detección de celdas, sincronización y medidas RRM cuando las celdas se encuentran en el estado inactivo durante periodos apreciables de tiempo. Debido a la naturaleza fluctuante del tráfico en el tiempo, las SCell que están siendo subutilizadas pueden ser desactivadas dinámicamente para ahorrar energía y activadas cuando el requerimiento de tráfico lo demande en forma similar a como se describió en el caso de LDS. De este modo, mientras el eNB de la SCell se encuentra desactivado, se activa periódicamente para transmitir DRS en la SCell dentro de la ventana DMTC. Las mediciones RRM realizadas por el UE dentro de múltiples periodos DMTC son usadas para generar una medida la cual resulta del promedio de los valores calculados empleando las RS contenidas en los DRS válidos, evitando de esta manera la degradación de la calidad de las medidas reportadas por el UE. Por este motivo, no se permite el uso de señales DRS que fueron obtenidas fuera de las ventanas DMTC.

Las señales DRS son las mismas señales LDS (aplicadas en LTE-U) pero generadas en una red LAA. Por tal motivo al igual que LDS, las señales DRS incluyen las señales de

PSS y SSS para las tareas de sincronización y las RS contenidas en los canales PDSCH y PDCCH para las tareas de RRM, como se ilustra en la Fig. 2.20 a). La estructura de trama de la señal DRS implica que tiene una duración de 1 ms (14 símbolos OFDM para un CP normal). La release 12 indica que las señales DRS pueden ser transmitidas en forma periódica cada 40, 80 o 160 ms (en un intervalo denominado *Periodo DMTC*) dentro de una ventana temporal llamada *Ventana DMTC* que tiene una duración de 6 ms (subtrama 0 hasta subtrama 5). A diferencia de LTE-U, LAA debe escuchar y ganar el acceso al canal antes de poder transmitir. Por este motivo la ventana DMTC tiene sentido para el caso de LAA, pues si el canal no se encuentra libre en el enlace DL para la transmisión de la señal DRS, la ventana DMTC permite esperar durante 6 ms para que el canal sea liberado, de tal modo que SCell logre transmitir la señal DRS durante esta ventana. En caso contrario, la señal DRS es descartada y se debe esperar un periodo DMTC para la transmisión de la siguiente señal DRS, como se detalla en la Fig. 2.20 b).

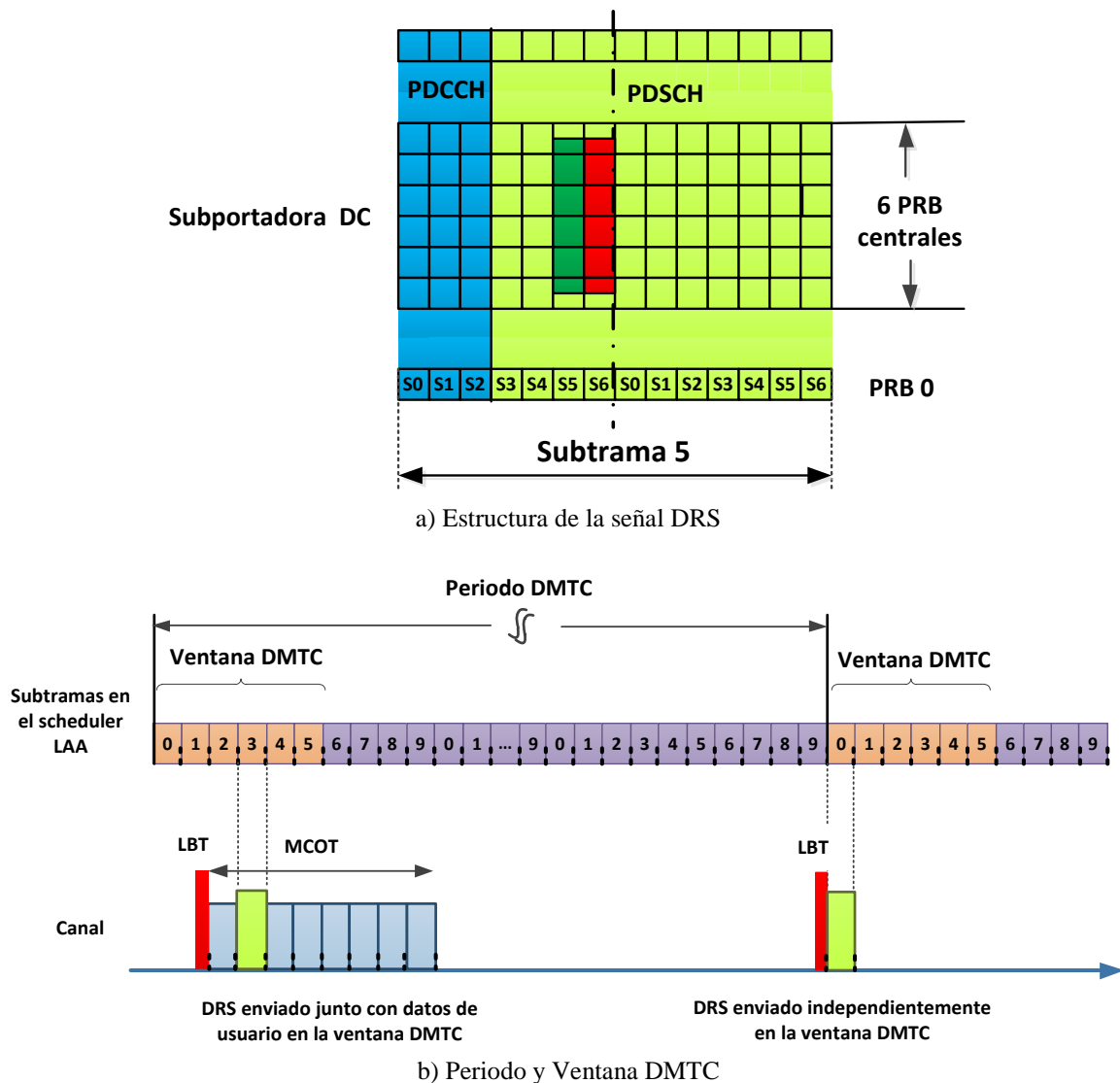


Figura 2.20: Transmisión de señales DRS en LAA

El uso de las señales DRS durante periodos DMTC y al interior de las ventanas DMTC permiten que el UE y SCell mantengan la sincronización a pesar de que la SCell y UE

CAPÍTULO 2: LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES

se encuentran desactivados. Ambos nodos son conscientes del intervalo de tiempo entre señales DRS y de cuánto tiempo deben esperar despiertos para la transmisión/recepción de estas señales. Cuando la SCell se encuentra en estado activo y con datos de usuario en el canal PDSCH, las DRS pueden incluirse en el PRB asignado a un UE si este cumple los criterios de periodo DMTC, ventana DMTC y el canal compartido lo permite. En forma similar si la SCell no tiene datos de usuario por transmitir en el DL o se encuentra en estado inactivo, la señal DRS puede ser enviada en forma independiente sin datos [36]. La Fig. 2.20 b) muestra la transmisión de la señal DRS, después de aplicar el algoritmo LBT, en conjunto con datos de usuario y en forma independiente sin datos para LAA, así también muestra los periodos y ventanas definidos para DMTC durante la transmisión de DRS.

El método de acceso al canal en LAA en la banda no licenciada conduce a la transmisión intermitente de ráfagas de datos alternadas con periodos de silencio, que en conjunto con una alta probabilidad de interferencia asociada a la presencia de uno o varios nodos que en el peor escenario corresponderían a terminales ocultos, conducen a un ambiente propenso a constantes fluctuaciones de la métrica SINR. Por este motivo, las mediciones para generar los reportes CSI se realizan cuando la información procede de la celda servidora. Es decir, el UE que genera el reporte RRM, solo realiza mediciones cuando la señal se origina desde la SCell a la que se encuentra asociado y para la medición considera tanto la señal DRS como las RS contenidas en los canales PDSCH/PDCCH empleadas durante la transmisión de datos generados desde su respectiva celda servidora, sin importar si estos datos tienen como destinatario al UE que genera el reporte CSI u otro UE. Al igual que ocurre en la banda licenciada, los reportes CSI en la SCell deben permitir los reportes periódicos o aperiódicos configurables desde la red, los cuales pueden ser enviados a su eNB a través del PUSCH (*Physical Uplink Shared Channel*) para los reportes aperiódicos o a través del PUCCH (*Physical Uplink Control Channel*) en caso de reportes periódicos, de la portadora licenciada en la PCell.

- d) *Ventana de Contienda (CW) y HARQ.* – El valor inicial de CW depende de la prioridad de acceso al canal y su valor fue mostrado en la Tabla 2.4. Este se incrementará cada vez que el eNB detecte una colisión. LTE emplea el HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*) como método para la detección de colisiones, en donde el eNB que está operando en la SCell usa la información de NACK provista por el HARQ para incrementar el tamaño de la CW. En concreto, el tamaño de la CW en el eNB se incrementa si más de un porcentaje Z de HARQ correspondiente a las transmisiones de datos de usuario en el canal PDSCH en una subtrama de referencia k (definida a continuación) son determinadas como NACK. El valor por defecto del parámetro Z es 80%. De otro modo, si no se alcanza este umbral del 80%, el tamaño de la CW pasa a ser igual a CW_{min} . La subtrama de referencia k corresponde a la primera subtrama para la cual el valor de HARQ se encuentra disponible y que forma parte de las respuestas HARQ de una ráfaga de datos de usuarios transmitidos durante un MCOT.

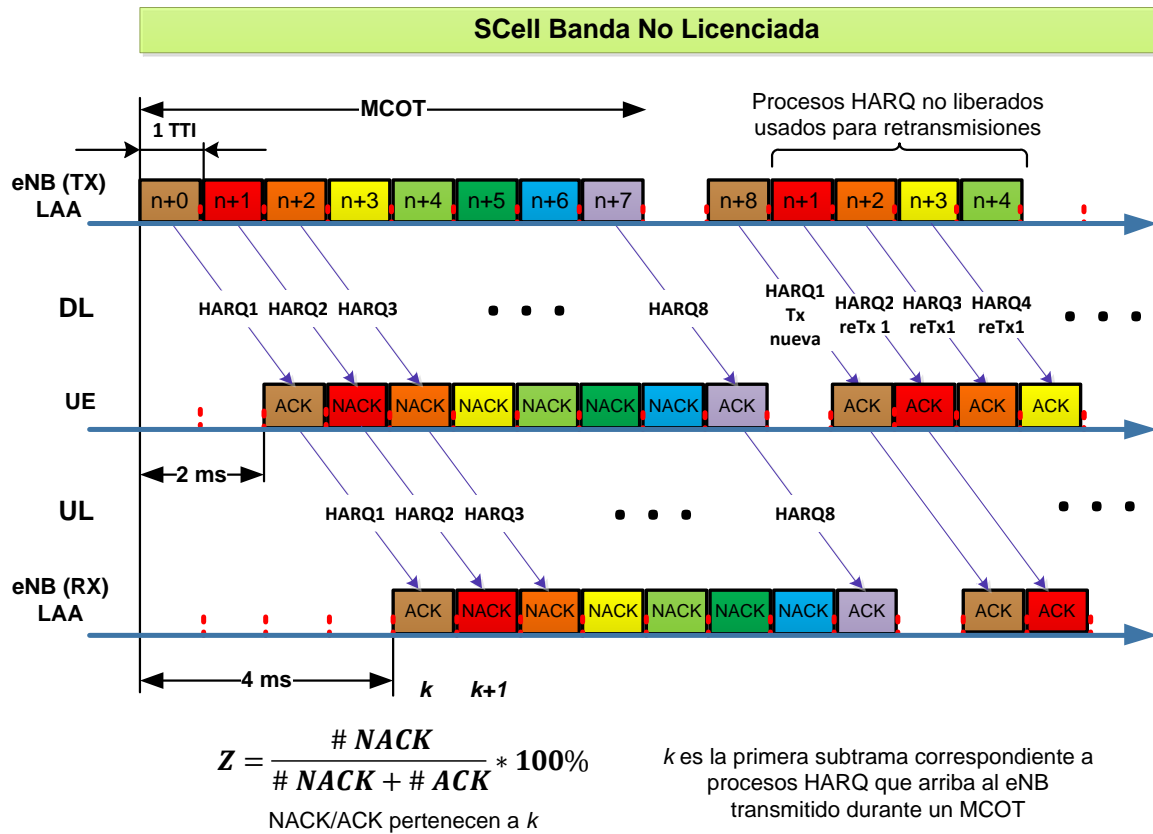


Figura 2.21: Procesos HARQ y generación de ACK/NACK en eNB LAA

La Fig. 2.21 muestra una ráfaga PDSCH con un MCOT igual a 8 ms que ha sido transmitida desde el eNB con destino a un UE. El UE recibe cada subtrama (1 TTI) revisando si existen errores insalvables en recepción y generando una respuesta ACK/NACK para cada una. La figura permite apreciar el retardo que existe entre la transmisión de datos por el eNB en la subtrama $n+0$ y el ACK por parte del UE en la subtrama $n+4$, que tiene un valor de 4 ms, contado desde el instante en que el eNB transmite la información hasta el momento en que el eNB es consciente del estado de los datos enviados. En recepción del eNB se tienen 8 respuestas ACK/NACK correspondientes a cada subtrama transmitida durante el MCOT. La subtrama de referencia k es la primera respuesta recibida en eNB con datos válidos del proceso HARQ que forma parte del conjunto de datos transmitidos durante el MCOT. El porcentaje Z toma en cuenta el número de ACK/NACK contenidos solamente en la subtrama k de referencia, descartando las otras. El *scheduler* del eNB usa los reportes ACK/NACK para agendar la retransmisión de las subtramas que tuvieron errores [9].

Cada subtrama transmitida por el eNB en DL tiene asociado un proceso HARQ que gestiona los reportes ACK/NACK, por lo que en un ambiente con diversidad de usuarios es posible que una subtrama contenga datos dirigidos a múltiples UE, de tal manera que cada UE reportará el estado de sus datos particulares recibidos. Por este motivo, es posible que una misma subtrama tenga varias respuestas ACK/NACK. Entonces, puede suceder que a pesar de que existan colisiones sobre un UE específico la CW no se vea afectada, ya que la subtrama de referencia k puede contener datos HARQ que pertenecen

a un UE que no está afectado por interferencias o los datos HARQ pueden pertenecer a varios usuarios, lo que hace difícil sobrepasar el valor umbral $Z=80\%$ para incrementar la CW.

LAA mantiene las características del procedimiento HARQ definidos en LTE FDD, en donde se tiene un total de 8 o 16 (dependiendo si se usa multiplexación espacial) procesos HARQ en DL. Uno de los principales problemas que afecta a los procesos HARQ es la incertidumbre en el acceso al canal en la banda no licenciada, ya que si existen constantes colisiones o el acceso al canal se demora demasiado, uno o varios procesos HARQ no serán liberados a pesar de haber sobrepasado un MCOT, ya que los procesos HARQ en conjunto con el *scheduler* seguirán intentando enviar los datos de usuario hasta completar el límite máximo de retransmisiones, lo que provoca que exista un aumento en las colas de los *buffers* en el eNB con datos nuevos que no pueden ser asignados a *scheduling* debido a que no existen procesos HARQ libres.

2.2 Coexistencia LAA y Wi-Fi

A continuación, se resumen las principales diferencias entre las tecnologías LAA y Wi-Fi, seguido de una discusión acerca de los trabajos de investigación relacionados con la coexistencia entre estas dos tecnologías hasta llegar a la elección LBT Cat.4 y una introducción a los problemas asociados al fenómeno de los nodos ocultos, que serán analizados en profundidad en el siguiente capítulo.

2.2.1 Comparación entre LAA y Wi-Fi

A pesar de que los protocolos de acceso al medio LBT de LAA y CSMA/CA de Wi-Fi tienen similitudes, existen ciertas diferencias que deben tenerse en cuenta y se resumen a continuación.

- a) *Canal de Acceso.* – Wi-Fi puede transmitir en cualquier instante, mientras que LAA, debido a su naturaleza síncrona, debe esperar al inicio de la subtrama/slot usando una señal de reserva de canal.
- b) *Umbrales de ED.* – Tanto LAA como Wi-Fi tratan de evitar colisiones usando valores umbrales de ED para evaluar si el canal se encuentra libre. En concreto, LAA determina un umbral ED de -72 dBm para la escucha de cualquier señal, mientras que Wi-Fi usa un umbral ED de -62 dBm para aquellas señales diferentes de Wi-Fi y un umbral ED de -82 dBm para detectar el preámbulo de otras transmisiones Wi-Fi. Estas asimetrías en los valores de ED son problemáticas, ya que generan una variedad de escenarios con la presencia de nodos ocultos asimétricos. Por este motivo, cuando un nodo Wi-Fi sensa una señal LAA con una potencia menor que -62 dBm el nodo Wi-Fi evalúa al canal como libre. Sin embargo, LAA es capaz de detectar la presencia de una señal 802.11

hasta un valor de -72 dBm, difiriendo su acceso al canal. Esto significa que LAA puede estar oculto de Wi-Fi, pero el recíproco no es cierto, así que LAA puede experimentar mayor retardo en el acceso al canal. [40], [41].

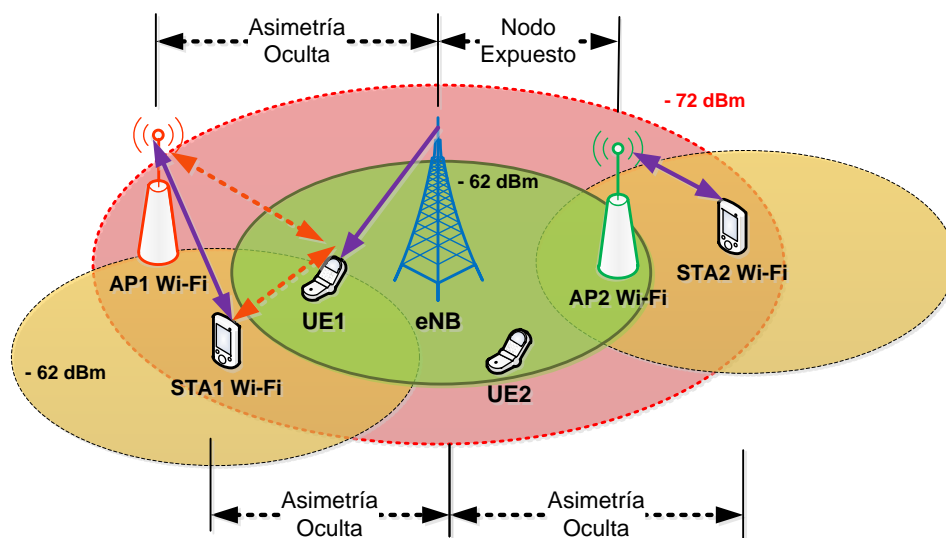


Figura 2.22: Umbrales de ED y problema de nodo oculto asimétrico y expuesto.

Tal como se muestra en la Fig. 2.22, se distingue 3 zonas de cobertura, la primera se establece cuando la potencia de señal que se recibe del eNB alcanza los -62 dBm; la segunda, más alejada, corresponde a cuando la señal llega a -72 dBm; y la tercera muestra la cobertura para una potencia recibida de -62 dBm, pero en este caso la señal se origina en las STA Wi-Fi que transmiten en UL (la misma situación sería si se tratase de la transmisión de un AP en el DL del enlace Wi-Fi). El eNB es consciente de la presencia de ambos AP (AP1 y AP2) y de las STA (STA1 y STA2), mientras que para la red Wi-Fi solamente AP2 es consciente de la presencia de eNB debido a que la distancia entre los nodos eNB y AP2 permite que valores de ED detecten la RSS (*Received Signal Strength*) del otro dispositivo (Nodo expuesto). En cambio, AP1 no es capaz de detectar la presencia de eNB, y si eNB está transmitiendo datos a su UE1, esta RSS no es percibida por AP1 lo que permite a este iniciar una transmisión a su STA1, cuando esto sucede el eNB percibe la transmisión de AP1 y detiene su transmisión (Nodo oculto asimétrico). Esta condición de asimetría de nodos ocultos afecta al nodo que tiene configurado el menor valor umbral de ED. Además, la Fig. 2.22 permite mostrar que cualquier STA Wi-Fi puede constituirse en una fuente de interferencia para un nodo LAA, y potencialmente cada STA puede llegar a ser un nodo oculto debido a que su ED es también -62 dBm y la transmisión en UL se desarrolla en los mismos canales que DL en la banda de 5 GHz. Es por este motivo que las STA1 y STA2 también presentan una asimetría oculta con relación a eNB, ya que eNB es consciente de las transmisiones en UL de ambas estaciones, pero ni la STA1 ni la STA2 detectan la RSS proveniente desde eNB.

Para solventar los problemas de terminal oculto se valoró el uso de señales RTS/CTS para reservar el medio por parte de LAA. Sin embargo, su uso fue descartado, ya que

CAPÍTULO 2: LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES

obliga a instalar un módulo Wi-Fi en cada dispositivo LAA. Adicionalmente, esta solución no cumple el principio de neutralidad de tecnología sugerido por el 3GPP, ya que si LAA soporta señales de preámbulo de Wi-Fi, también debería soportar preámbulos de *bluetooth*, WiMax, etc.

c) Ventana de contienda (CW). – El tamaño de la CW se incrementa cada vez que LAA o Wi-Fi no pueden decodificar la señal recibida debido a las malas condiciones del canal o colisiones. LAA incrementa su CW si el porcentaje de NACK para una subtrama de referencia (usualmente la primera que llega a eNB con información del proceso HARQ) de una ráfaga transmitida es mayor que un valor umbral (80%). Debido a la diversidad multiusuario la información de HARQ contenida en la subtrama de referencia puede pertenecer a diferentes UE, la cual puede o no incluir la información de HARQ del UE afectado por las colisiones, o también puede suceder que la primera subtrama corresponda a un UE ubicado en zona libre de colisión mientras que las otras subtramas tienen la información de ACK/NACK del UE afectado por las colisiones. Estas particularidades para la evaluación de qué es una colisión en el algoritmo LBT provoca que algunos NACK no sean considerados, ya que no se encuentran en la primera subtrama de referencia o porque al momento de obtener el valor de Z este no supera el valor umbral de 80% NACK, que sería equivalente a que 80% de los UE que envían su información de ACK/NACK en la misma subtrama sufren de un alto nivel de interferencia. En resumen, la CW de LAA no necesariamente se incrementa para todas las ocasiones que valores de NACK son reportados.

Por su parte, Wi-Fi incrementa su CW cuando no recibe una señal de ACK correspondiente a la subtrama MPDU transmitida hacia sus usuarios. En caso de no recibir el ACK la capa MAC del nodo Wi-Fi entiende que una colisión ocurrió y retransmitirá la MPDU hasta recibir el ACK o la MPDU sea descartada después de un número de retransmisiones. Cada vez que el nodo Wi-Fi no recibe el ACK continúa incrementando su CW_{max}; es decir, una STA que se encuentre en zona de colisiones tiene un gran efecto sobre el incremento de la CW en el AP Wi-Fi. Estas diferencias entre ambas tecnologías pueden causar que las actualizaciones en la CW de LAA sean menores que las de Wi-Fi [42].

El proceso HARQ de LAA está basado en *Incremental Redundancy* junto con *Chase Combining*, en el cual las transmisiones erróneas son combinadas con las retransmisiones. De este modo, puede suceder que una retransmisión fallida debido a colisiones no resulte en un NACK, ya que los datos combinados de anteriores transmisiones son suficiente para que el UE decodifique la información correctamente. En cambio, Wi-Fi emplea ARQ (*Automatic Repeat Request*) con ACK, en la cual ARQ siempre descarta los datos con errores y la STA no genera el ACK, de tal modo que el AP al no recibir este mensaje entiende que los datos fueron recibidos con errores y procede a la retransmisión. Esta ventaja de HARQ provoca que, para un mismo escenario, Wi-Fi detecta más colisiones que LAA.

- d) *Retardo en la detección de colisiones.* – LAA basa su método de detección de colisiones en las señales NACK originadas en los procesos HARQ. Por este motivo, un transmisor LAA conocerá la existencia de una colisión con un retardo de 4 ms, tal como se ilustra en la Fig. 2.21, mientras que el tiempo entre la transmisión y la correspondiente respuesta del receptor en Wi-Fi está en el orden de los microsegundos. Wi-Fi detecta una transmisión fallida después de un tiempo SIFS, que es típicamente 16 μ s, por medio de las señales de ARQ. Esta discrepancia en el tiempo de reconocimiento de la existencia de una falla en la transmisión entre LAA y Wi-Fi determina que el nodo LAA seguirá con su transmisión durante al menos 4 ms, mientras que Wi-Fi aplicará su algoritmo de *backoff* e incrementará su CW después de algunos microsegundos de no recibir el ACK.
- e) *Capa de acceso MAC.* – LAA emplea LBT con diferentes valores de MCOT en función del tipo de tráfico enviado en DL, tal como se muestra en la Tabla 2.5 [9]. Los tráficos de voz y video emplean un valor pequeño de MCOT para satisfacer los requerimientos de QoS, mientras que para otros tipos de tráfico emplea valores de MCOT igual a 8 ms, lo que permite maximizar el *throughput*. Adicionalmente, durante un TTI el *scheduler* de LAA puede asignar diferentes PRB en el canal PDSCH a varios usuarios, alcanzando diversidad frecuencial y de usuario. Cada UE cuenta con un esquema MCS adaptativo en función del sensado dinámico del enlace, permitiendo tener un mejor control en la QoS (sin garantizarlo) para la banda no licenciada gracias a la aplicación de protocolos de acceso centralizado. En cambio, Wi-Fi, al no contar con un *scheduling* centralizado, usa un esquema de acceso distribuido (DCF) en el cual los usuarios acceden al canal de forma aleatoria considerando sólo el resultado de sensado del medio realizado de forma individual, lo que conduce a facilitar las colisiones, a disminuir el *throughput* y al colapso de las comunicaciones en un ambiente congestionado. La Fig. 2.23 muestra los mecanismos de sensado de Wi-Fi y LAA en operación conjunta cuando ambas tecnologías están dentro de su rango de sensado.

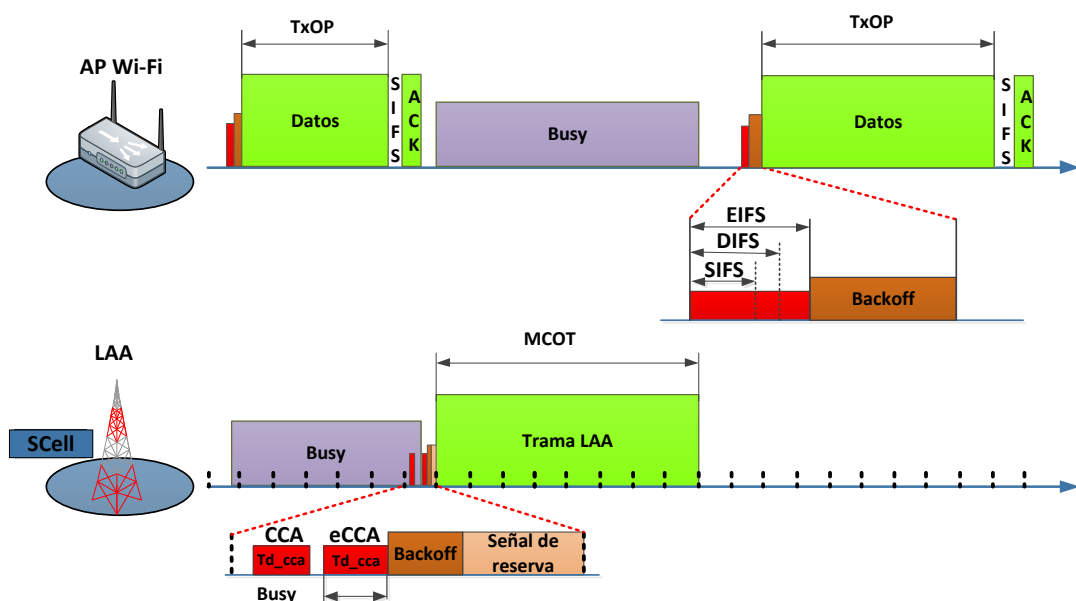


Figura 2.23: Comparación de los métodos de acceso de Wi-Fi y LAA en la banda no licenciada.

CAPÍTULO 2: LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES

También hay que recordar que Wi-Fi usa CSMA/CA como método de acceso, que es similar a LBT Cat.4, definiéndose diversas categorías de acceso para diferentes tipos de tráfico [43], tal como se muestra en la Tabla 2.5. Comparadas las categorías con LAA, los tráficos de datos *best effort* y *background* tienen asignados una duración MCOT de 2,528 ms, frente a los 8 ms de LAA. Esta asimetría con respecto a LAA puede conducir a un menor uso del canal en promedio por parte de Wi-Fi.

Tabla 2.5: Comparación de Prioridades y categorías de acceso LAA y 802.11 ac/n

Prioridad Acceso Canal en DL LAA				
Prioridad Acceso Canal	Inicial CCA	CW_{min}	CW_{max}	MCOT
1 (Voice)	25 μ s	3	7	2 ms
2 (Video)	25 μ s	7	15	3 ms
3 (Best effort)	43 μ s	15	63	8 o 10 ms
4 (Background)	79 μ s	15	1023	8 o 10 ms

Categorías de Acceso en Wi-Fi (802.11ac y 802.11n)				
Categoría de Acceso	AIFS	CW_{min}	CW_{max}	TxOP
Voice (AC_VO)	34 μ s	3	7	2,08 ms
Video (AC_VI)	34 μ s	7	15	4,096 ms
Best Effort (AC_BE)	43 μ s	15	1023	2,528 ms
(AC_BK)	79 μ s	15	1023	2,528 ms

2.2.2 Revisión de estudios de coexistencia LAA y Wi-Fi

Debido a las diferencias en las capas MAC en el acceso, centralizado de LTE¹ y distribuido de Wi-Fi, en las primeras fases de desarrollo de LTE en banda no licenciada (antes de arribar al release 13) se esperaba que las transmisiones de LTE superaran a aquellas de Wi-Fi. Esto se verificó en los trabajos de Calvante *et al.* [44] y Zhang *et al.* [5], en donde se llevan a cabo simulaciones que muestran que el sistema LTE operando en presencia de nodos Wi-Fi puede degradar el *throughput* de Wi-Fi hasta un 68%. Estos resultados conducen a la necesidad de buscar alternativas para una mejor coexistencia de estas tecnologías en el espectro libre. Paolini *et al.* en [45] y [3] sugieren un criterio de “justicia” que supone que la coexistencia de un nodo LTE en la zona de cobertura de una

¹ Aquí se emplea el término LTE para cubrir a cualquiera de las dos tecnologías (LAA y LTE-U) que operan en banda no licenciada.

red Wi-Fi no debería degradar el *throughput* del sistema Wi-Fi más que si se introdujera otro nodo Wi-Fi en dicha red.

Los estudios presentados en este párrafo representan un resumen de la evolución que ha experimentado LAA desde su inicio hasta la propuesta de uso de LBT Cat.4 correspondiente al release 13. Trabajos como [46], [47] y [48] plantearon la utilización de LBT como método de acceso para LTE en banda no licenciada, para lo cual en [47] se usan modelos basados en cadenas de Markov para analizar el desempeño de diferentes tipos de protocolos LBT en ambientes de coexistencia LAA Wi-Fi. Los esquemas LBT evaluados son LBT Cat.3 y LBT Cat.4, cuya diferencia principal radica en términos del procedimiento de *backoff*. Los resultados numéricos muestran que LBT con CW fija (Cat.3) tiene un mejor rendimiento que LBT con CW dinámica (Cat.4) pero degrada en mayor medida el rendimiento de Wi-Fi. En [36] se selecciona LBT Cat.4 como una solución prometedora para una coexistencia justa entre Wi-Fi y LAA al compararlos con LTE-U y LWA (*LTE-WLAN Aggregation*). Los autores comentan que LTE-U presenta una mayor probabilidad de colisiones en relación con LAA debido a la ausencia de un mecanismo de acceso al medio; mientras que en relación con (LWA), LAA y LTE-U proveen una mejor integración entre las bandas licenciada y no licenciada de este modo se obtiene una mejor eficiencia en especial en aplicaciones que son sensibles al retardo. Los autores de [49] evalúan los protocolos basados en LBT y *duty-cycles* (ciclos de trabajo ON-OFF) y efectúan un análisis de interferencia y *throughput* en un ambiente de coexistencia sobre la banda de 5 GHz. Los resultados de sus simulaciones muestran que LBT tiene un mejor desempeño que los mecanismos de ciclos de trabajo ON-OFF en escenarios de alta interferencia, mientras que en escenarios de baja interferencia los métodos de ciclos de trabajo ON-OFF tienen mejores resultados que LBT. En [50] se desarrolla un modelo que emplea cadenas de Markov 3D para modelar el procedimiento de LAA Cat.4 LBT y 802.11e EDCA en coexistencia, considerando diferentes prioridades de acceso para cada tecnología y el tiempo GAP de acceso (tiempo en LAA desde que se consigue el canal después de contienda y el inicio de la próxima subtrama) en un ambiente de tráfico no saturado. Los modelos teóricos permiten analizar el desempeño de la coexistencia en términos de *throughput* normalizado y retardo promedio de acceso al canal, el estudio recomienda utilizar una señal de reserva durante el tiempo GAP para mejorar el desempeño del sistema en coexistencia.

Giupponi et al. [21] desarrollan un simulador de código abierto que cumple con los requerimientos establecidos en la release 13 para la evaluación de la coexistencia entre LAA y Wi-Fi. El estudio evalúa el impacto de las señales DRS, ventanas de contienda, longitud TxOP, ED, para tráficos tipo TCP y UDP. La coexistencia es evaluada en términos de *throughput* y retardo. Los resultados muestran un impacto mínimo sobre el COT (*Channel Occupancy Time*) de Wi-Fi por parte de LAA cuando el tráfico es UDP, mientras que cuando el tráfico es TCP, LAA impacta significativamente en Wi-Fi debido a los retardos originados en la capa transporte de LAA, que genera más contiendas y colisiones, reduciendo el COT de Wi-Fi cerca de un 40% para un escenario de coexistencia (LAA Wi-Fi) en comparación con un escenario (Wi-Fi Wi-Fi). Además, el uso de señales DRS con un periodo largo (160ms) mejora ligeramente la coexistencia de ambas tecnologías en

CAPÍTULO 2: LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES

comparación con un periodo de 40 ms. Sin embargo, debe existir un compromiso entre el periodo de la señal DRS y la calidad de las medidas de RRM que se basan en DRS. Finalmente, LAA mejora significativamente su *throughput* cuando el umbral de ED de Wi-Fi pasa de -62 dBm a -82 dBm. En el estudio presentado en [35] los autores realizan una detallada evaluación de LAA, LTE-U y Wi-Fi en escenarios de coexistencia. Los resultados muestran que factores como niveles de interferencia (distancia entre nodos), valores umbrales de ED, la selección del valor de MCOT en LAA y tipo de tráfico pueden conducir a que bajo ciertas circunstancias LTE-U tenga un mejor rendimiento que LAA, a pesar de la creencia general en la industria de que LAA es superior a LTE-U en términos de coexistencia. Por este motivo, se puede concluir que LAA de manera general es un buen vecino para Wi-Fi en comparación a LTE-U; sin embargo, existen ciertas configuraciones y patrones de tráfico para los cuales LTE-U convive mejor con Wi-Fi. Adicionalmente, el tipo de tráfico (*bursty*, tasa constante, *full buffer*), mensajes de control enviados sobre la banda no licenciada como DRS o LDS, los largos retardos en la actualización de CW en LAA, los *puncturing times* en LTE-U y los valores de tiempo de transmisión, en particular los valores altos de MCOT (8 o 10 ms) en LAA comparados con los tiempos promedios de TxOP en Wi-Fi, conducen a un comportamiento injusto hacia Wi-Fi en los casos de tráfico *full buffer*.

El trabajo presentado en [51] prueba la coexistencia entre dispositivos LAA release 13 con dispositivos IEEE 802.11ac para la banda de 5 GHz en el interior de una cámara anecoica. Las pruebas muestran el impacto mutuo que la coexistencia origina sobre el otro dispositivo en su valor de *throughput* considerando diferentes valores de velocidades de transmisión, tiempo de ocupación del canal (MCOT) e índice MCS. En particular, LAA comienza a impactar negativamente sobre Wi-Fi cuando los valores configurados son altos; es decir, un MCOT (10 ms) conjuntamente con un índice MCS > 20 donde MCS 0 corresponde a QPSK y MCS28 a 64 QAM. En el trabajo de Hirzallah *et al.* [52], se muestran los resultados de retardo promedio entre dos intentos consecutivos de acceso al canal y *throughput* en el segmento de DL para el caso de coexistencia entre dispositivos LAA y Wi-Fi con diferentes tipos de prioridades de acceso al canal (*Voz* y *Best effort*). Los datos son obtenidos directamente de operadores móviles, los resultados muestran que tanto el retardo como el *throughput* para ambas tecnologías son sensibles al tipo de tráfico. En concreto, el predominio de tráfico de voz o *best effort* sobre los eNB LAA impacta sobre el desempeño de los AP de Wi-Fi. Cuando el tráfico de voz predomina en LAA los retardos en Wi-Fi son mayores; en cambio, si el tráfico tiene proporción similar de voz y *best effort* sobre el eNB LAA, el retardo y *throughput* de Wi-Fi mejoran (mientras que LAA empeora), y en promedio alcanzan una mejor equidad entre ambas tecnologías. Los autores de [53] formulan un modelo matemático para calcular el *throughput* promedio para cada UE en una red LAA y para cada STA perteneciente a la red Wi-Fi. Así también, desarrollan un problema de optimización para maximizar simultáneamente el *throughput* total del sistema y el índice *fairness* para una red en coexistencia LAA Wi-Fi. Las consideraciones del modelo planteado, indican que existe una macro-celda con un eNB LTE que controla el acceso a la banda no licenciada para la operación de LAA y Wi-Fi

asignando slots de tiempo (τ_{Wi-Fi} y τ_{LAA}) para cada tecnología evitando de esta manera las colisiones entre estas redes. De igual manera, el modelo considera que los UE enfrentan diferentes condiciones de canal de tal modo que su probabilidad de acceso es diferente a la presentada por una distribución uniforme, que es usada comúnmente en este tipo de análisis matemáticos. El valor del slot de tiempo y *throughput* son las variables a optimizar para alcanzar el máximo de *throughput* y *fairness* del sistema. Los resultados numéricos demuestran un aumento del *throughput* LAA mayor al 75% en comparación con el caso cuando la probabilidad de transmisión es uniforme para los UE, también existe una ganancia del 8-9 % en el índice *fairness* para la red LAA.

Se debe notar que no existe solo el problema de coexistencia entre redes heterogéneas como LAA y Wi-Fi, aunque por la presencia de Wi-Fi en banda no licenciada es la que capta la mayor atención de la industria. También se espera que conforme LAA mejore sus características de coexistencia, tendrá mayor participación en el mercado, de tal modo que la coexistencia de redes homogéneas LAA LAA es un tema que captará gran atención en el espectro no licenciado. Por este motivo, esta tesis evalúa este tipo de escenario. En el caso de despliegues LAA en áreas privadas como campus universitarios, hospitales, centros comerciales, etc. esta tecnología aprovecha todas las fortalezas de LTE, en donde la gestión centralizada de varios eNB por parte de un único proveedor permite alcanzar las mejores prestaciones de la red. Cuando intervienen diferentes operadores de redes LAA sobre la misma área física, los problemas de coexistencia ocupan un lugar primordial, ya que cada eNB transmite con su propia sincronización en tiempo. De manera general, no se ha encontrado literatura que haya estudiado la coexistencia entre redes LAA pertenecientes a diferentes operadores.

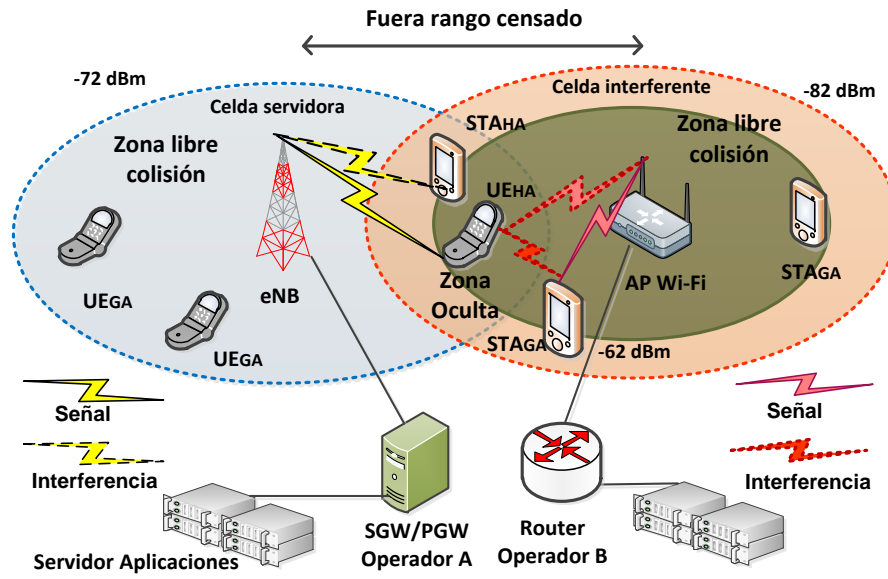
La estandarización de la coexistencia de tecnologías que comparten la banda no licenciada de 5 GHz es un trabajo que aún está en desarrollo, existen grupos de trabajo del 3GPP que discuten sobre las últimas especificaciones para un mejor ajuste de los parámetros LAA operando en NR-U [54] con la finalidad optimizar la coexistencia con Wi-Fi. El informe presentado en [55] indica que la coexistencia entre 3GPP e IEEE en la banda de 5 GHz no solo parece injusto, sino también menos eficiente debido a la existencia de colisiones que en cierto modo pueden ser evitadas, proponiendo la inclusión de valores umbrales de ED y preámbulo comunes para ambas tecnologías. Se espera que estos análisis continúen, considerando que los últimos resultados obtenidos en despliegues reales no son los esperados. Trabajos recientes como el presentado en [56] muestran los resultados obtenidos del procesamiento de datos recolectados de redes LAA y Wi-Fi desplegadas en diferentes áreas de Chicago por parte de los operadores móviles. De acuerdo a los autores, las mediciones revelan que la coexistencia entre estas redes en ambientes urbanos, en donde ambos sistemas utilizan agregación de portadoras con anchos de banda solapados, es un problema que aún requiere una mayor investigación. Los resultados de la investigación muestran cómo la red LAA gestiona sus recursos entre banda licenciada y banda no licenciada para diferentes tipos de tráfico (voz, datos y *streaming*), analizando sus valores SINR, TxOP y número de PRB, al final realiza una comparación del retardo para escenarios

Wi-Fi Wi-Fi y LAA Wi-Fi, mostrando que Wi-Fi presenta una degradación en esta métrica cuando coexiste con LAA.

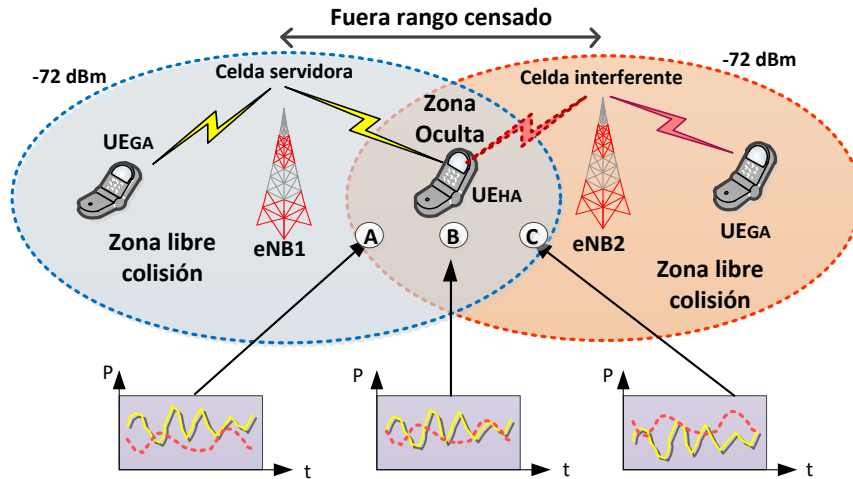
2.2.3 Problema de nodo oculto en LAA

Analizados los aspectos básicos de las tecnologías empleadas por LTE y Wi-Fi en banda no licenciada, nos centramos en el problema de terminal oculto, un clásico en tecnologías de acceso compartido. La Fig. 2.24 ilustra este problema para los dos tipos de escenarios que nos interesan: Heterogéneo Fig. 2.24 a) (LAA Wi-Fi) y Homogéneo Fig. 2.24 b) (LAA LAA). El contexto es el de escenarios *indoor/hotspot* que, como se mencionó anteriormente, son los escenarios en los cuales se espera el mayor despliegue de estas tecnologías. De este modo, se busca prevenir o evitar los problemas de degradación del rendimiento tanto del UE como de la red LAA como consecuencia de las colisiones/interferencias que el terminal oculto puede generar sobre los dispositivos que están en su zona de influencia, mediante la detección de los UE afectados por las colisiones independientemente de la tecnología fuente de la interferencia, lo cual constituye el objeto de esta tesis.

En el escenario heterogéneo Fig. 2.24 a), se observa que el nodo interferente, en este caso un AP Wi-Fi, tiene configurado dos valores umbrales de ED, un valor igual a -62 dBm para sensar señales de diferente tecnología y otro igual a -82 dBm para sensar señales con preámbulo 802.11. El eNB LAA tiene configurado su valor umbral de ED con un valor único de -72 dBm y ambos nodos se encuentran fuera del área de sensado del otro, de tal modo que entre estos dos nodos se desarrolla el problema de terminal oculto. Este es el escenario utilizado para los análisis desarrollados en los siguientes capítulos. Aquí no existe el problema del terminal oculto asimétrico, ya que este aparece cuando el eNB se ubica la interior de la franja de potencias de [-82, -62] dBm en relación al AP [57]. La condición de nodo oculto mostrada en la Fig. 2.24 a) provoca que exista un área de cobertura común entre el eNB y el AP. Debido a esta condición tanto el eNB como el AP pueden iniciar su transmisión en DL en cualquier instante, de tal modo que al compartir el canal y en caso de transmisiones simultáneas se genera una alta interferencia sobre las STA o UE que se ubican en la zona oculta. Esta situación provoca que se genere una alta demanda de recursos radio por parte del UE debido a las constantes retransmisiones que se generan cada vez que existen colisiones. Así también, el AP ve comprometido su rendimiento, debido a que su procedimiento de *backoff* y aumento de la CW son muy sensibles a las colisiones. En este sentido, una STA ubicada en zona oculta no enviará sus reportes de ACK debido a las constantes colisiones que este dispositivo enfrenta al ubicarse en esta zona, provocando que el AP permanezca en silencio por elevados periodos de tiempo debido a que el *backoff* y la CW están en constante incremento provocado por las colisiones. Además, tal como se mencionó anteriormente, cualquier STA puede llegar a ser un potencial nodo oculto o fuente de interferencia durante su transmisión en UL.



a) Redes heterogéneas LAA Wi-Fi



b) Redes homogéneas LAA LAA

Figura 2.24: Nodos ocultos para escenarios homogéneos y heterogéneos.

En el caso del escenario homogéneo (LAA LAA) Fig. 2.24 b) los valores configurados para los dos eNB son iguales, lo que permite tener zonas de sensado simétricos. En este caso en particular, el eNB1 representa el nodo servidor y eNB2 representa el nodo interferente, el cual pertenece a otro operador. Ambos nodos se encuentran fuera del área de sensado, lo que puede deberse a la distancia existente entre nodos, a problemas de desvanecimientos, obstrucciones, pérdidas de propagación, etc. de tal modo que los nodos no son capaces de detectar la presencia del otro (la señal interferente recibida está por debajo del valor umbral de ED). Bajo estas condiciones, ambos nodos (eNB1 o eNB2) pueden transmitir simultáneamente para atender los requerimientos de los UE ubicados en sus respectivas celdas, generando colisiones en su zona de cobertura común y continuando sus transmisiones sin detenerse debido a su incapacidad de detectar la presencia del otro. Cuando esto sucede, los UE ubicados en zona oculta reciben una alta y constante interferencia.

CAPÍTULO 2: LTE EN BANDA NO LICENCIADA Y SU COEXISTENCIA CON OTRAS REDES

A los UE o STA ubicados en las zonas afectadas por la presencia de nodos ocultos los vamos a etiquetar como (UE_{HA} , STA_{HA}) respectivamente, mientras que los UE o STA ubicados en zonas libres de colisión se etiquetarán como (UE_{GA} , STA_{GA}). El área de solape de coberturas entre nodos transmisores e interferentes la denominamos como zona oculta y está determinada por los valores de umbral de ED configurados en los eNB o AP Wi-Fi. Cualquier dispositivo ubicado en la zona oculta se verá afectado por un alto nivel de interferencia debido a las señales provenientes de los nodos interferentes; así también estos nodos percibirán una gran fluctuación del nivel de SINR debido a las alternancias entre colisión y no colisión. En LTE, estos hechos conducen a un incremento y uso variable de los recursos radio, llegando incluso al desperdicio de recursos al tratar de atender los requerimientos de retransmisión asociado al UE_{HA} . Adicionalmente, las técnicas empleadas por LTE en banda licenciada para el control de interferencias tales como ICIC (*Inter-cell Interference Coordination*) no son aplicables en la banda no licenciada, debido a que ICIC requiere la coordinación entre eNB, lo cual no es factible cuando los nodos eNB pertenecen a diferentes operadores. Por otra parte, en una red compuesta por diferentes tecnologías la gestión coordinada tampoco no es posible, ya que estas tecnologías no serán capaces de compartir señales de control para una gestión centralizada debido a que emplean diferentes protocolos en sus capas física y MAC.

Como se aprecia en la Fig. 2.24, es común que la zona libre de colisión cubra una superficie mayor que la que corresponde a la zona oculta, lo cual hace posible aplicar técnicas de reuso del canal para la mayoría de UE que están asociados al eNB. Sin embargo, tan pronto como el eNB trata de satisfacer los requerimientos de los UE que están afectados por el problema de terminal oculto, el desperdicio de recursos asociados al intento de satisfacer las demandas de tráfico de éstos puede comprometer el servicio de toda la celda. Esto se debe a que los UE_{HA} requieren continuas retransmisiones o el uso de un excesivo número de PRB, los cuales además tendrán un valor bajo de MCS, lo que conduce a una baja eficiencia espectral. Como resultado, los UE_{HA} roban recursos a los UE ubicados en zonas libres de colisión (UE_{GA}), los cuales pueden ver afectado su rendimiento como consecuencia del desperdicio de recursos que se produce al atender los UE_{HA} .

Por los motivos anteriormente mencionados, la presencia de nodos ocultos tiene un efecto sobre la red que no puede ser desestimado y, por ende, es importante tener una idea de cuál es el efecto real que la presencia de nodos ocultos puede ejercer sobre una red LAA evaluando su degradación para diferentes tipos de despliegues como por ejemplo cuando se emplea el enlace DL en coexistencia LAA LAA y cuando se emplea en enlace DL y UL como sucede en el caso de coexistencia LAA Wi-Fi. Así también, con la finalidad de proveer cierto nivel de QoS en la banda no licenciada, se requiere establecer estrategias para la detección de cuándo un nodo es afectado por interferencias provenientes de nodos ocultos y así evaluar su traspaso a otra banda cuando realmente constituya un problema. Para esto, el uso de las actuales métricas desarrolladas por LTE para la detección de interferencias constituye una alternativa encaminada a dar una solución a este problema, la cual es desarrollada en los próximos capítulos.

El hecho de que un UE se encuentre dentro de la zona oculta no implica que la potencia de la señal interferente sea igual o mayor que la potencia de la servidora, ya que a pesar de que exista colisión entre las señales útil e interferente, si la señal de nodo servidor es mayor que la señal interferente, ésta podría no generar errores en recepción. Esta aclaración es necesaria ya que la gravedad de la interferencia depende del nivel de la potencia de las señales servidora e interferente en recepción y no del nivel umbral de ED que el eNB tenga configurado para detectar la presencia de nodos en bandas no licenciadas. De manera general, para nuestro análisis se seleccionan 3 zonas de estudio, las tres ubicadas en el interior de la zona oculta Fig. 2.24 b). La primera está cercana a su nodo servidor, la segunda en una zona intermedia y la tercera, más cercana a su nodo interferente. De esta manera, se espera tener un análisis más detallado de los efectos de los nodos ocultos sobre estos terminales y sobre la red en su conjunto en función de las diferencias entre las potencias recibida útil e interferente sobre los UE_{HA}.

Capítulo 3

Problema del Nodo Oculto en Redes LTE Desplegadas en Banda sin Licencia

En el capítulo anterior se ha analizado de forma general la coexistencia entre las redes LTE con otras redes LTE y Wi-Fi y se han descrito en detalle las implicaciones que tiene el protocolo de acceso en LAA comparándolo con el existente en Wi-Fi, estableciendo la necesidad de encontrar un procedimiento en LAA para controlar las colisiones a costa de perder eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico. Además, se ha mencionado que la existencia de nodos ocultos va a suponer una degradación de las prestaciones y se ha establecido el interés en llevar a cabo un análisis profundo de la influencia de estos terminales ocultos y de las alternativas basadas en el estándar LTE que se pueden implementar para detectar cuándo un UE se ve afectado por ellos para, con esa información, gestionar el posible traspaso del nodo afectado a otro canal de la banda libre o a la banda licenciada donde pueda ser servido sin problemas.

Cuando dos nodos pertenecientes a diferentes operadores, carentes de sincronización, con similar o diversa tecnología comienzan a convivir sobre la misma área geográfica, existe una alta probabilidad de que un área solapada común aparezca entre los mismos. De igual manera, en escenarios urbanos densos la probabilidad de que varios nodos ocupen los mismos canales debido a la imposibilidad de una coordinación común es elevada. Con el

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

fin de mejorar la coexistencia y minimizar la interferencia (colisiones) en estos escenarios se requiere un entendimiento profundo de cuál es el efecto real que los nodos ubicados en zonas ocultas pueden introducir sobre sus respectivas redes y en las de sus vecinos. En el análisis se tendrá en cuenta que los escenarios más habituales de despliegue tienen ciertas particularidades como son una reducida cobertura, baja potencia del transmisor y limitada movilidad.

Es bien conocido que la compartición dinámica del espectro es una atractiva vía para mejorar la utilización de recursos en sistemas inalámbricos. Sin embargo, en ambientes dinámicos es difícil asegurar que la interferencia no afectará a otras transmisiones. Por tal motivo, se debe utilizar alguna técnica para predecir o evitar las interferencias provenientes de un nodo oculto. Como se ha dicho en el capítulo anterior, un método típico usado para evitar este problema en Wi-Fi es la transmisión de señales RTS/CTS previas a la transmisión de datos. No obstante, esta técnica no es práctica en ambientes en los cuales no todos los nodos transmiten usando la misma tecnología. Además, no es deseable el uso de estos métodos, ya que introducen una excesiva señalización, en especial en ambientes con elevado número de nodos (despliegues densos). En este contexto de coexistencia de LTE con otras tecnologías, puede ser útil el análisis del conjunto de métricas ya establecidas en el estándar LTE vinculadas al desarrollo de las estrategias RRM e ICIC (en conjunción con el análisis del propio funcionamiento de las estrategias de RRM), con el propósito de emplear dicha información en el desarrollo de algoritmos que permitan la detección de nodos ocultos de forma independiente de la tecnología interferente.

Como primer paso, en este capítulo se estudian los efectos que el problema de terminal oculto puede causar sobre cada una de las redes (servidora e interferente) bajo una gran variedad de escenarios y condiciones de simulación. De este modo es posible cuantificar la degradación de las redes y comprender cómo y cuánto se ven afectadas por la presencia de UE o STA en el interior de la zona oculta (UE_{HA} , STA_{HA}). Estos análisis se desarrollan en escenarios de coexistencia homogéneos (LAA LAA) y heterogéneos (LAA Wi-Fi). La complejidad del problema requiere el uso de herramientas de simulación, de tal modo que NS-3 es usado para crear y evaluar los escenarios. A continuación, se describe un conjunto de métricas definidas en el estándar LTE tales como RSRP, RSRQ, PRB y CQI, que serán estudiadas para evaluar su uso potencial en la detección de interferencias provenientes de cualquier fuente y que, debido a las limitaciones generadas por el valor de umbral de ED, el eNB es incapaz de percibir. El análisis efectuado en este capítulo se limita al uso potencial de la distribución estadística de la métrica CQI reportada por los UE para determinar si un terminal específico es afectado por las interferencias provenientes de terminales ocultos. Finalmente, se concluye con el análisis de la relación que existe entre la carga de tráfico soportado del nodo oculto y los datos estadísticos de CQI reportados por los nodos ubicados en la zona oculta. El uso complementario de otras métricas se lleva a cabo en el capítulo 4.

En resumen, este capítulo comienza con un análisis del estado del arte en la Sección 3.1. A continuación, en la Sección 3.2, se indica el impacto que la presencia de

nodos ocultos ejerce sobre las redes LAA y Wi-Fi considerando un canal ideal de comunicaciones. Después, en la Sección 3.3 se describe un conjunto de métricas definidas en el estándar LTE para evaluar su potencial uso en la detección de interferencias provenientes del terminal oculto, poniendo un énfasis especial en el estudio de la distribución estadística de la métrica CQI y ampliando el análisis considerando un canal ideal de comunicaciones y un canal más complejo que considera las pérdidas multitrayectoria. Por último, en la Sección 3.4 se presentan las conclusiones. Estas contribuciones han sido publicadas en [58] y [59].

3.1 Estado del Arte

El problema de nodo oculto es un problema típico de las redes que emplean técnicas basadas en sensado de portadora como método de acceso al medio. De manera general, los métodos de detección de colisiones se pueden clasificar en métodos proactivos y reactivos. En ambos casos, el principal problema es la fiabilidad del método de detección, la cantidad de señalización adicional que se genera para realizar la predicción y la cantidad de interferencia o degradación del servicio antes de proponer una acción reactiva. El problema de nodo oculto ha sido ampliamente estudiado en el contexto de redes 802.11 y redes Ad-Hoc. Sin embargo, en redes LTE que operan en banda no licenciada es un tema que está tomando gran atención, en especial con miras al protagonismo que las redes LAA tendrán en el contexto de 5G y la coexistencia con redes heterogéneas en la banda no licenciada.

3.1.1 Estudios que evalúan la degradación del servicio.

Los trabajos presentados en [35] y [21] estudian la coexistencia LAA/LTE-U con Wi-Fi para evaluar el impacto del problema del terminal oculto. El objetivo de las simulaciones es mostrar el impacto que un incremento en el número de nodos ocultos ejerce sobre LTE-U y LAA, respectivamente, en un escenario *indoor*. Al contrario que LAA, LTE-U no aplica el procedimiento de *backoff*, de tal modo que, según los resultados obtenidos, las transmisiones de Wi-Fi se ven más afectadas por las transmisiones de LTE-U que por las provenientes de una red LAA. En consecuencia, en un escenario con presencia de nodos ocultos, LAA es una tecnología más equitativa que LTE-U.

En [60] los autores investigan las colisiones resultantes del uso de diferentes valores de umbral de ED en escenarios de coexistencia LAA y Wi-Fi. Los resultados muestran que el valor umbral LAA ED cumple un papel crítico en el desempeño de la coexistencia. Con un valor elevado de umbral LAA ED, las colisiones ocurren con más frecuencia, limitando el desempeño de la red. Por otro lado, con un valor bajo de umbral LAA ED, el sistema reduce su rendimiento debido a *backoffs* innecesarios. Los autores proponen un algoritmo

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

cuya idea básica es que el umbral del eNB LAA ED varíe en forma dinámica, de tal modo que se reduzca cuando el eNB enfrente colisiones frecuentes. En caso contrario, se mantiene un valor alto de umbral y de este modo se fomentan las transmisiones simultáneas mientras se logra evitar las colisiones.

Los autores de [40] consideran un nodo eNB LAA en coexistencia con AP Wi-Fi en modo oculto asimétrico, en donde el eNB puede escuchar al AP pero el AP no escucha al eNB. El comportamiento de esta red es modelado por medio de cadenas conjuntas de Markov, obteniéndose expresiones analíticas que modelan el *throughput* y el retardo de acceso al canal. Los mismos autores en [61] proponen un esquema para el control de interferencia en *downlink* para el eNB LAA. En concreto, los autores analizan la distorsión que la señal Wi-Fi induce en el eNB y, de forma recíproca, la que genera la señal del eNB en el AP Wi-Fi considerando la condición asimétrica de nodo oculto entre las dos radio-bases. Basado en este análisis, se desarrolla una técnica de control de potencia para limitar la interferencia entrante y saliente del eNB LAA. Al incrementar la potencia los AP ocultos asimétricos no pueden transmitir. Sin embargo, el esquema propuesto incrementa la interferencia y no previene la interferencia causada por los nodos ubicados más allá del límite de cobertura del eNB. Así también, Lee *et al.* [62] proponen como solución al problema de nodos ocultos asimétricos una técnica basada en el control de potencia y precodificación para un sistema multi-antena y multi-usuario, que serán aplicados sobre los eNB LAA, y harán que AP Wi-Fi difieran sus nuevas transmisiones. La idea principal es aumentar la potencia de transmisión de LAA de tal modo que los nodos ocultos circundantes conozcan la existencia del eNB y abandonen la zona oculta.

Sathya *et al.* [63] desarrollan un grupo de experimentos en un despliegue real en el campus de la Universidad de Chicago en donde los AP Wi-Fi y eNB LAA están ocultos entre sí. Se despliegan tres escenarios de coexistencia: i) clientes equidistantes a las radiobases LAA y Wi-Fi, ii) clientes cerca del AP Wi-Fi y iii) clientes cerca del eNB LAA. Los resultados muestran que en un escenario con CA en donde LAA usa tres canales no licenciados (60 MHz) que se solapan con los 80 MHz de Wi-Fi, el *throughput* de las STA de Wi-Fi se degrada considerablemente. En general, las prestaciones de Wi-Fi se ven más severamente degradadas por la presencia de un nodo oculto que LAA. Los *throughputs* de LAA y Wi-Fi se reducen en 35% y 97%, respectivamente, cuando existe coexistencia en comparación a si el otro sistema no está presente. Por otra parte, en el estudio se concluye que cuando Wi-Fi y LAA usan múltiples canales, la elección de los canales primarios (los usados por las STA que no soportan *channel bonding*) por parte de diferentes AP puede tener un efecto sustancial sobre el rendimiento de LAA debido al incremento en el intercambio de tramas de señalización como RTS/CTS. En este contexto, llegan a la conclusión de que LAA tiene un mayor rendimiento cuando coexiste con tres puntos de acceso Wi-Fi aplicando *channel bonding* de 80MHz que funcionan en el mismo canal, pero usando diferentes canales primarios que cuando coexiste con un único AP Wi-Fi 80MHz, siempre y cuando el número de clientes (STA) sea igual en ambos casos.

3.1.2 Propuestas que evalúan métodos de detección de nodos ocultos o alternativas de mitigación/solución a sus efectos.

En [64] y [65] los autores señalan la imposibilidad de coordinar diferentes operadores o tecnologías que operan en el espectro libre, como es el caso de coexistencia entre redes LAA y Wi-Fi. Por tal motivo, los autores discuten el uso de la señal de reserva del canal por parte de LTE utilizando la tecnología FDR (*Full Duplex Radio*). Esta tecnología se refiere a la capacidad del UE de transmitir y recibir simultáneamente en la banda no licenciada seleccionada. La propuesta señala que el UE con FDR envía un tono de ocupado durante todo el periodo durante el cual recibe datos del eNB. Gracias a este tono, los nodos que se encuentren en condición oculta posponen su transmisión hasta que el canal esté libre. La principal limitación es el desperdicio de recursos radio, debido a que ningún nodo que esté cerca del UE podrá transmitir durante la duración del tono de ocupado. Adicionalmente, el UE debe transmitir el tono de ocupado y simultáneamente recibir los datos en el mismo canal de frecuencia, lo que genera una auto-interferencia que debe ser cancelada.

Los estudios presentados en [66], [67] y [68] analizan los problemas asociados al terminal oculto sobre redes LTE-U en escenarios de coexistencia con Wi-Fi. En [67] se propone el uso de las señales Self-CTS/CTS-to-Self de Wi-Fi por parte del dispositivo LTE-U, de tal modo que el nodo UE LTE-U informará a todos los nodos Wi-Fi circundantes que podrían estar en condición oculta, que el canal permanecerá libre. Las señales Self-CTS/CTS-to-Self permiten a dispositivos 802.11n transmitir solamente tramas CTS a sí mismos y asegurar que dispositivos con estándares anteriores puedan leer la información contenida en la cabecera de CTS para proteger las posteriores tramas 802.11n. Esta solución asume que el dispositivo LTE-U deberá contar con una interfaz Wi-Fi para generar la señal CTS. En [68] realizan el desarrollo matemático de la solución sugerida en el estudio anterior [67]. Tal como se mencionó anteriormente, esta solución no cumple con el criterio de neutralidad de equipos que plantea el 3GPP [69], [70]. De igual manera, el trabajo presentado en [71] propone el uso de las señales RTS/CTS como medida de protección en contra de nodos ocultos; sin embargo, señala que las señales RTS/CTS en Wi-Fi están diseñadas para transmisiones punto a punto, mientras que LAA opera en modo punto multipunto. A pesar de esto es posible emplear un mecanismo simple en donde los UE envían un CTS en respuesta a la señal RTS enviada desde su eNB. El principal problema con RTS/CTS es que estas señales introducen un gran incremento en la señalización que puede provocar una reducción en la eficiencia de la comunicación, en especial sobre despliegues densos de redes WLAN.

Con un enfoque diferente, los autores de [72] sugieren el uso de las medidas de RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) con la finalidad de detectar nodos ocultos. Para permitir este planteamiento, el UE debe reportar su RSSI (nivel de potencia total recibida, incluyendo señal útil e interferencia) al eNB, donde se efectúa una comparación entre el

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

RSSI del UE y el RSSI del eNB y si el RSSI del UE está por encima de un valor umbral y el RSSI del eNB está por debajo del mismo umbral dentro de la misma ventana temporal, el UE estará ubicado en zona oculta. El problema con este método es que el documento en sí no indica cómo calcular el valor umbral. Además, este trabajo menciona que probablemente el valor promedio RSSI y el nivel de ocupación del canal no serán suficientes para una correcta detección de nodos ocultos.

En el estudio presentado en [73] los autores analizan la asistencia del UE para generar reportes (dirigidos a su eNB LAA en la banda licenciada) sobre el estado del canal no licenciado a través de la banda licenciada y no licenciada. El documento señala que los reportes del estado del canal enviados por los UE sobre banda licenciada y referidos a la banda sin licencia se encuentran con frecuencia desactualizados y no reflejan la condición actual del canal no licenciado en el instante que el eNB recibe esta información. Por este motivo las colisiones con otros nodos no pueden ser evitadas. Sin embargo, se puede prevenir este problema si se genera una señal de reserva del canal (opción no contemplada en el estándar) tan pronto como el UE detecta la existencia de transmisiones en la frecuencia del canal no licenciado durante la fase de detección de portadora. La señal de reserva viaja en el canal no licenciado, permitiendo a cualquier eNB LAA percatarse casi inmediatamente de esta condición. Además, el eNB que tenga asociado el UE que genera la señal de reserva será capaz de seleccionar un canal adecuado y ejecutar su procedimiento LBT basado en la información actualizada.

En [74] los autores indican que una solución potencial al problema de terminal oculto es usar los reportes/medidas de CSI/interferencia generados por el UE conjuntamente con el control de potencia en DL. El UE envía a su eNB los reportes de CSI/interferencia, de tal modo que el eNB podría detectar el problema de nodo oculto si el reporte de interferencia está por encima de un valor umbral y así evitar el *scheduling*. Alternativamente, el eNB puede ajustar su nivel de potencia en DL basado en el reporte de CSI para aumentar la potencia de la señal que arriba a los UE ubicados en los límites de la celda dentro de los límites establecidos por la regulación. La principal limitación es que las medidas de CSI tienen un retardo de 4 ms, lo que implica que el potencial nodo oculto puede estar en estado *Idle* en el momento en que el UE ubicado en zona oculta realiza sus mediciones de CSI y puede encontrarse transmitiendo cuando el eNB transmite en DL basado en el último reporte que llegó del UE afectado por el nodo oculto. Además, el estudio indica que para que esta solución sea viable se debe considerar la reducción del retardo de los reportes de CSI.

Los autores de [75] discuten técnicas de selección de canal y descarga (*offloading*) de los UE a otros canales basadas en el valor promedio de los CQI (CQI_{av}) reportados por el conjunto de UE asociados a cada canal. El algoritmo de selección de canal calcula el CQI_{av} (asociado al promedio de todos los UE) de cada canal no licenciado (el esquema también almacena el máximo CQI de cada UE_j en el conjunto de canales no licenciados, denominado $MCUE_j$) y selecciona como mejor canal aquel con máximo CQI_{av} corregido

por un factor de equidad. El trabajo sugiere también un algoritmo para el *offloading* de UE de la banda sin licencia a la banda licenciada. Se sugiere el *offloading* de aquellos UE que estén más afectados por la interferencia. Los autores argumentan que decidir el *offloading* de UE con el menor CQI no es adecuado, ya que un UE puede estar situado en el exterior de la celda y no necesariamente afectado por interferencias. En ese caso, el *offloading* a la banda licenciada no aporta ningún beneficio. Por tanto, los autores indican que el *offloading* se debe aplicar al usuario cuya diferencia entre el máximo CQI almacenado (correspondiente al máximo medido en el conjunto de todos los canales no licenciados) y el CQI actual (el medido por el UE en el canal actual) sea el mayor de todos los UE evaluados. La principal limitación de este método es que requiere obtener el CQI de cada UE por cada canal libre; consecuentemente, el eNB debe operar en cada canal no licenciado por un tiempo determinado. Por otro lado, este esquema argumenta que el UE con la mayor diferencia entre $\max \text{CQI} - \text{CQI}_{\text{actual}}$ es el que más degrada la red, lo cual no es necesariamente cierto, en especial en escenarios con canales afectados por desvanecimientos multitrayectoria y cuando se tiene la presencia de nodos ocultos.

En [76] se propone un algoritmo para la asignación de recursos en la banda licenciada y no licenciada en sistemas LAA en presencia de nodos ocultos Wi-Fi. En resumen, se define un peso ω para la banda no licenciada el cual es adaptativo en función de la presencia de nodos ocultos, de tal modo que el *throughput* que cualquier UE puede alcanzar será la suma del *throughput* de banda licenciada más el *throughput* ponderado por ω en la banda no licenciada. De este modo, ω toma en cuenta el impacto de los nodos ocultos en torno a los UE habilitando o deshabilitando el uso de la banda no licenciada, permitiendo el desarrollo de un algoritmo de asignación de recursos para esta banda. Este algoritmo busca la maximización del *throughput* de todos los usuarios LAA asumiendo que los UE emplean las dos bandas (licenciada y no licenciada), teniendo algunas restricciones a cumplir como: que a cualquier UE se le podrá asignar un porcentaje de subportadoras de la banda licenciada y que la suma de todas las fracciones de subportadoras asignadas en la banda licenciada tendrá un máximo igual a 1; que la suma de la potencia transmitida por las subportadoras en la banda licenciada no debe ser mayor que la potencia total del eNB; que la suma de la fracción de tiempos asignados a los UE en banda no licenciada debe ser menor que $t_{\max} = \text{MCOT}$; y que existe un *throughput* mínimo a cumplir, el cual es determinado por ciertos requerimientos mínimos de QoS.

Huang *et al.* en [77] calculan la probabilidad de ocurrencia de los problemas de nodos oculto y expuesto en un ambiente de coexistencia LAA y Wi-Fi. Adicionalmente, se propone el algoritmo denominado (*Listen Before Receive* LBR), el cual consiste en el intercambio de señales de estado del canal a través de la banda licenciada PCell entre eNB y UE que permite al eNB autorizar o negar la transmisión de datos en DL y UL en el espectro no licenciado. Aunque el trabajo considera un contexto más avanzado en el que es factible la transmisión en el UL, el interés radica en el manejo del problema de terminal oculto. LBR está compuesto por 3 procedimientos: En el primero, cuando el eNB desea transmitir datos a un usuario en específico en DL, invita a este UE a sensar el canal en la

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

banda no licenciada y enviar este resultado al eNB. Debido a la incertidumbre en el acceso al canal no licenciado la respuesta del estado del canal debe ser enviada por la banda licenciada PCell. Con la información del estado del canal en torno al eNB y al UE, el eNB decide la conveniencia o no de la transmisión, si el UE sensa el canal como ocupado, el eNB no debe transmitir a pesar que su evaluación del estado del canal sea libre (problema de nodo oculto). Por otro lado, si el UE reporta el canal como libre, el eNB podría transmitir los datos hacia el UE a pesar de que el eNB sensa su canal como ocupado (problema del nodo expuesto). En forma similar, en el segundo procedimiento si el UE desea realizar una transmisión en UL en la banda no licenciada, este envía una solicitud de acceso al eNB usando la PCell, enviando conjuntamente su estado del canal. Al recibir el eNB esta solicitud, éste evalúa el estado del canal en torno al UE y el estado de su canal e informa su decisión al UE empleando la PCell. De este modo el eNB puede decidir la conveniencia de permitir o no la transmisión de datos en UL, siendo posible que el eNB detenga una transmisión potencial debido al problema de nodo oculto evitando de esta manera potenciales colisiones, o permita la transmisión de datos a pesar de la existencia de nodo expuesto. Finalmente, el tercer procedimiento considera la predisposición del eNB de permitir o no la transmisión de datos en función del intercambio de información del sensado local y remoto del canal. Por este motivo, el algoritmo genera un *token* en su registro cada vez que un nodo detuvo una potencial transmisión debido a problemas de nodo oculto o consume un *token* cada vez que un nodo transmitió a pesar de la existencia del problema de nodo expuesto. Para minimizar el impacto debido a colisiones imprevistas que pueden ocurrir durante la transmisión de datos a pesar de aplicar el intercambio de señales de sensado del canal, el algoritmo aplica un mecanismo de transmisión *p-persistente*. Específicamente, si el eNB evalúa la existencia de una condición de nodo expuesto y existen *tokens* disponibles, consume un *token* para transmitir los datos con una probabilidad p . Si una colisión ocurre, el nodo que transmitió ingresa en la etapa eCCA, como cualquier proceso LBT. La selección de un valor adecuado de probabilidad p es importante para asegurar una probabilidad justa de acceso al canal para LAA. Se debe notar que la transmisión persistente solo se realiza si el nodo LAA tiene *tokens* disponibles. El principal problema con esta solución es que no considera los tiempos de retardo que existen entre la generación del reporte de estado del canal y su arribo al eNB al emplear la PCell, lo que conduce a que estos pueden estar desactualizados en el momento de su uso.

En el trabajo descrito en [78] los autores proponen como solución al problema de nodo oculto un sistema que permite evaluar la interferencia debida a las colisiones, solución que denominan (*Empowering LTE with Interference Awareness* ELI). ELI se enfoca a sistemas TDD, donde DL y UL operan en la misma banda no licenciada. Esta solución comprende 3 etapas: i) detección de interferencias debido a nodos ocultos, para lo cual el eNB evalúa si existen señales NACK (que podrían deberse a colisiones o malas condiciones del canal). En concreto, el eNB recibirá NACK como respuesta al envío de datos en DL y debido a las colisiones percibidas por el UE se activará el procedimiento de *backoff* y el UE permanecerá en silencio. ii) Estimación de la interferencia sobre los diferentes canales en los cuales opera LAA: el algoritmo evalúa las medidas en UL y DL (en el sistema de acceso

TDD) en conjunto con las señales ACK, NACK y los retardos asociados a estas señales. iii) Ciclos periódicos de toma de medidas: el eNB evaluará cada canal no licenciado al que tiene acceso en periodos de 3 ms (Pasos i, ii) en modo *round-robin* para todos los clientes. El principal problema con ELI es que las señales ACK o NACK no logran determinar todas las colisiones que ocurren en el ambiente, sino aquellas que los esquemas FEC no fueron capaces de resolver en recepción.

En [79] los autores emplean un sistema basado en inteligencia artificial para la adaptación distribuida de valores umbrales de sensado para tecnologías que operan en banda compartida. En concreto, el estudio utiliza LAA, 5G NR-U, Wi-Fi y otras tecnologías que operan en el espectro no licenciado. En este sentido, un dispositivo que pretende acceder al canal compara el valor de potencia de señal recibida con un valor umbral de ED, determinando de este modo si el canal se encuentra libre u ocupado. La incorrecta selección del valor umbral ED puede ocasionar que ciertos nodos que se encuentran en torno al nodo que sensa el canal no sean detectados (escenario nodo oculto), conduciendo a un incremento del número de colisiones. La selección de un valor umbral ED adecuado no es una tarea fácil, ya que requiere un conocimiento general de la movilidad, carga de tráfico y comportamiento del canal de todos los nodos que aspiran a acceder al medio. Por este motivo, los autores plantean el uso del algoritmo MAB (*Clustering Based Multi Armed Bandit*), que usa la agrupación de nodos en *clusters* para rastrear los cambios en la red en tiempo real y de este modo acelerar la convergencia del algoritmo en la banda no licenciada. El algoritmo MAB forma parte de los algoritmos RL (*Reinforcement Learning*), en donde el objetivo de MAB es la maximización del *throughput* de los dispositivos NR-U y Wi-Fi dentro de un periodo de tiempo. MAB es comparado con otros algoritmos en los cuales la selección de los valores umbrales ED se realiza de forma aleatoria o usando los valores por defecto. Los resultados muestran que el algoritmo MAB alcanza el mayor *throughput* en comparación a los otros métodos.

Los autores en [80] consideran el algoritmo de regresión logística para la detección de interferencias en UE para evitar el problema de nodo oculto en redes LTE-U que coexisten con redes Wi-Fi. El método propuesto está basado en los CQI reportados por el UE hacia su eNB. El principal inconveniente de este método es que el parámetro CQI por sí solo no es suficiente para detectar con precisión el problema del terminal oculto, ya que puede estar asociado a colisiones o malas condiciones del canal. En [81] los mismos autores proponen un algoritmo basado en *clusters* para encontrar los nodos Wi-Fi que potencialmente pueden interferir sobre los UE conectados a una celda LAA, utilizando los informes CQI reportados por los UE e información de localización. En ambos estudios [80-81], su objetivo es formular un problema de optimización con la finalidad de maximizar el *throughput* en DL. Con este objetivo, los autores llevan a cabo de forma conjunta el reparto de recursos de las CC (*Component Carriers*) de la banda licenciada como de las CC de la banda no licenciada entre los usuarios, con el fin de maximizar el *throughput* y garantizar un mínimo de QoS para cada usuario. Debido a la complejidad de la propuesta, y para hacer matemáticamente el problema más manejable, los autores lo dividen en dos sub-problemas, uno para la banda licenciada y otro para la banda no licenciada, debido a que la asignación

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

de recursos en las bandas licenciadas y no licenciadas se realiza de forma independiente, asignando una tasa mínima en función del tipo de tráfico considerando el valor de QCI (*Quality Channel Indicator*) para cada UE asociado a la celda para las dos bandas de trabajo. Para determinar los valores que optimizan el *throughput* los autores utilizan el método de multiplicadores de Lagrange para la banda licenciada y posteriormente para la banda no licenciada. Los resultados de las simulaciones muestran que el *throughput* alcanzado por la solución desarrollada por los autores presenta mejores resultados en comparación a otros esquemas. Sin embargo, los resultados solo muestran los valores de *throughput*, pero no se analiza la precisión alcanzada en la detección de nodos ocultos.

Continuando con las propuestas asociadas a técnicas de ML (*Machine Learning*), se debe destacar que el extraordinario desempeño que estas técnicas han alcanzado en dominios de visión por computador y procesamiento de lenguaje en los últimos años ha inspirado a los investigadores dentro del área de comunicaciones inalámbricas a adoptar ML, y en particular técnicas de redes neuronales (NN *Neural Networks*) en varios campos dentro de las comunicaciones móviles tales como: predicción del canal, ecualización, reconocimiento de modulación, *beamforming*, balanceo de carga, optimización de la red y mucho más [82]–[88]. Entre algunos de los métodos de ML, las redes neuronales de aprendizaje profundo (DNN *Deep Neural Networks*) se pueden emplear en tareas que comprenden aprendizaje supervisado, aprendizaje no supervisado o *reinforcement learning*, para redes inalámbricas. A pesar de esto, el número de investigaciones enfocadas en el uso de técnicas de aprendizaje automático como método de detección de nodos ocultos para redes LTE en banda no licenciada son particularmente escasos. Sin embargo, es posible encontrar aplicaciones asociadas con detección de interferencias o detección/clasificación de nodos inalámbricos en escenarios LTE-U que coexisten con Wi-Fi, que pueden ser usadas como guías generales para ser aplicadas en la optimización de parámetros en LAA y clasificación de nodos.

En los trabajos desarrollados en [89] y [90] los autores presentan algunos algoritmos de ML que permiten la detección en tiempo real del número de AP Wi-Fi que están compartiendo el canal en un ambiente heterogéneo LTE-U Wi-Fi. En [89] se entrena una red neuronal que permite detectar un cierto patrón de energía asociado a la presencia de uno o varios AP Wi-Fi que estén operando en el mismo canal compartido. El objetivo es utilizar la información del número de AP para ajustar de manera dinámica el intervalo ON del ciclo de trabajo de la red LTE-U, de tal modo que cada vez que aumenta el número de AP el periodo ON se verá reducido durante el CSAT. La recolección de muestras de energía en tiempo real se realiza durante los ciclos OFF de trabajo en el eNB de la red LTE-U. La toma de muestras de energía es una tarea más sencilla que la instalación de un módulo Wi-Fi que permita la decodificación de este tipo de paquetes. Los resultados indican que el procedimiento basado en ML puede alcanzar una precisión cercana al 100% en la detección del número de AP Wi-Fi en comparación con el empleo de métodos basados en ED y autocorrelación. Por otro lado, en [90] los mismos autores amplían su estudio previo aumentando el número de AP Wi-Fi, empleando diferentes escenarios y estudiando el

rendimiento de varios tipos de algoritmos de ML para una red en coexistencia LTE-U Wi-Fi. De forma similar al estudio anterior, las muestras de energía se toman durante el ciclo OFF de trabajo. Los resultados muestran que el modelo optimizado basado en ML alcanza una predicción en torno al 99% en la identificación del número de AP presentes en el canal compartido.

Centrándose en el mismo tema, los autores en [91] proponen el desarrollo de un algoritmo basado en ciclos de trabajo que sea ajustable en forma dinámica en un nodo LTE, que permita la compartición de recursos en el dominio del tiempo entre LTE y Wi-Fi, sin la necesidad de intercambio de señales de control. Con esta finalidad, los autores desarrollan un algoritmo basado en DRL (*Deep Reinforcement Learning*), el cual aprende las demandas de tráfico de la red Wi-Fi por medio del análisis del estado (libre/ocupado) del canal de comunicaciones de Wi-Fi por parte del dispositivo LTE. Basado en el conocimiento adquirido, el nodo LTE puede adaptar dinámicamente su tiempo de transmisión para maximizar su propio *throughput* mientras que al mismo tiempo provee suficiente protección al sistema Wi-Fi. Los resultados de las simulaciones muestran que en términos de *throughput* de LTE y protección de Wi-Fi, el rendimiento del esquema propuesto es próximo al esquema *genie-aided*, el cual involucra el conocimiento perfecto de la demanda de tráfico de Wi-Fi por medio del intercambio masivo de señales de control entre los sistemas.

Los autores en [92] proponen un método para el control de la interferencia en escenarios heterogéneos LAA Wi-Fi usando un esquema de *Q-learning*, el cual es una técnica de aprendizaje reforzado. En el método propuesto se usan los valores de NACK y ACK provenientes del algoritmo de HARQ para recompensar al esquema de *Q-learning*. Este esquema puede ser sintonizado de tal modo que cuando se desea priorizar las transmisiones de LAA, se asigna un mayor peso a las señales de ACK en la función de recompensa, mientras que si se desea dar mayor prioridad a las transmisiones de Wi-Fi se asigna un mayor peso a las señales de NACK en la misma función de recompensa. Todas estas acciones permiten encontrar el valor óptimo del tiempo de transmisión (TxOP) o tiempo de silencio (Tmute) del eNB LTE-LAA de acuerdo a los parámetros introducidos en la función de recompensa.

La gestión de interferencias requiere una buena identificación de las mismas. En este sentido, Schimdt *et al.* [93] proponen un método para la identificación de la interferencia basada en CNN (*Convolutional Neural Network*). El método propuesto permite identificar transmisiones co-canales en la banda de 2,4 GHz de diferentes tecnologías tales como IEEE 802.11b/g, IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.1. La CNN es entrenada en el dominio de la frecuencia con muestras de radio en fase y cuadratura (I/Q) con diferentes tipos de modulación y velocidades de símbolo. De este modo, la red convolucional entrenada es capaz de distinguir entre 15 clases que representan la frecuencia de canal asignada y la tecnología de transmisión. Los resultados de los experimentos muestran que el rendimiento

de la red convolucional propuesta es superior a otros tipos de clasificadores con una precisión mayor al 95%.

Finalmente, los autores en [94] proponen una CNN que es entrenada y validada por medio del uso de señales digitales consistentes en muestras I/Q de la señal modulada en fase y cuadratura y muestras de la señal en el dominio de la frecuencia obtenidas por medio de la transformada rápida de Fourier (FFT) para identificar transmisiones provenientes de redes LTE-U o Wi-Fi operando en la banda no licenciada. Se comprueba la precisión de la clasificación de la red CNN para diferentes valores de señal a ruido (SNR). Además, los autores indican que la red CNN puede identificar el efecto del terminal oculto debido a las transmisiones múltiples de la red LTE, de la red Wi-Fi o a la transmisión simultánea por parte de ambas redes. Sin embargo, este trabajo no detecta qué nodos específicos están afectados por la presencia de nodos ocultos de tal manera que sea posible la implementación de estrategias de asignación de recursos que permitan el traspaso de estos UE desde la banda no licenciada hacia alguna de las portadoras en el espectro licenciado y así mejorar el rendimiento de la red.

3.2 Impacto de la Presencia de Nodos Ocultos en las Prestaciones de la Red

Del análisis de la bibliografía presentada, se aprecia que muchos de estos trabajos no analizan con profundidad el problema de nodo oculto en el contexto de cuán efectivas son sus propuestas en la detección de interferencias provenientes de terminales ocultos o, en el mejor de los casos, se limitan a cuantificar los efectos sobre la red al aplicar su propuesta de detección. Es en este punto en el que se centran las aportaciones de esta tesis. El objetivo es una cuantificación con mayor detalle del efecto de los nodos ocultos en los servicios prestados por la red y la propuesta y evaluación de soluciones para la detección de las colisiones provocadas por nodos ocultos sobre los UE. Estos objetivos se analizan en contextos de coexistencia LAA LAA y LAA Wi-Fi y, en concreto, en los escenarios habituales de operación de Wi-Fi en contextos (*indoor* y *hotspot*). A continuación, se describen las características de los escenarios de simulación empleados y se presenta el impacto que la presencia de nodos ocultos (LAA o Wi-Fi) ejerce sobre las prestaciones de la red servidora e incluso de la red interferente.

3.2.1 Escenarios de análisis

De manera general, sobre la banda no licenciada de 5GHz, los modelos para LAA siguen las pautas introducidas por 3GPP en la release 13, que usan el algoritmo LBT para acceder al medio [3]; mientras que para el modelado de Wi-Fi se usa el estándar 802.11n, tal y como se describió en el Capítulo 2.

Descripción de los Escenarios

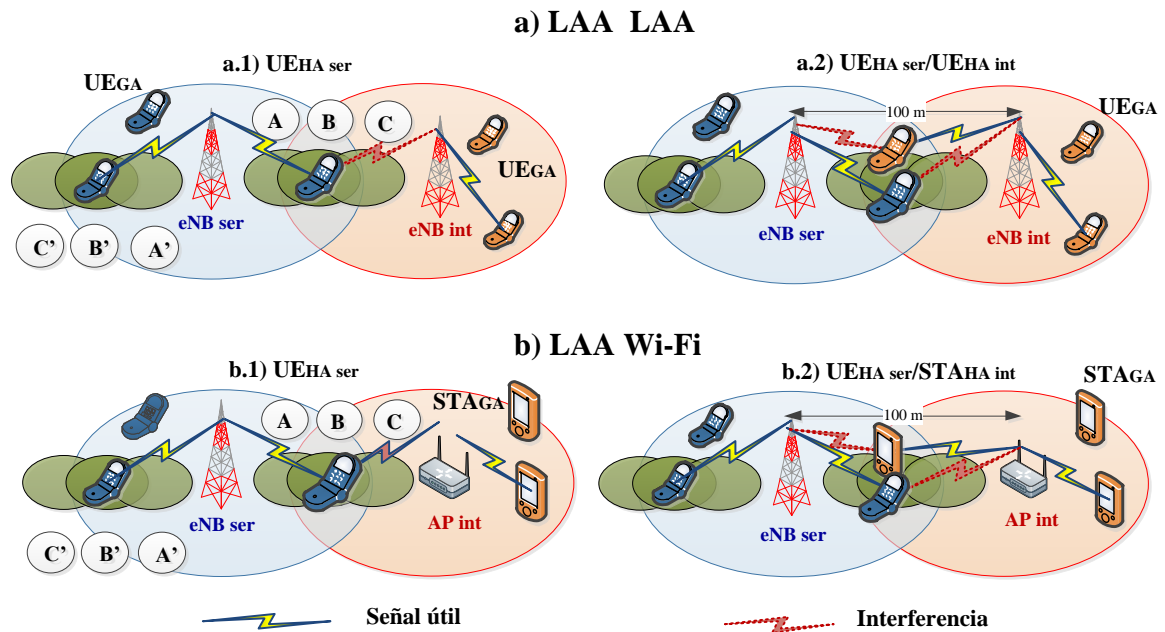


Figura 3.1: Escenarios de simulación con tráfico *downlink*

Para el análisis, se consideran dos escenarios generales que son empleados para evaluar los efectos que la presencia de nodos ocultos pertenecientes a redes LAA y Wi-Fi pueden ocasionar sobre los UE ubicados en zonas ocultas. Los datos obtenidos son el resultado de extensas campañas de simulación, donde las diferentes interacciones de los UE en el contexto de nodos ocultos han sido modeladas cuidadosamente. Las simulaciones son desarrolladas para un canal ideal y para un canal real, mientras que la interferencia es calculada explícitamente. La definición y características de estos canales se detallan más adelante.

La Fig. 3.1 muestra los dos escenarios usados para las campañas de simulación. La Fig. 3.1 a) ejemplifica dos nodos eNB LTE-LAA que pertenecen a diferentes operadores (LAA LAA), mientras que la Fig. 3.1 b) ilustra a una red LTE-LAA junto a una red Wi-Fi (LAA Wi-Fi). Los nodos eNB/AP servidores e interferentes se encuentran ocultos unos de otros y separados una distancia de 100 m. Existe un área oculta común para las dos redes contiguas, la cual permite asegurar la existencia del problema del terminal oculto durante todo el tiempo de simulación. En el caso específico de la red Wi-Fi, hay que tener en cuenta que también las STA que transmiten hacia el AP (lo que podemos denominar, enlace UL) se encuentran en condición de terminal oculto para el eNB y tienen a su alcance a UE que se ubican al interior de la zona oculta. En este caso, a diferencia de lo que sucede cuando la interferencia proviene del AP (las denominadas transmisiones DL en Wi-Fi) los nodos ocultos pueden ser varios, cambiar a lo largo del tiempo y pueden encontrarse en movimiento. Con el fin de analizar por separado el efecto de ambos tipos de interferencia (DL y UL), se analiza por una parte el problema de nodo oculto provocado por transmisiones de datos en el *downlink* (provienen de un eNB LAA o del AP) y, por otra,

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

en el *uplink* (proviene de STA). Además, en el escenario Wi-Fi y transmisiones *downlink*, no debe obviarse que las STA transmitirán ACK u otros mensajes de control. No obstante, se considera que el impacto más significativo es el de las transmisiones de datos del AP.

En concreto, existe un número M de UE ubicados aleatoriamente sobre cada celda. Sin embargo, con la finalidad de tener un mejor control de los resultados de las pruebas, existe un total de $M-N$ usuarios cuyo movimiento solo está permitido en las áreas libres de contienda, mientras que los N usuarios restantes se ubicarán sobre el área solapada (es decir, en la zona oculta). Además, para lograr un mejor entendimiento de cómo el canal y las colisiones debidas a la presencia de nodos ocultos afectan a los UE, hemos seleccionado dos subgrupos de pruebas entre todos los UE. Estos dos subgrupos están conformados por:

- 1) UE ubicados en el área oculta denominados (UE_{HA}) y
- 2) UE ubicados en la zona libre de contienda denominados (UE_{GA}).

Ambos subgrupos (UE_{HA} y UE_{GA}) están ubicados a igual distancia promedio desde el eNB con la diferencia que un subgrupo se ubica en la zona oculta (subáreas A, B y C) y el otro subgrupo, en una zona libre de contienda (subáreas A', B' y C'). La finalidad de esta agrupación es permitir la comparación de resultados entre estos dos subgrupos. Estas subáreas son configuradas para recoger los efectos de diferentes niveles de potencia de la señal, pérdidas de propagación e interferencias en los extremos de cobertura de la celda. Algo similar ocurre cuando la red interferente es Wi-Fi, con la diferencia de que los equipos de usuario en la celda interferente son reemplazados por STA y el eNB por un AP Wi-Fi.

A su vez, los escenarios LAA LAA y LAA Wi-Fi se dividen en dos sub-escenarios, que se diferencian entre sí en función de la existencia o no en la zona oculta de UE_{HA} que pertenecen a la celda servidora ($UE_{HA_{ser}}$) y que pertenecen a la celda interferente ($UE_{HA_{int}}$) simultáneamente:

- a) Existen solamente UE_{HA} de la celda servidora eNB Fig. 3.1 a.1).
- b) Existen simultáneamente UE_{HA} de la celda eNB servidora y UE_{HA} de la celda eNB interferente. Fig. 3.1 a.2).

De manera similar, al considerar escenarios de coexistencia LAA con redes Wi-Fi, se consideran dos sub-scenarios:

- a) Existen solamente UE_{HA} de la celda servidora eNB Fig. 3.1 b.1).
- b) Existen simultáneamente UE_{HA} de la celda eNB servidora y STA_{HA} de la celda Wi-Fi interferente Fig. 3.1 b.2).

Todas las realizaciones correrán separadamente para cada posición, en donde el área A está cerca y el área C está más alejada del eNB servidor y, consecuentemente, más afectada por mayores pérdidas de propagación e interferencias.

Existe el interés de obtener resultados que sean relevantes para cualquier escenario. Por este motivo y sin pérdida de generalidad, las métricas obtenidas dependen de la interferencia total y no del número de fuentes que generan interferencia. Por consiguiente, se ha empleado una única fuente de interferencia (eNB o AP) para tener un mejor control de la interferencia total recibida y del porcentaje de tiempo que un UE_{HA} es interferido. El análisis ha sido desarrollado para diferentes valores de potencia de interferencia y variaciones independientes de carga de tráfico en las celdas servidora e interferente, lo cual permite generalizar las conclusiones para escenarios con múltiples fuentes de interferencia.

Canal de comunicaciones

Todos los nodos, tanto LTE-LAA como Wi-Fi están trabajando en la banda no licenciada de 5 GHz con un ancho de banda de 20 MHz. Las pérdidas de propagación son calculadas individualmente para cada usuario considerando canales que incluyen pérdidas de propagación debido a la distancia, pérdidas debido a desvanecimientos lentos (lognormales), pérdidas debido a desvanecimientos rápidos (Rayleigh) y ruido térmico AWGN (*Additive White Gaussian Noise*). El modelo de propagación seleccionado es una versión modificada del modelo ITU InH para ambientes interiores [95], que permite asegurar que no existe línea de vista entre los nodos servidor e interferente durante todo el tiempo de simulación. Este modelo admite patrones sin línea de vista (NLOS) y con línea de vista (LOS) seleccionados aleatoriamente para cada UE en función de la distancia.

Tabla 3.1: Perfil de retardo multitrayectoria Modelo Peatonal-A (3 Km/h).

Retardo por trayecto [ns]	Potencia relativa [dB]
0	0.0
30	-1.0
70	-2.0
90	-3.0
110	-8.0
190	-17.2
410	-20.8

Los desvanecimientos lentos se encuentran habilitados con una desviación estándar de $\sigma=3$ (LOS) y $\sigma=4$ (NLOS), y una distancia de correlación de 8 metros. Las pérdidas Rayleigh debido a multitrayectorias están definidas en la especificación 3GPP TS 36.104 Anexo B.2 [96]. Tal como se muestra en la Tabla 3.1, para construir un canal selectivo en frecuencia con desvanecimientos multicamino para un escenario con movilidad peatonal (3 Km/h), los desvanecimientos Rayleigh son introducidos al simulador por medio de trazas, tal como se ilustra, a modo de ejemplo, en la Fig. 3.2. Los UE usan antenas omnidireccionales y se desplazan aleatoriamente a una velocidad peatonal en el interior de áreas predefinidas. Esta movilidad del usuario provoca una dispersión en frecuencia debido al efecto Doppler que es modelada variando la potencia relativa de los diferentes trayectos del canal. Se considera el modelo de Jakes para simular el efecto Doppler.

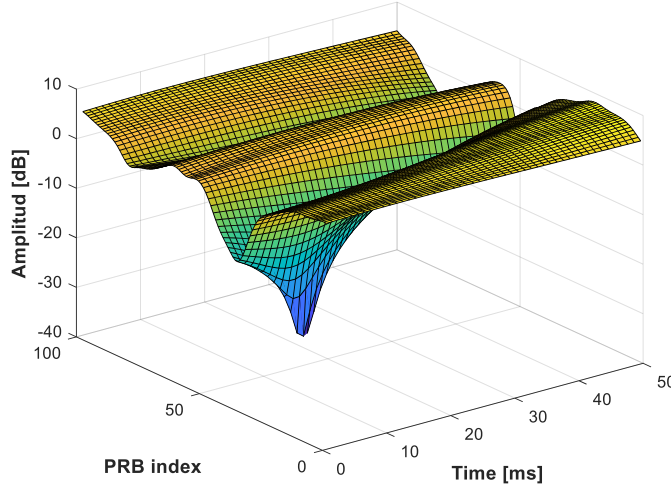


Figura 3.2: Ejemplo de traza para desvanecimiento Rayleigh, velocidad peatonal, 5 GHz.

Para los análisis que se desarrollan en esta tesis se definen dos modelos para el canal de comunicaciones, definidos como:

- i) Canal ideal: considera pérdidas de propagación debido a la distancia, desvanecimientos lentos, sin movilidad y la potencia de ruido térmico.
- ii) Canal real: considera pérdidas de propagación debido a la distancia, desvanecimientos lentos, desvanecimientos rápidos, movilidad de usuarios y la potencia de ruido térmico.

Configuración parámetros LAA

El *scheduler* de capa MAC y los algoritmos de estado del enlace están basados en el algoritmo de *scheduling* PF (*Proportional Fair*) [97] e información CSI mapeada en los índices CQI. El algoritmo de *scheduling* PF está representado en la ecuación (3.1), donde $\bar{T}_{alc}^u(t)$ es el promedio de la tasa de datos que el usuario u puede alcanzar en la subtrama t , y $\bar{T}_{serv}^u(t-1)$ es el promedio de la tasa de datos servida al usuario u en las últimas subtramas. $\bar{T}_{alc}^u(t)$ se estima teniendo en cuenta la tasa de transmisión del esquema MCS que se seleccionaría en función de las condiciones del canal del UE, y considerando los PRB que le pueden ser asignados durante el TTI. \bar{T}_{serv}^u se calcula en forma recursiva empleando la ecuación (3.2), considerando un intervalo de filtrado de la estimación de longitud t_f TTI. $T_{serv}^u(t)$ es la tasa de datos servida finalmente al UE u en la subtrama t . El algoritmo PF proporciona un buen compromiso entre el *throughput* global del sistema y un reparto equitativo entre todos los usuarios.

$$u^* = \arg \max_u \left(\frac{\bar{T}_{alc}^u(t)}{\bar{T}_{serv}^u(t-1)} \right) \quad (3.1)$$

$$\bar{T}_{serv}^u(t) = \left(1 - \frac{1}{t_f}\right) \cdot \bar{T}_{serv}^u(t-1) + \left(\frac{1}{t_f}\right) \cdot T_{serv}^u(t) \quad (3.2)$$

El índice CQI está relacionado con el nivel SINR medido en el UE. No obstante, no es una medida directa del SINR. El CQI indica el mayor nivel de MCS que puede utilizarse en el *downlink*, asegurando un (*Block Error Rate*) menor al 10%. El estándar no contempla una equivalencia entre SINR y MCS, sin embargo, en el caso del simulador seleccionado calcula la SINR para cada usuario en un intervalo TTI. Posteriormente emplea unas curvas que retorna el valor de BLER como función de la SINR. Las curvas están definidas en función de pares formados por (MCS, CB_{size}), donde MCS representa el esquema de modulación y codificación y CB_{size} el tamaño del bloque de datos después del código convolucional. La curva seleccionada será aquella cuyo par (MCS, CB_{size}) obtenga la mejor eficiencia espectral cumpliendo el valor objetivo de BLER. Para limitar la complejidad computacional, se considera un subconjunto de CB_{size} por ejemplo $CB_{size} = \{40, 104, 160, 256, 512, 1024, 2560, 4000, 6000\}$ bits. Las curvas fueron obtenidas del proyecto del simulador Vienna [98], [99]. De este modo, una vez seleccionado el MCS que satisface la condición de eficiencia espectral definido en el estándar Tabla 7.2.3-1 en [9], es posible seleccionar el correspondiente CQI. La selección del MCS sigue los parámetros establecidos en la Tabla 7.1.7.1-1 de la especificación [9], en la que se considera un orden de modulación máximo igual a 6 para un esquema de modulación 64 QAM y 32 posibilidades de índices de modulación (0-31), de las cuales se pueden usar 29 (0-28), ya que (29-31) están reservadas. Se aplica un esquema de multiplexación espacial MIMO 2x2 que permite alcanzar tasas físicas de hasta 120Mbps para la banda de 20MHz en el DL. Los cálculos/mediciones de CQI son realizados cada 2 ms. Cada UE calcula su CQI y lo reporta a su respectivo eNB, estos reportes corresponden tanto a la banda licenciada como a la no licenciada.

El esquema HARQ empleado se denomina *HARQ Soft Combining Hybrid Full Incremental Redundancy*, también conocido como HARQ IR Type II con un máximo de 3 retransmisiones permitidas. Esta solución implica que las retransmisiones contienen un subconjunto de bits de datos y redundancia que son diferentes en comparación con las anteriores transmisiones. Existen 8 procesos HARQ operando en forma paralela que son empleados para la transmisión y retransmisión de TB (*Transport Block*), un TB está formado por los datos transmitidos en el canal PDSCH el cual corresponde a una MAC-PDU, y específicamente no incluye ni el PDCCH ni las señales de referencia. Los TB son pasados desde la capa MAC a la capa física uno por cada TTI. Así también, los procesos HARQ son usados en las tareas de recepción y procesamiento de las señales ACK/NACK en el segmento de DL en función de las realimentaciones (*HARQ feedback*) provenientes desde el UE, que tienen un retardo de 4 ms. El *scheduler* genera un conjunto de mensajes DCI (*Downlink Control Information*) que contienen la información de los procesos HARQ que fueron recibidos con errores como de aquellos que corresponden a nuevas transmisiones, asignando mayor prioridad a las primeras. En el caso particular del

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

simulador empleado, cuando se produce una retransmisión, el *scheduler* asignará a la retransmisión los mismos esquemas MCS que fueron asignados al proceso HARQ cuya transmisión fue infructuosa. En relación con la SCell, esta emplea la información de NACK provista por los procesos HARQ para incrementar el tamaño de su CW. En concreto, el tamaño de la CW en el eNB se incrementa si el valor de Z supera el 80%, tal como se describió en la sección 2.1.5.

Las señales de DRS están habilitadas en la SCell para permitir los procesos de detección de celda, sincronización y medidas RRM en la celda secundaria con un periodo de 80 ms, aunque debido a CCA no es posible garantizar este periodo. Las señales DRS pueden viajar de forma independiente o en conjunto con datos de usuario en los slots/subtramas establecidos para esta señal en DL. Los reportes de medidas de UE (RSRP, RSRQ) son generados por los UE para cada banda (licenciada o no licenciada) en un periodo de 200 ms. Estas métricas son calculadas de igual forma, independientemente de la banda a la que pertenecen las mediciones, y dependen específicamente de las características del canal y de la carga de tráfico de cada banda.

El eNB que opera en la SCell cumple con la release 13 modo SDL, por lo que utiliza el protocolo LBT Cat.4 para acceder al medio compartido. El valor de umbral de ED está configurado a -72 dBm, con un tiempo de diferimiento fijo igual a 43 μ s (*best effort*) y un tiempo de slot igual a 9 μ s. El tamaño de la ventana de contienda se incrementa cada vez que el valor de NACK asociado con colisiones supera el porcentaje de Z (80%); para el caso de tráfico *best effort* el tamaño de la CW varía entre un $CW_{min}=15$ y $CW_{max}=63$. El tiempo MCOT para la trama LAA es igual a 8 ms. El eNB y los UE tienen configurados una potencia de transmisión igual a 18 dBm. Se considera una ganancia de antena de 5 dBi para el eNB y 0 dBi para los UE con un factor de ruido de 5 dB y 9 dB para el eNB y los UE, respectivamente.

En este capítulo se considera un tráfico de tipo ráfaga que transmite archivos FTP (*File Transfer Protocol*). El tráfico FTP consiste en el envío de archivos de tamaño igual a 2 MB, a demanda de los UE, cuya tasa de generación λ sigue una distribución de *Poisson* que varía en el intervalo de [0,5, 3] archivos/segundo con incrementos en intervalos de 0,5 como se encuentra definido en la sección A.2.1.3.1 en [100]. Los archivos son solicitados con igual probabilidad y en forma secuencial por todos los UE en el interior de cada celda, de tal modo que en conjunto cada celda genera los valores de tasa objetivo (λ). Es decir, la demanda individual de tráfico en DL es igual a λ/M donde M es el número total de usuarios en cada celda. Cada celda genera de manera independiente su tráfico FTP; de este modo, los nodos eNB/AP servidores e interferentes simulan diferentes niveles de carga de tráfico. Es decir, generan su valor específico de λI (tasa de tráfico FTP celda interferente), λS (tasa de tráfico FTP celda servidora) para cada una de las diferentes realizaciones.

Configuración parámetros Wi-Fi

Con respecto a la red Wi-Fi, la capa MAC cumple el protocolo CSMA/CA con *beacons* periódicos generados por el AP. Si un dispositivo Wi-Fi tiene datos que transmitir, primero sensa el canal: si el medio es evaluado como ocupado, la capa MAC difiere la transmisión hasta que el medio sea evaluado como libre. Si el periodo libre es mayor que un DIFS, igual a 34 μ s para el tráfico *best effort* con una duración de slot igual a 9 μ s, se procede a la transmisión de datos en DL. Así también, cada vez que ocurre una colisión, el *backoff* se incrementa exponencialmente hasta alcanzar la máxima ventana de contienda. De acuerdo con EDCA la CW puede variar entre $CW_{min}=15$ y $CW_{max}=1023$ para el tráfico *best effort*. Las señales RTS/CTS no se encuentran habilitadas.

Durante el CCA, los dispositivos evalúan el canal con un valor umbral de ED igual a -72 dBm para detectar niveles de energía de señales diferentes a Wi-Fi que se encuentren presentes en el canal compartido. La detección de señales de preámbulo (PD) para tramas 802.11 está configurada a -82 dBm. El modelo cumple con el estándar 802.11n, con un MIMO 2x2 y un índice MCS máximo igual a 15, lo que permite simular tasas de hasta 130 Mbps en DL en canales de 20 MHz. Además, se utiliza un algoritmo adaptativo para seleccionar la tasa de transmisión, el cual escoge el mejor *throughput* en función del SINR del anterior paquete enviado. El valor de SINR es enviado desde el receptor hacia el transmisor embebido en el mensaje de ACK. De forma idealizada se considera que la transmisión de ACK se lleva a cabo sobre un canal libre de errores. El tráfico gestionado por el AP tiene las mismas características que se describieron anteriormente para LTE, con la diferencia de que en el escenario Wi-Fi el AP puede recibir tráfico en sentido ascendente, de tal modo que se dispone de un tráfico interferente en DL (λ_{DL}) y un tráfico interferente en UL (λ_{UL}), los cuales se configuran de forma independiente entre sí. El tráfico λ_{DL} está dirigido según una distribución uniforme hacia cada una de las STA asociadas a su celda. Es decir, la demanda individual de tráfico en DL es igual a λ_{DL}/M , donde M es el número total de usuarios en la celda. Además, la razón entre el tráfico descendente y el tráfico ascendente en Wi-Fi ($\lambda_{DL}/\lambda_{UL}$) es igual a 2.

Finalmente, los valores de potencia de transmisión, ganancia de antena y factor de ruido serán similares que los aplicados para LAA, considerando que se dispone de un AP y varias STA. La Tabla 3.2 resume los principales parámetros aplicados durante la simulación.

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

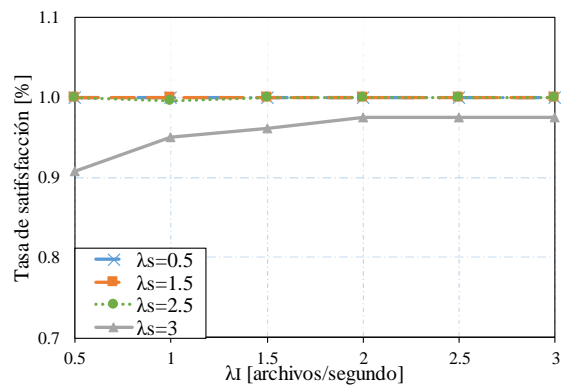
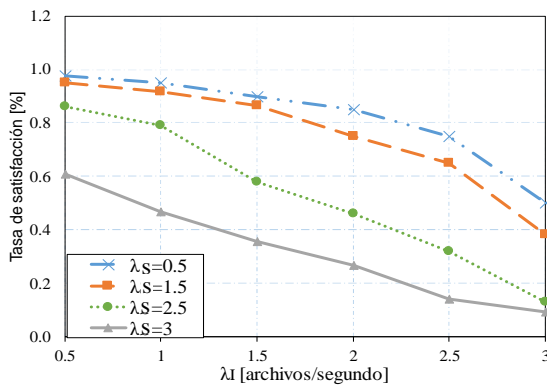
Tabla 3.2: Parámetros generales de simulación

Parámetro	Valor
NS-3 versión	NS-3 LBT
Distancia entre estaciones base	100m
Frecuencia portadora	5180 MHz DL
Ancho de banda	20MHz
Modelo Pérdidas propagación	ITU InH modelo
Desviación estándar	$\sigma=3$ (LOS) / $\sigma=4$ (NLOS)
Distancia de correlación	8m
Modelo Canal (3Km/h)	Jakes
Parámetros de la celda eNB	
Transmission Time Interval (TTI)	1ms
Tamaño PRB	12 subportadoras(RE) para 1TTI
Potencia de salida eNB/UE	18 dBm/18 dBm
Ganancia antena TX eNB LBT	5dBi
Ganancia antena TX/RX UE	0dBi/0dBi
Figura de ruido eNB/UE	5dB/9dB
MIMO	2x2 Multiplexación espacial
HARQ	Inc. Redundancy / máx. 3 reTX
Min retardo HARQ	4ms
Tiempo entre CQIs	2ms
Tiempo de actualización TCQI(L)	200ms
Tiempo entre reportes RSRP/RSRQ	200ms
RLC Modo /RLC Buffer	UM RLC / 200MB
Scheduler	Proportional Fair (PF)
Método de Acceso	LBT Cat. 4
ED Umbral	-72dBm
Periodo DRS	80ms
Retardo MAC /PHY	2ms
CW Update	NACK 80%
Duración TxOP	8ms
DRS periodo	80 ms
Parámetros celda Wi-Fi	
Estándar Wi-Fi PHY	802.11n
Método de Acceso	CSMA/CA
AP (TX potencia/Gan Ant/NF)	18dBm / 5dBi / 5dB
STA (TX potencia/Gan Ant/NF)	18dBm / 0dBi /9dB
ED Umbral / Detección preámbulo	-72dBm / -88dBm
Parámetros Tráfico	
FTP Archivo	2MB
λ_S / λ_I (FTP)	[0,5, 3,0] archivo/s

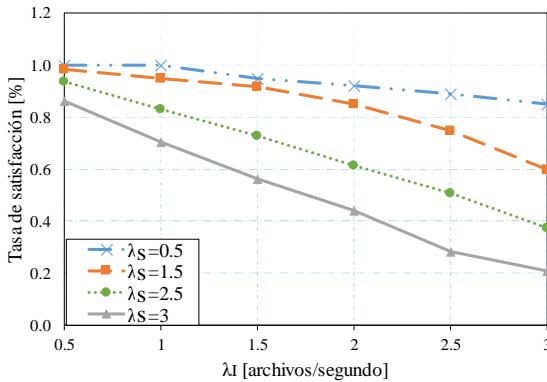
3.2.2 Evaluación del impacto del nodo oculto en condiciones de canal ideal

A continuación, se presenta el análisis del impacto que los nodos ocultos pueden ejercer sobre una red en coexistencia LAA LAA y LAA Wi-Fi. Las métricas a considerar son las tasas de satisfacción y el tiempo de ocupación del canal por parte de los $UE_{HA\ ser}$ y $UE_{GA\ ser}$. Los resultados presentados a continuación consideran un canal ideal de comunicaciones.

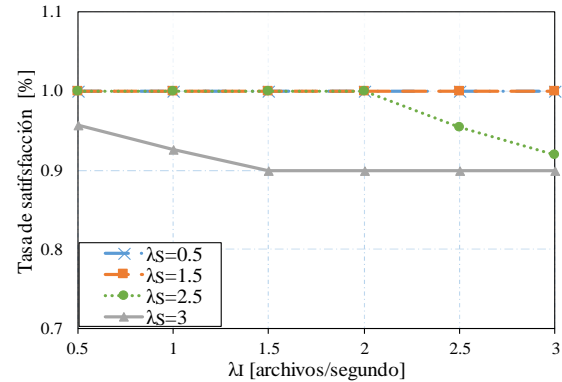
a) Coexistencia LAA LAA canal ideal.



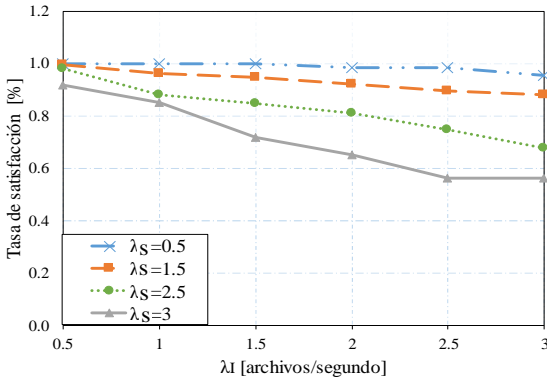
a) Tasa de satisfacción para UE_{HA} , UE_{HA} en Pos C.



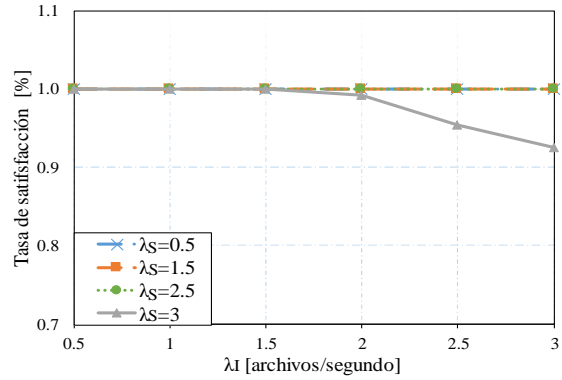
b) Tasa de satisfacción para $*UE_{GA}$, UE_{HA} en Pos C.



c) Tasa de satisfacción para UE_{HA} , UE_{HA} en Pos B.



d) Tasa de satisfacción para $*UE_{GA}$, UE_{HA} en Pos B.



e) Tasa de satisfacción para UE_{HA} , UE_{HA} en Pos A.

f) Tasa de satisfacción para $*UE_{GA}$, UE_{HA} en Pos A.

Figura 3.3: Tasa de satisfacción para UE_{HA} y $*UE_{GA}$ para escenario LAA LAA con un solo tipo de nodo en zona oculta $UE_{HA\ ser}$. UE_{HA} en posiciones A (Pos A), B (Pos B) y C (Pos C).

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

La Fig. 3.3 presenta las tasas de satisfacción de los UE_{HA} y $*UE_{GA}$ que pertenecen a la celda servidora para el escenario LAA LAA. La notación $*UE_{GA}$ implica que los datos presentados corresponden a la tasa de satisfacción global de todos los UE ubicados en zona libre de colisión y no solamente de los UE_{GA} . Hay que recordar que los UE_{GA} pertenecen al grupo de nodos de prueba que están ubicados en las subáreas A', B' o C'. Se define la tasa de satisfacción como el cociente entre la velocidad de transmisión efectiva y la velocidad de transmisión demandada para los UE de la red LAA, en donde el número máximo de retransmisiones es igual a 3, para el escenario en que la zona oculta tiene un solo tipo de nodo oculto $UE_{HA\ ser}$, como se detalla en la Fig. 3.1 a.1). Es decir, no hay UE_{HA} asociados al nodo interferente. Los resultados se obtienen para distintos valores de tráfico de celda servidora λ_S e interferente λ_I . El tráfico λ_I varía en el rango de [0,5, 3] y λ_S toma los siguientes valores (0,5, 1,5, 2,5 y 3), ambos en unidades de archivos/segundo. Las Fig. 3.3 a), c) y e) muestran cómo la tasa de satisfacción de los $UE_{HA\ ser}$ aumenta en la medida que lo hacen las condiciones radioeléctricas, comenzando en la posición C (mala cobertura, alta interferencia) y llegando a la posición A (buena cobertura, baja interferencia). También se observa que cuando las cargas de tráfico del servidor λ_S y del interferente λ_I aumentan, la tasa de satisfacción se reduce. El incremento en la carga de tráfico resulta en el incremento de probabilidad de colisiones para los $UE_{HA\ ser}$.

Las Fig. 3.3 b), d) y f) muestran la tasa de satisfacción para todos los UE ubicados en zona libre de colisión perteneciente a la celda servidora ($*UE_{GA}$), mientras que la posición de los $UE_{HA\ ser}$ varía desde la posición C hasta la posición A. En estas figuras, se observa que la tasa de satisfacción de los $*UE_{GA}$ varía conforme el tráfico λ_S se incrementa. Sin embargo, en relación con el tráfico λ_I , el efecto sobre la tasa de satisfacción de los $*UE_{GA}$ requiere un análisis más detallado. Por una parte, el *scheduler* puede o no asignar PRB a los UE dependiendo del valor de CQI y, en caso de transmisión, el esquema de MCS usado para las transmisiones a cada UE depende del CQI. En consecuencia, cuando el MCS utilizable es bajo se requiere transmitir más bloques de transporte (TB) o utilizar un mayor número de PRB en los bloques de transporte para transmitir una determinada cantidad de información. Además, debido al uso del algoritmo de *scheduling Proportional Fair*, los nodos ubicados en la zona oculta, $UE_{HA\ ser}$, tienen por lo general un “*low past throughput*”, y por tanto son propensos a tener una alta prioridad en la asignación de recursos por parte del *scheduler* en relación a los otros $*UE_{GA}$. En consecuencia, si los CQI reportados permiten la transmisión (es decir, tienen un CQI diferente de cero), el *scheduler* podría asignar un número excesivo de PRB a los UE ubicados en zona oculta, lo cual a largo plazo conduce a una degradación del *throughput* del resto de $*UE_{GA}$.

Como se aprecia en las Fig. 3.3 b), d) y f), en líneas generales, cuando la demanda de tráfico en la celda servidora (λ_S) es baja, no se produce degradación del *throughput* en los $*UE_{GA}$, ya que hay recursos suficientes en la celda para satisfacer la demanda de éstos. Cuando la λ_S se incrementa, el consumo extra de recursos debido a los $UE_{HA\ ser}$ (tanto mayor cuanto mayor es la tasa interferente λ_I) imposibilita la satisfacción de la demanda del resto de UE ($*UE_{GA}$), reduciéndose la satisfacción de éstos. No obstante, en la Fig. 3.3 b) se aprecia un efecto singular: para la tasa $\lambda_S=3$, la tasa de satisfacción de los

3.2 Impacto de la Presencia de Nodos Ocultos en las Prestaciones de la Red

*UE_{GA} puede incrementarse ligeramente cuando la tasa λ_I aumenta. Esto se debe a que el nivel de interferencia sufrido por el UE_{HA ser} cuando está más afectado por el nodo oculto (situado en este caso en la zona de mayor interferencia posición C) es tal que recibe menos asignaciones de *scheduling* de las necesarias para transmisión de datos nuevos o retransmisiones (la MCS es demasiado baja). Esta situación ocurre con mayor frecuencia conforme la tasa de tráfico interferente aumenta, con lo cual los recursos liberados quedan disponibles para las transmisiones dirigidas a los *UE_{GA}. Es decir, existe una mayor cantidad de recursos libres para *scheduling* debido a que conforme el tráfico λ_I aumenta sobre el UE_{HA ser} las continuas retransmisiones se acumulan en el *buffer* esperando la asignación de nuevos PRB por parte de un *scheduler* que está saturado, de tal modo que muchas de estas retransmisiones son descartadas debido a la expiración de los *timers* mientras esperan en el *buffer*. En el caso de las tasas $\lambda_S=0,5$ a $2,5$ este efecto no se aprecia ya que, aunque se produce el mismo efecto, los *UE_{GA} pueden satisfacer su tasa en todas las situaciones.

Las ilustraciones contenidas en la Fig. 3.4 corresponden al escenario LAA LAA, pero en esta oportunidad existen desplegados nodos en zona oculta que pertenecen tanto a la celda servidora, UE_{HA ser} como a la celda interferente, UE_{HA int}. Así pues, en esta figura se muestra la tasa de satisfacción para los UE_{HA ser} y para los *UE_{GA ser} para diferentes cargas de tráfico λ_S y λ_I variables.

Los resultados de la Fig. 3.4 muestran tendencias similares a las mostradas en la Fig. 3.3. Cuanto peores son las condiciones de canal y más fuerte la interferencia sobre el UE_{HA int} (posición C, frente a B o A), mayor y más rápida es la degradación de la tasa de satisfacción para los UE_{HA ser} conforme el tráfico interferente se incrementa. De forma equivalente, al mejorar las condiciones del canal para los UE_{HA ser}, se observa una más lenta degradación de la tasa de satisfacción conforme λ_I aumenta. Comparando las Fig. 3.4 a), c) y e) con las Fig. 3.3 a), c) y e) es posible ver cómo la presencia de UE asociados al eNB interferente y afectados también por el problema de nodo oculto (UE_{HA int}) influye sobre la tasa de satisfacción de los UE_{HA ser}, haciendo que la tasa de satisfacción de los UE_{HA ser} sea menor. Esta reducción en la tasa de satisfacción de las Fig. 3.4 a), c) y e) se debe al efecto que produce el incremento en el número de colisiones también en el eNB interferente. En el nodo interferente, un mayor número de transmisiones usan esquemas de MCS bajos y se requiere un mayor número de PRB para transmitir los paquetes. Como consecuencia, el COT en la celda interferente aumenta. A mayor COT en la celda interferente, mayor interferencia sobre los UE_{HA ser}, lo que conduce a un menor grado de satisfacción de tasa. De forma similar, las Fig. 3.4 b), d) y f) muestran las tasas de satisfacción para los *UE_{GA ser} que, a pesar de estar ubicados en zonas libres de colisión, también son afectados por la presencia de terminales en zona oculta asociados tanto al eNB servidor como al eNB interferente. El comportamiento de las Fig. 3.4 b), d) y f) tiene las mismas características que fueron descritas para las Fig. 3.3 b), d) y f).

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

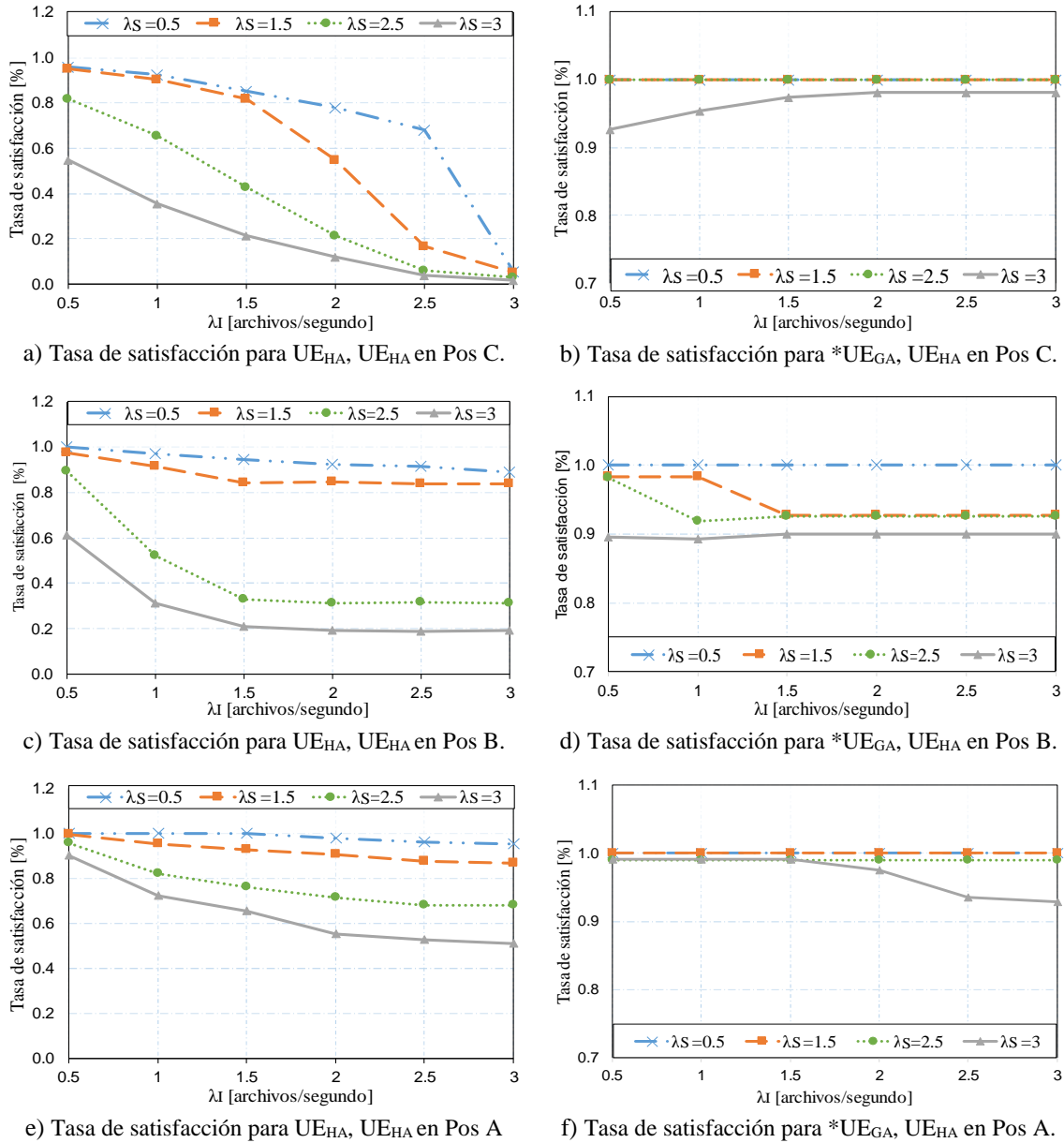
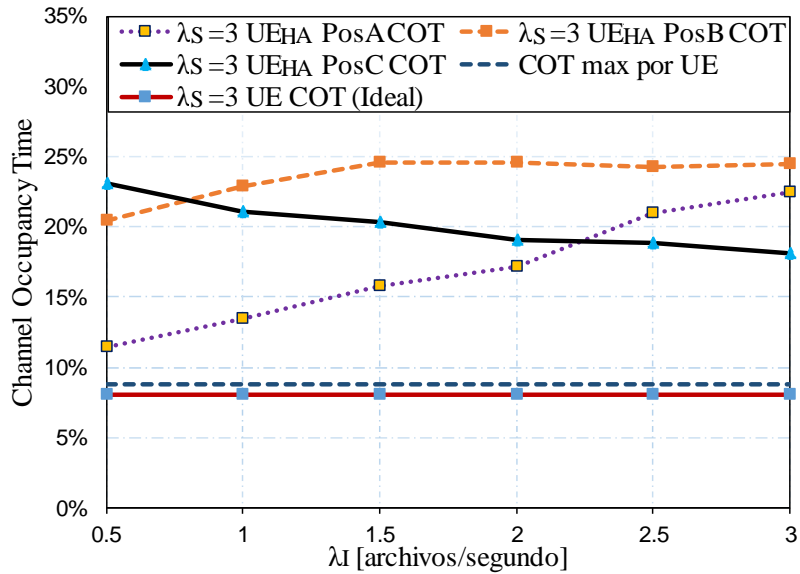


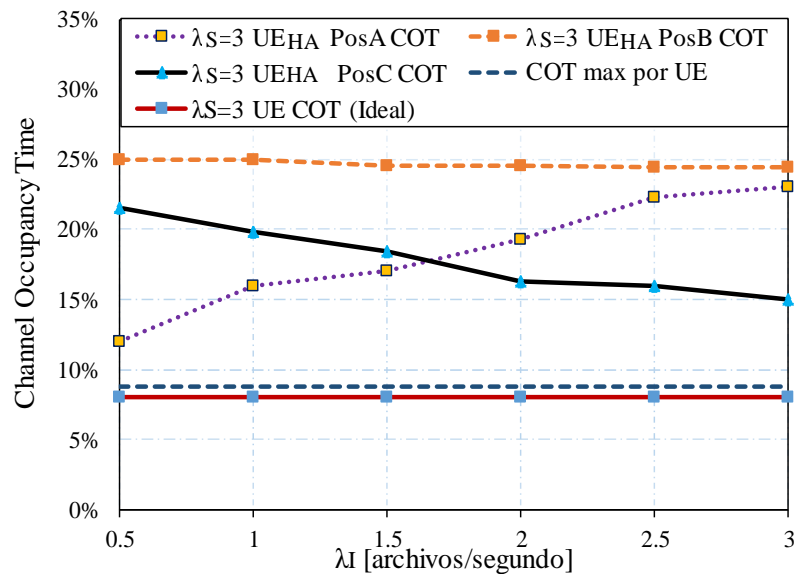
Figura 3.4: Tasa de satisfacción para UE_{HA} y $*UE_{GA}$ para escenario LAA LAA con dos tipos de nodos en zona oculta $UE_{HA_{ser}}$ y $UE_{HA_{int}}$. UE_{HA} en posiciones A (Pos A), B (Pos B) y C (Pos C).

Para ilustrar mejor la causa de los efectos antes mencionados, la Fig. 3.5 muestra el tiempo de ocupación del canal (COT) de los $UE_{HA_{ser}}$ para el escenario LAA LAA, en donde la Fig. 3.5 a) tiene un único tipo de nodos en zona oculta ($UE_{HA_{ser}}$) y la Fig. 3.5 b) tiene los dos tipos de nodos en zona oculta ($UE_{HA_{ser}}$ y $UE_{HA_{int}}$) e ilustra cómo el COT varía conforme los $UE_{HA_{ser}}$ varían su posición en zona oculta (A, B o C). Se ha seleccionado un tráfico servidor constante $\lambda_S = 3,0$ archivos/segundo. La gráfica correspondiente a UE COT (ideal) es un valor de referencia que indica cuál sería el COT promedio de cada UE perteneciente a la celda servidora en el caso de que no existiesen terminales en la zona oculta para el tráfico demandado. También se muestra la tendencia para COT max per user, el cual representa el tiempo de asignación teórico máximo que el eNB podría asignar a cada usuario para un $MCOT = 8ms$ si los periodos de tiempo fueran igualmente distribuidos entre todos los usuarios.

3.2 Impacto de la Presencia de Nodos Ocultos en las Prestaciones de la Red



a) COT para $UE_{HA\ ser}$ cuando $\lambda_S=3$ y otros COT de referencia. Escenario con presencia de $UE_{HA\ ser}$



b) COT para $UE_{HA\ ser}$ cuando $\lambda_S=3$ y otros COT de referencia. Escenario con presencia de $UE_{HA\ ser}$ y $UE_{HA\ int}$

Figura 3.5: Tiempo de ocupación del canal para escenario LAA LAA para diferentes posiciones de $UE_{HA\ ser}$ a) Presencia solo de $UE_{HA\ ser}$ b) Presencia conjunta de $UE_{HA\ ser}$ y $UE_{HA\ int}$.

Fijando nuestra atención en la Fig. 3.5 a), para las posiciones A (buena cobertura) y B (cobertura media) se observa que el COT se incrementa conforme λ_I aumenta, lo que se debe a que el *scheduler* es capaz de asignar un mayor número de PRB conforme aumentan las retransmisiones asociadas al incremento de colisiones. El aumento de PRB se debe a que existe disponibilidad de recursos radio en el eNB servidor hasta llegar a un límite del 25% de uso del canal. En cambio, para la posición C (mala cobertura y extrema interferencia), el COT de los $UE_{HA\ ser}$ comienza a disminuir, lo que se debe a que el *scheduler* no es capaz de cubrir la demanda de PRB solicitados por los $UE_{HA\ ser}$, pues

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

muchas retransmisiones serán descartadas ya que los *timers* expiran mientras esperan en los *buffers*. Por tanto, hay más disponibilidad de recursos para los $UE_{GA\ ser}$ conforme λ aumenta. No obstante, cuando el valor de COT para los $UE_{HA\ ser}$ es alto, existirán solicitudes de recursos tanto para $UE_{HA\ ser}$ como para $*UE_{GA\ ser}$ que no podrán ser cubiertas debido a la saturación de los recursos del eNB servidor.

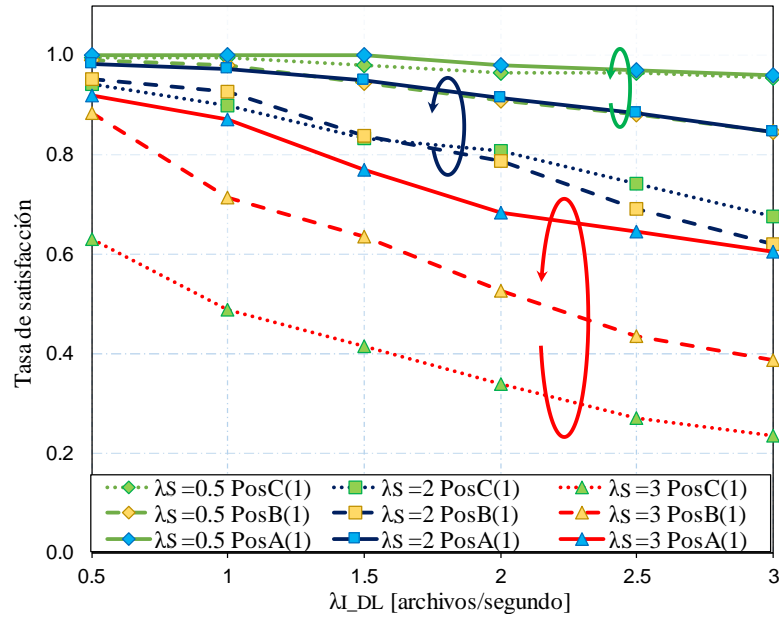
Esta situación empeora para el escenario mostrado en la Fig. 3.5 b), en donde el *scheduler* asigna mayor número de recursos a los $UE_{HA\ ser}$ cuando estos se sitúan en las zonas A o B en comparación con el caso presentado en la Fig. 3.5 a). No obstante, en este caso existe disponibilidad de recursos radio y el *scheduler* los asigna. Cuando los $UE_{HA\ ser}$ están en la zona C el COT de los $UE_{HA\ ser}$ se reduce conforme el tráfico interferente aumenta. Esta reducción se produce en mayor proporción que en el escenario con un solo tipo de nodo en zona oculta. Comparando el UE COT (ideal) con el $UE_{HA\ ser}$ COT cuando éste se sitúa en la posición B (Fig. 3.5 b)), es posible ver cómo el grupo de UE en zona oculta puede llegar a ocupar hasta 3 veces más tiempo el canal de comunicaciones. Esta situación provoca un monopolio de recursos por parte de los UE que experimentan continuas colisiones debido a la presencia de nodos ocultos, en perjuicio de los otros UE asociados a la misma celda.

b) Coexistencia LAA Wi-Fi canal ideal

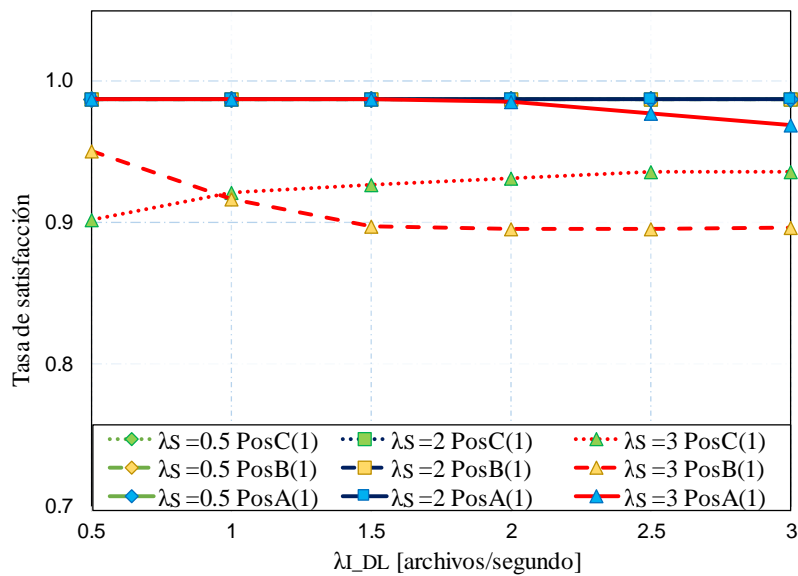
Las Fig. 3.6 a) y b) reflejan las tasas de satisfacción para los equipos de usuario pertenecientes a la celda servidora $UE_{HA\ ser}$ y $*UE_{GA\ ser}$, respectivamente, para el despliegue LAA Wi-Fi que cuenta con un solo tipo de nodo en zona oculta $UE_{HA\ ser}$. Es decir, el escenario mostrado en la Fig. 3.1 b.1). Dicho escenario se indica con el numeral uno (1) en la leyenda de las figuras. Los resultados presentados corresponden con un escenario en que solo se genera tráfico en sentido *downlink* en Wi-Fi. En ambas figuras se muestran los resultados de las tasas de satisfacción dependiendo de la zona en la que se ubican los $UE_{HA\ ser}$ (A, B, C) y para distintos valores de λ_S conforme aumenta λ_{DL} .

La Fig. 3.6 a) muestra cómo la tasa de satisfacción para los $UE_{HA\ ser}$ disminuye a medida que se incrementan el tráfico del eNB servidor en DL, λ_S , y el tráfico en DL del AP interferente, λ_{DL} . Esta disminución en la tasa de satisfacción de los $UE_{HA\ ser}$ se debe en primer lugar a un mayor COT del AP cuando el tráfico AP λ_{DL} se incrementa y, en segundo lugar, al incremento del tráfico λ_S en la red LAA. Al aumentar el COT del AP, aumentan las interferencias sobre los $UE_{HA\ ser}$. Como consecuencia de esto, los valores de los índices CQI reportados disminuyen y el *scheduler* debe asignar un mayor número de PRB a los $UE_{HA\ ser}$ para satisfacer la tasa, ya que los MCS utilizados son más bajos. La demanda extra de PRB es tal que puede no satisfacerse la tasa. La Fig. 3.6 a) muestra cómo la tasa de satisfacción para los $UE_{HA\ ser}$ disminuye cuando el grupo UE_{HA} se desplaza de la posición A hacia la posición C; es decir, cuando se aleja de su eNB servidor. El consumo extra de recursos asociado a los $UE_{HA\ ser}$ puede ser tal que incluso puede afectar a la tasa de satisfacción de todos los $*UE_{GA\ ser}$, especialmente cuando el tráfico de la red LAA es elevado. Esto se puede apreciar en la Fig. 3.6.b).

3.2 Impacto de la Presencia de Nodos Ocultos en las Prestaciones de la Red



a) Tasa de satisfacción para UE_{HA_ser} para posición A, B, y C para diferentes valores de tráfico de nodo servidor λ_S .



b) Tasa de satisfacción para $*UE_{GA_ser}$ para posición A, B, y C para diferentes valores de tráfico de nodo servidor λ_S .

Figura 3.6: Tasa de satisfacción para UE celda servidor. LAA Wi-Fi con un tipo de UE_{HA_ser} escenario (1).

En la Fig. 3.6 b) se ilustra que para valores bajos de tráfico λ_S la tasa de satisfacción para todos los $*UE_{GA_ser}$ está en torno al 99%, pero tan pronto como los UE_{HA_ser} se ubican en la posición C (mala cobertura y fuerte interferencia) y λ_S crece hasta $\lambda_S=3$ archivos/segundo, la tasa de satisfacción para los nodos ubicados en zona libre de colisión $*UE_{GA_ser}$ se ve afectada y el nivel de afectación se incrementa conforme los UE_{HA_ser} (ya ubicados en la posición C) solicitan más recursos a su eNB. Como se ha comentado, el scheduler, el cual emplea un algoritmo *Proportional Fair*, asigna a los UE_{HA_ser} un mayor número de PRB con valores bajos de MCS, lo que se traduce en una alta ocupación del

canal con una baja cantidad de bits útiles. En consecuencia, un $UE_{HA\ ser}$ recibe un elevado número de PRB en comparación con los PRB asignados a un $UE_{GA\ ser}$ para igual cantidad de información a transmitir. En el peor escenario aquí evaluado, un $UE_{HA\ ser}$ llega a recibir hasta 3 veces mayor cantidad de PRB que un $UE_{GA\ ser}$, como se visualizó en la Fig. 3.5. Bajo estas circunstancias el eNB puede alcanzar fácilmente la saturación.

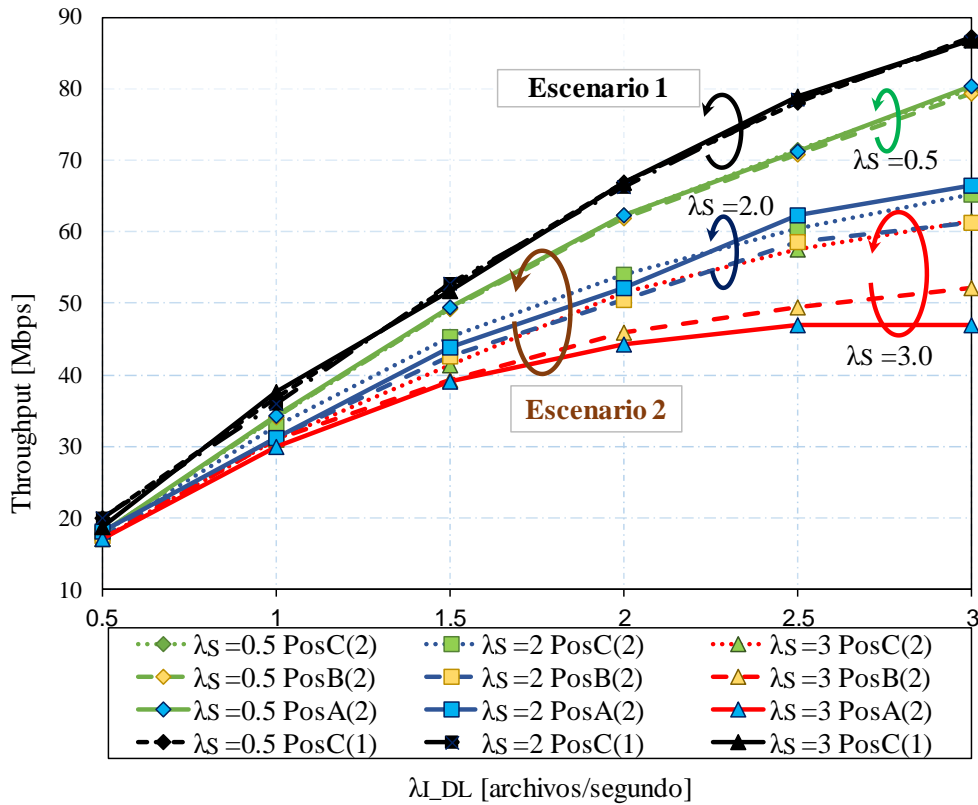


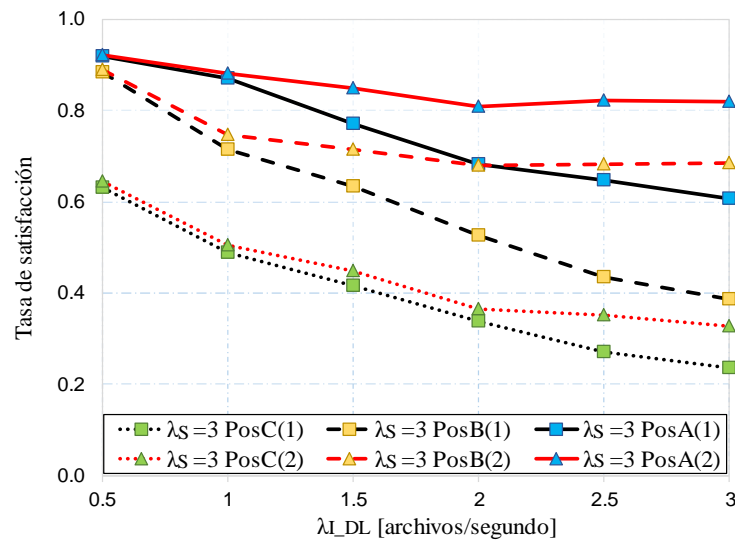
Figura 3.7: Degradación del *throughput* del AP en DL para escenarios con un ($UE_{HA\ ser}$) (1) y dos ($UE_{HA\ ser}$ y $STA_{HA\ int}$) (2) tipos de nodos en zona oculta, coexistencia LAA Wi-Fi.

La Fig. 3.7 ilustra el *throughput* alcanzado por el AP para los escenarios con un tipo de nodo en zona oculta ($UE_{HA\ ser}$ (1)) y dos tipos de nodos en zona oculta ($UE_{HA\ ser}$ y $STA_{HA\ int}$ (2)), tal como se ilustra en la Fig. 3.1 b.2). Se debe notar que, desde el punto de vista de la red Wi-Fi, para el escenario (1) no existen nodos en zona oculta ($STA_{HA\ int}$) para su red y, por tal motivo, todas sus estaciones se encuentran en zonas libres de colisión (STA_{GA}) y consecuentemente con buenas condiciones de canal en relación con su AP. Las transmisiones del AP en DL no sufren de las interferencias que podrían originarse en el eNB, lo que se ve reflejado en el *throughput* representado por la línea de color negro de la Fig. 3.7, en donde, a pesar del incremento del tráfico del eNB servidor, el *throughput* de la red Wi-Fi permanece invariante para todas las condiciones de tráfico λ_S . La situación cambia para el escenario (2), en donde el *throughput* del AP disminuye tan pronto aparecen los nodos que pertenecen a la red Wi-Fi ($STA_{HA\ int}$) afectados por nodos ocultos (en este caso el eNB servidor). Dicha reducción aumenta conforme aumenta la intensidad del tráfico λ_S (es decir la interferencia que se origina desde el eNB). La interferencia proveniente del eNB afecta solamente a las estaciones ubicadas en zona oculta

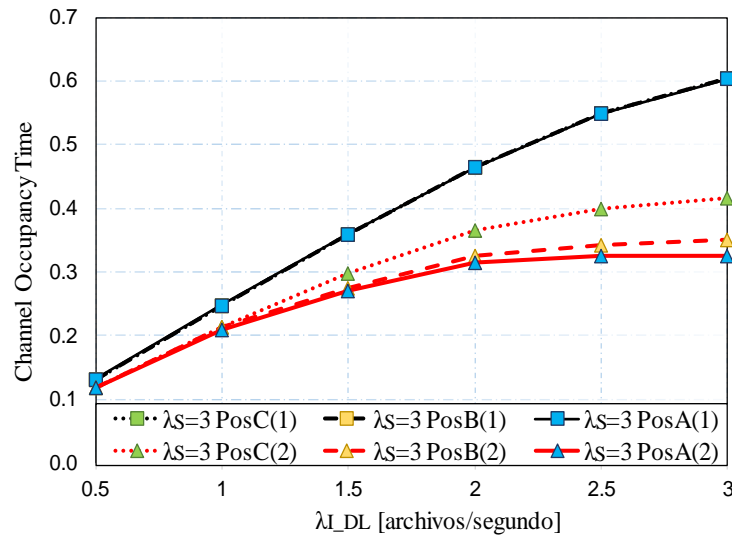
3.2 Impacto de la Presencia de Nodos Ocultos en las Prestaciones de la Red

pertencientes a la red Wi-Fi. No obstante, la existencia de colisiones provoca el incremento de la CW y en consecuencia un aumento del *overhead* temporal y decremento del *throughput*. De forma similar, la red LAA se verá afectada por la presencia de $STA_{HA\ int}$ a pesar de que estos nodos en zona oculta pertenezcan a una red diferente.

La Fig. 3.8 a) muestra los efectos que las $STA_{HA\ int}$ ejercen sobre la tasa de satisfacción de los $UE_{HA\ ser}$, comparando los resultados con el escenario en el que no existen estas $STA_{HA\ int}$. De igual manera, la Fig. 3.8.b) muestra el COT del AP en ambos casos. Ambas figuras comparan el comportamiento de los $UE_{HA\ ser}$ y el AP cuando el tráfico del eNB es igual a $\lambda_S=3$ archivos/segundo en una coexistencia LAA Wi-Fi.



a) Tasa de satisfacción para $UE_{HA\ ser}$ escenario (1) y (2)



b) COT del AP para escenario (1) y (2)

Figura 3.8: Tasa de satisfacción para $UE_{HA\ ser}$ y COT del AP para escenarios con un ($UE_{HA\ ser}$) (1) y dos ($UE_{HA\ ser}$ y $STA_{HA\ int}$) (2) tipos de nodos ocultos.

Hasta este momento, se ha encontrado que la tasa de satisfacción de los $UE_{HA\ ser}$ varía en función de la intensidad tráfico del servidor eNB y de la intensidad del tráfico del AP y que estos valores influyen de manera general sobre la probabilidad de colisión. En la

Fig. 3.8 a), la tasa de satisfacción de los $UE_{HA\ ser}$ se incrementa conforme las condiciones de radio del canal mejoran; es decir, la tasa de satisfacción mejora cuando los $UE_{HA\ ser}$ se aproximan a su eNB. Sin embargo, cuando el interferente es un AP, sucede un fenómeno particular que es propio de las redes Wi-Fi y está asociado con el COT del AP, el cual se detalla en el siguiente párrafo.

En la Fig. 3.8 b) se muestra el COT del AP para el escenario (1) y el escenario (2) para λ_S constante e igual a 3 archivos por segundo. Aquí se muestra que el COT del AP para el escenario (1) es el máximo posible y se debe a que ninguna STA de la red Wi-Fi se ve afectada por colisiones, ya que no existen STA_{HA} . Sin embargo, tan pronto existen $STA_{HA\ int}$ su efecto se ve reflejado en la reducción del COT del AP y continuará disminuyendo conforme las $STA_{HA\ int}$ se acercan a la fuente de interferencia, que en este caso particular se trata de un eNB. Por este motivo, para un tráfico λ_S constante, el COT del AP disminuye conforme las $STA_{HA\ int}$ están más alejadas de su AP servidor (Pos. A). Como se ha comentado, las colisiones son detectadas por el AP cuando no existe respuesta (señales ACK) por parte de las STA_{HA} a paquetes enviados desde el AP, lo que activa el procedimiento de *backoff*, el cual es el mismo para todas las STA asociadas al AP en DL. El aumento del tiempo de espera debido a los incrementos en la CW afecta a cualquier transmisión desde el AP a sus STA sin importar las condiciones de canal e interferencias individuales. En este contexto, la tasa de satisfacción de los $UE_{HA\ ser}$ para el escenario (2) se beneficia de una reducción del COT del AP y obtiene un mejor desempeño que su contraparte en el escenario (1). Este comportamiento es opuesto al observado cuando la fuente de interferencia proviene desde otro eNB LAA, en donde la existencia de UE en zona oculta asociados al nodo interferente genera una mayor COT y por ende una mayor afectación en la tasa de satisfacción del nodo eNB servidor.

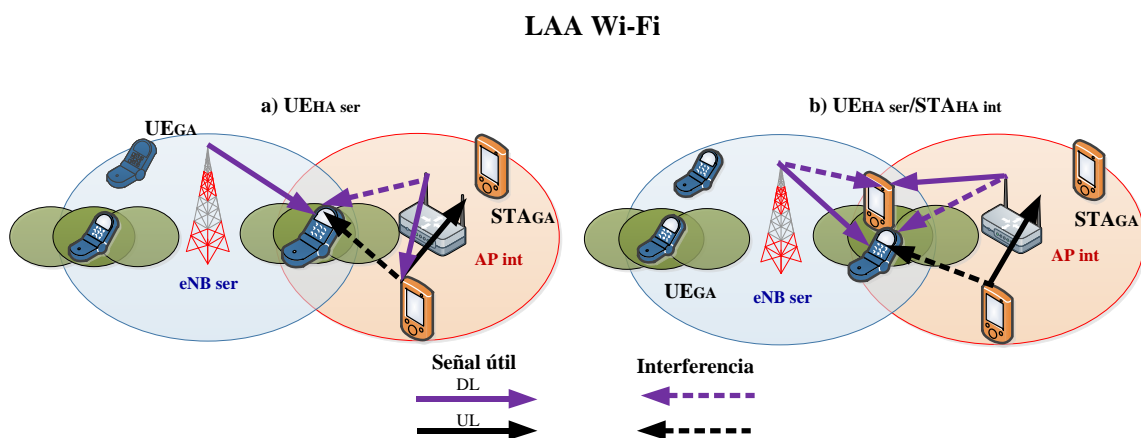
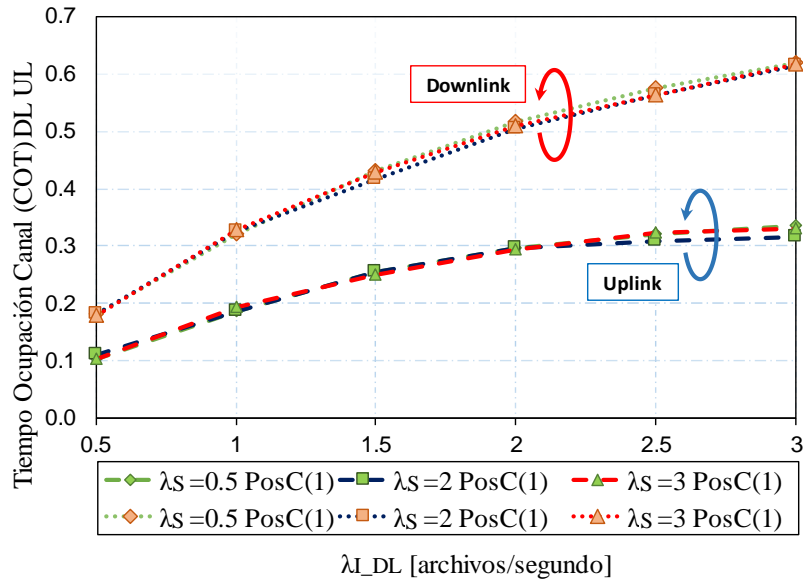


Figura 3.9: Escenario LAA Wi-Fi con transmisiones en DL y UL. a) Escenario con $UE_{HA\ ser}$
b) Escenario con $UE_{HA\ ser}$ y $STA_{HA\ int}$.

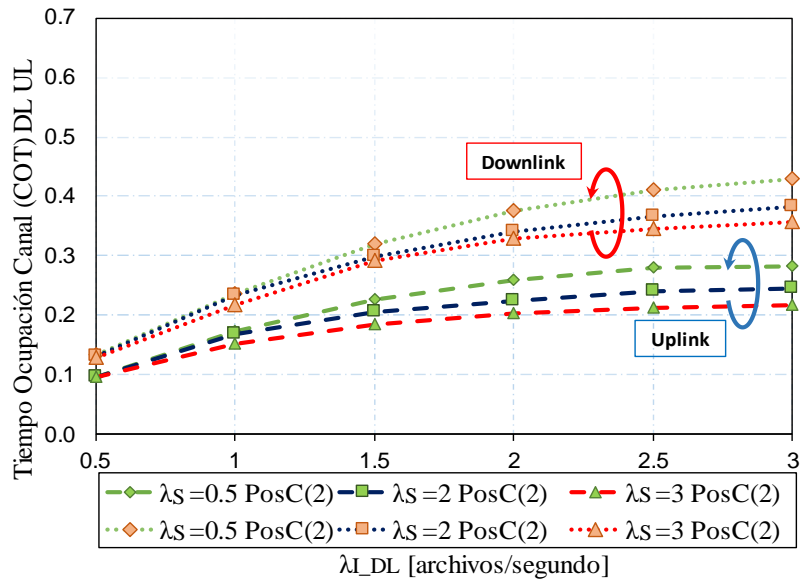
Se han desarrollado simulaciones considerando tráfico en DL y UL para el AP Wi-Fi, estableciéndose una relación 2 a 1 entre el tráfico en DL (λ_{I_DL}) y el tráfico en UL (λ_{I_UL}). El tráfico en DL y UL está distribuido uniformemente y en forma secuencial para cada una de las STA que pertenecen a la red Wi-Fi. La Fig. 3.9 sigue el modelo general planteado

3.2 Impacto de la Presencia de Nodos Ocultos en las Prestaciones de la Red

en la Fig. 3.1 b) con la diferencia de que ahora existe un tráfico en UL. La Fig. 3.9 a) muestra la coexistencia LAA Wi-Fi con un solo tipo de nodo oculto ($UE_{HA\ ser}$). Debido a las transmisiones en UL que las STA pueden realizar, cada STA puede convertirse en un potencial nodo oculto para el eNB. La Fig. 3.9 b) tiene los dos tipos de nodos en zona oculta ($UE_{HA\ ser}$ y $STA_{HA\ int}$) y al igual que en el escenario anterior cada STA puede ser un nodo oculto para el eNB durante las transmisiones en UL. Solamente las $STA_{HA\ int}$ no constituyen un potencial nodo oculto, ya que se encuentran dentro del área de sensado del eNB.



a) COT en DL y UL del AP Wi-Fi en escenario sin $STA_{HA\ int}$ (1). El $UE_{HA\ ser}$ está en Pos C, pero no influye en el COT de AP.



b) COT en DL y UL del AP Wi-Fi en escenario con $STA_{HA\ int}$ y $UE_{HA\ ser}$ (2)

Figura 3.10: Tiempo de Ocupación del canal para AP Wi-Fi con tráfico en DL y UL a) el escenario no tiene $STA_{HA\ int}$ (1) b) el escenario tiene los dos tipos de nodos ocultos $STA_{HA\ int}$ y $UE_{HA\ ser}$ (2) cada uno ubicado en la posición C (PosC). Coexistencia LAA Wi-Fi.

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

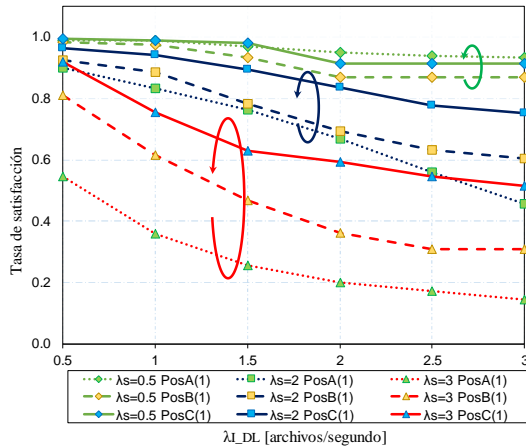
La Fig. 3.10 muestra los COT del AP para las transmisiones en DL y UL para los escenarios mostrados en la Fig. 3.9. La Fig. 3.10 a) muestra el COT para DL (anillo rojo) y el COT para UL (anillo azul) cuando no existen nodos en zona oculta que pertenezcan al AP Wi-Fi. En la zona oculta común se ubica el $UE_{HA\ int}$ en la posición C (Pos C), pero para fines prácticos no tiene ningún efecto sobre el AP. Por este motivo el cambio de la intensidad del tráfico de la celda servidora eNB (λ_S) no tiene incidencia en el COT del AP. Bajo estas condiciones el AP transmite y recibe su tráfico planificado, pudiendo notar que la relación 2 a 1 entre tráfico DL y UL se mantiene para las diferentes intensidades de tráfico interferente DL (λ_{I_DL}). La Fig. 3.10 b) muestra el COT para DL (anillo rojo) y UL (anillo azul) para los diferentes valores de tráfico λ_{I_DL} . En esta oportunidad existen dos tipos de nodos en zona oculta ($STA_{HA\ int}$ y $UE_{HA\ ser}$), ambos ubicados en la misma posición C. Los resultados muestran que la introducción de $STA_{HA\ int}$ sobre la red Wi-Fi reduce el valor máximo de COT que el AP puede alcanzar. Las demandas de tráfico en DL y UL son las mismas que el caso anterior; sin embargo, el AP no es capaz de lograr igual COT que cuando no existen nodos ocultos que pertenezcan a su red. Adicionalmente, se observa que la intensidad del tráfico del eNB (λ_S) tiene incidencia sobre el COT del AP: cuanto mayor es el tráfico λ_S , mayor es la probabilidad de colisiones sobre el nodo oculto que pertenece a Wi-Fi ($STA_{HA\ int}$), lo que a su vez genera un mayor número de procedimientos de *backoff* sobre el AP, el cual ve reducido su COT en UL y DL como consecuencia de estas colisiones. Por tal motivo, esta figura muestra 3 líneas para el COT en DL y para el COT en UL, cada una de las cuales refleja los resultados para una intensidad de tráfico bajo ($\lambda_S=0,5$), medio ($\lambda_S=2,0$) y alto ($\lambda_S=3$) en el eNB.

La Fig. 3.11 muestra la tasa de satisfacción para los UE pertenecientes a la celda servidora $UE_{HA\ ser}$ y $*UE_{GA\ ser}$ para la coexistencia LAA Wi-Fi cuando el AP transmite en el enlace DL y las STA transmiten en el enlace UL en el mismo canal. Las Fig. 3.11 a) y c) corresponden al escenario (1), es decir que cuenta con un tipo de nodo en zona oculta, $UE_{HA\ ser}$, el cual corresponde al escenario mostrado en la Fig. 3.9 a). Mientras que las Fig. 3.11 b) y d) corresponden al escenario (2) y detallado en la Fig. 3.9 b), el cual cuenta con dos tipos de nodos en zona oculta ($UE_{HA\ ser}$ y $STA_{HA\ int}$). Los resultados de la Fig. 3.11 tienen similares características y patrones que los reflejados en la Fig. 3.6, en donde se muestra la tasa de satisfacción en un escenario LAA Wi-Fi cuando la transmisión se realiza sólo en el segmento DL.

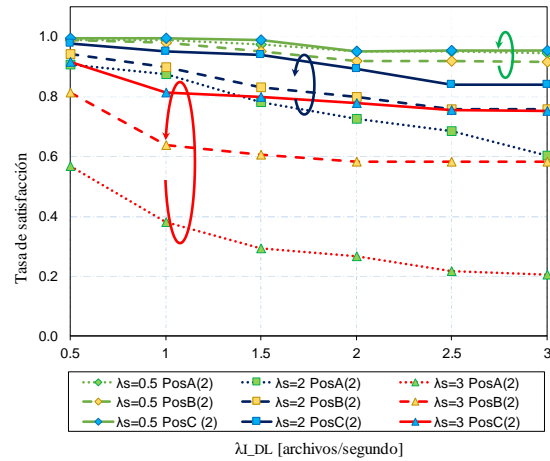
La Fig. 3.11 a) ilustra como la tasa de satisfacción para los $UE_{HA\ ser}$ disminuye conforme aumenta el tráfico del eNB (λ_S), y el tráfico DL de AP (λ_{I_DL}). Se debe recordar que conforme se incrementa λ_{I_DL} también lo hace λ_{I_UL} en una razón 2:1, por este motivo los nodos $UE_{HA\ ser}$ sufrirán de mayor número de colisiones debido a las transmisiones en DL desde el AP, y a las transmisiones en UL por parte de las STA en relación a su contraparte que opera sólo en DL (Fig. 3.6). Esta situación se ve reflejada en la menor tasa de satisfacción para los $UE_{HA\ ser}$ y $*UE_{GA\ ser}$ de las Fig. 3.11 a), c) al compararlas con los de las Fig. 3.6 a), b). Así también, al comparar las Fig. 3.11 a), c) con su contraparte Fig. 3.11 b), d) se puede apreciar que la tasa de satisfacción para los $UE_{HA\ ser}$ y $*UE_{GA\ ser}$ tiene mejores resultados en el caso de dos tipos de nodos en zona oculta ($UE_{HA\ ser}$ y

3.2 Impacto de la Presencia de Nodos Ocultos en las Prestaciones de la Red

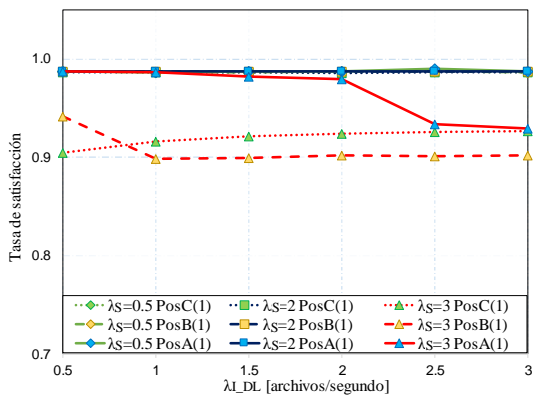
STAH_{A int}), esto se debe a que las STA en zona oculta (STAH_{A int}) se verán afectadas por colisiones y no reportarán el ACK en DL a su AP, en consecuencia, el AP permanecerá mayor tiempo en silencio. Mientras que en UL las STAH_{A int} tendrán mayor dificultad para acceder al medio en relación con las STAG_A. Todo esto beneficia a la red LAA lo cual se ve reflejado en una mejor tasa de satisfacción tanto para los nodos UE_{HA ser} como para *UE_{GA ser} en el caso del escenario (2).



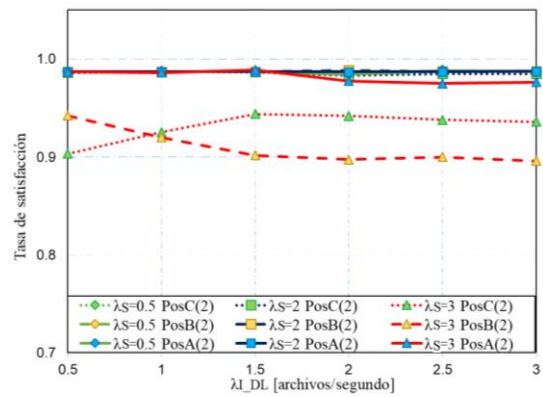
a) Tasa de satisfacción para UE_{HA ser} para posición A, B, y C para diferentes valores de tráfico λ_S . Escenario con un tipo de nodo ocultos UE_{HA ser} (1). Transmisión en DL y UL.



b) Tasa de satisfacción para UE_{HA ser} para posición A, B, y C para diferentes valores de tráfico λ_S . Escenario con dos tipos de nodos ocultos UE_{HA ser} y STAH_{A int} (2). Transmisión en DL y UL.



c) Tasa de satisfacción para *UE_{GA ser} posición A, B, y C para diferentes valores de tráfico λ_S . Escenario con un tipo de nodos ocultos UE_{HA ser} (1). Transmisión en DL y UL.



d) Tasa de satisfacción para *UE_{GA ser} posición A, B, y C para diferentes valores de tráfico λ_S . Escenario con dos tipos de nodos ocultos UE_{HA ser} y STAH_{A int} (2). Transmisión en DL y UL.

Figura 3.11: Tasa de satisfacción para UE celda servidora. LAA Wi-Fi, donde el AP transmite en DL y UL para diferentes tipos de nodos en zona oculta.

Como se aprecia en los resultados presentados en este apartado, la presencia de nodos ocultos tiene una afectación directa sobre la tasa de satisfacción de los usuarios ubicados en la misma celda a la que pertenece el nodo oculto y dependiendo de las condiciones también puede afectar a los usuarios que pertenecen a los nodos vecinos. El nivel de afectación depende de la carga de tráfico del nodo servidor, de la carga de tráfico del nodo interferente, del número de dispositivos que se encuentren ubicados en la zona oculta y de si estos pertenecen solo a la celda servidora o también a la celda interferente. A

continuación, se analiza algunas métricas definidas en el estándar LTE para descubrir cómo pueden ser útiles en el desarrollo de algoritmos que nos permitan determinar cuándo un UE es afectado por interferencias provenientes de terminales ocultos.

3.3 Análisis de Métricas LTE para la Detección de Nodos Ocultos

Una de las fortalezas que tiene LTE es la diversidad de medidas sobre el estado del canal y de nivel físico tomadas en el UE y reportadas al eNB de forma periódica o por eventos para la ejecución de múltiples mecanismos de RRM, así como las medidas efectuadas por el propio eNB. Entre las diferentes medidas reportadas por el UE, aquellas que captan nuestra atención para buscar soluciones al problema de nodo oculto son los índices CQI, debido a que son calculados en función de la SINR, y los reportes de medidas físicas generadas por el UE, como son el RSRP, RSRQ y RSSI, las cuales están basadas en las mediciones realizadas sobre las señales de referencia de la trama LTE. Estos parámetros potencialmente pueden ser usados solos o combinados para revelar los efectos de las colisiones en las redes LAA durante la transmisión de datos. Adicionalmente, se introduce el número de PRB ocupados en el DL como indicador de la carga de tráfico.

Se debe notar que LAA, de forma similar a LTE, presenta dos estados: “*Connected*” e “*Idle*”. En el estado *Connected* el eNB transmitirá señales de control, datos y DRS. Durante esta fase las métricas utilizan una gran cantidad de muestras para obtener sus valores promedio, lo que enriquece la calidad de los datos. Por su parte, en el estado *Idle* las estadísticas emplean las muestras obtenidas durante la transmisión de las DRS, cuya cantidad depende del periodo DMTC configurado y, en general, permiten tener una idea del comportamiento del canal durante el tiempo de duración de la señal. A continuación, describiremos cada una de ellas y profundizaremos en el estudio del CQI en particular.

3.3.1 PRB y métricas basadas en las señales de referencia

Physical Resource Block (PRB). La carga de tráfico del eNB se ve reflejada en el número de pares de PRB que el *scheduler* usa para asignar recursos a los usuarios asociados a su celda. Como se describió anteriormente, un par de PRB es la unidad más pequeña de recursos que puede ser asignada a un usuario y está compuesto por 12 subportadoras (180 KHz) en frecuencia y 1 subtrama (1 ms) en el dominio del tiempo (excluyendo los símbolos ocupados por el PDCCH), mientras que un RE está compuesto por 1 subportadora y 1 símbolo OFDM. A partir de este momento, cuando hablemos de PRB, nos referiremos en realidad a pares de PRB, es decir, la unidad mínima de asignación de recursos a un UE.

Reference Signal Received Power (RSRP). Como se detalla en [101], el RSRP se define como el promedio lineal de las potencia recibidas en vatios (W) en los RE que transportan las señales de referencia (CRS o RS). Las medidas se llevan a cabo sobre un ancho de banda específico (en este caso el ancho de banda del sistema, equivalente a un número N_{RB} de PRB) y únicamente en los símbolos que transportan las señales de referencia. En el caso de usar un prefijo cíclico normal un slot tiene 7 símbolos OFDM, y las mediciones se realizan sobre los símbolos 0 y 4.

Received Signal Strength Indicator (RSSI). El RSSI se define como el promedio lineal de la potencia total recibida en vatios (W) en los símbolos OFDM que contienen RS, considerando todas las fuentes de potencia (celda servidora y celdas no servidora transmitiendo en la misma portadora, interferencia de canal adyacente y ruido térmico). La medida se lleva a cabo sobre el ancho de banda empleado (en este caso los mismos N_{RB} de PRB usados en la medida del RSRP).

Reference Signal Received Quality (RSRQ). Esta métrica nos da una idea de la calidad de la señal recibida al relacionar la señal útil de la celda servidora con la señal total recibida en el ancho de banda empleado. Se define en la ecuación (3.3):

$$RSRQ = \frac{(N_{RB} * RSRP)}{RSSI} \quad (3.3)$$

donde N_{RB} es el número de PRB del ancho de banda utilizado en la medida del RSSI (en este caso, el número de PRB de la portadora). El RSRP es reportado por el UE al eNB en dBm, mientras que el RSRQ se reporta en dB. El envío de las métricas RSRP, RSRQ y RSSI por parte del UE al eNB es configurable. Dicho envío puede ser periódico con una temporización configurable que va desde los 120 ms hasta los 60 minutos. En nuestro caso en particular está configurado a 200 ms. De manera general, se consideran intervalos entre 200 y 400 ms para soportar otros procedimientos radio, tales como procesos de reelección de celda o *handover*. De este modo, los reportes de medidas del UE pueden potencialmente soportar los procesos de detección de nodo oculto y seguir los mismos intervalos de actualización de información empleados por los procesos de gestión de movilidad.

Las medidas reportadas por el UE al eNB (RSRP, RSRQ o RSSI) son el resultado de la aplicación de filtros tanto a nivel de capa L1 como de capa L3, como se detalla en la especificación 3GPP TS 36.133, y se muestra en la Fig. 3.12. El tiempo de promediado e implementación exacta del filtrado en el nivel L1 no está especificado y depende del fabricante. Las medidas de nivel físico son enviadas a la capa L3 y filtradas tal como se define en [102] en la sección 5.5.3.2 y se detalla en la ecuación 3.4

$$F_n = (1 - a) \cdot F_{n-1} + a \cdot M_n \quad (3.4)$$

donde F_n representa la medida actual tras la aplicación del filtro, F_{n-1} representa la medida filtrada anterior, el valor M_n es el último valor de medición recibido desde capa física y $a = \left(\frac{1}{2}\right)^{k/4}$, donde k es un coeficiente de filtraje, configurado mediante señalización RRC. La periodicidad de envío de los informes por parte del UE es idéntica a la periodicidad con que la capa física pasa la medida B al nivel L3. Los reportes considerados en esta tesis son los valores provenientes directamente de capa física sin filtrar, de modo que el filtro de capa 3 debe estar deshabilitado, para lo cual se debe configurar el valor de $k = 0$.

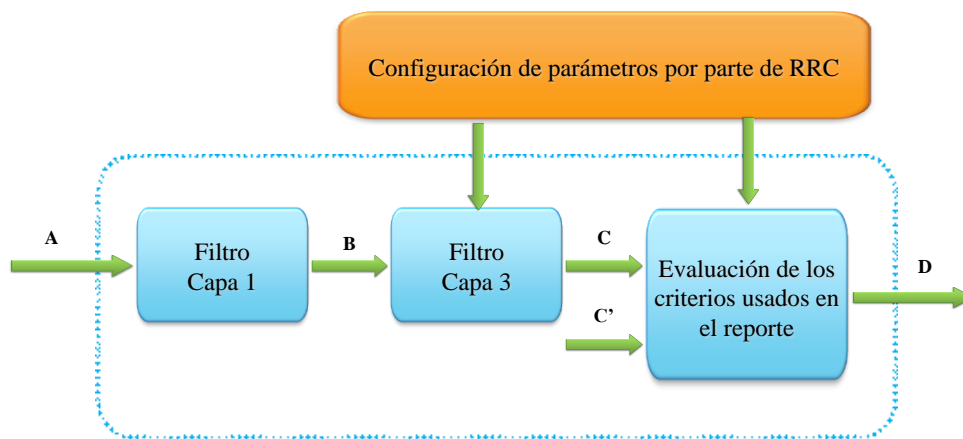


Figura 3.12: Modelo de medidas 3GPP 36.133.

Channel State Information (CSI) y CQI

Las medidas de CSI (que en nuestro caso está compuesto por CQI) son reportadas por cada UE hacia su eNB y usadas por este para tareas de control de potencia, *scheduling* dependiente del canal y AMC (*Adaptive Modulation and Coding*). El modelo de la capa física del simulador obtiene el valor de SINR en forma de un vector compuesto por varios SINR instantáneos: $SINR_1, SINR_2, \dots, SINR_N$ para cada PRB n , donde $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ para canales AWGN con modelo de interferencia gaussiana. El SINR se obtiene a partir de las señales de referencia (RS) y en un periodo de 1 ms equivalente a 1 TTI. Los valores de SINR que determinan qué valor de MCS emplear son específicos del vendedor. En el caso del simulador NS-3 utilizado en la tesis se ha usado el simulador de nivel de enlace Vienna [98] [103] para obtener las curvas BLER vs SINR para los diferentes valores de MCS especificados en el estándar [104].

De esta manera se obtiene un nivel mínimo requerido de SINR para cada MCS que garantice un BLER menor a 10%. Los valores de CQI reportados son valores discretos que varían desde 0 hasta 15. Cada índice de CQI se mapea con un índice MCS (se definen 32 índices MCS, siendo factibles el empleo de 29 (0-28)) que se relaciona con un conjunto finito de tamaños de bloques de transporte a través de la Tabla 7.1.7.1-1 de [9] para los cuales se asegura el cumplimiento del valor objetivo de BLER usando la mayor eficiencia espectral posible.

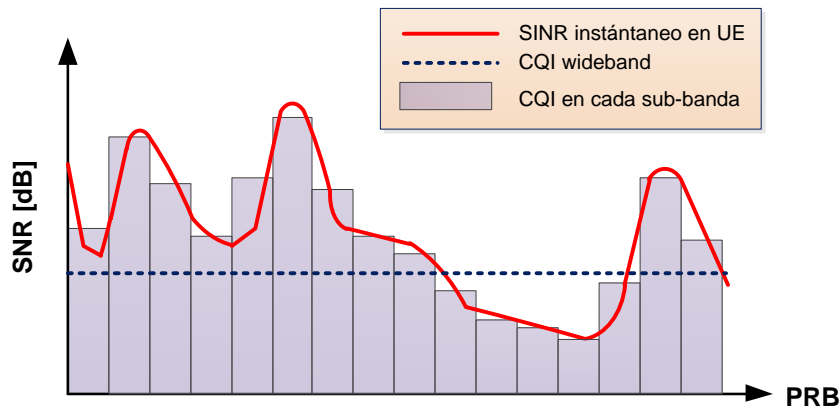
3.3 Análisis de Métricas LTE para la Detección de Nodos Ocultos

La Tabla 3.3 [105], muestra la relación existente entre la CQI, SINR; MCS y eficiencia espectral para un valor objetivo de BLER menor al 10% de acuerdo a los parámetros establecidos en la Tabla 7.2.3-1 de la TS 36.213 [9]. La Tabla 3.3 nos permite tener una idea del rango asociado a la SINR para cada índice CQI definido en el estándar.

Tabla 3.3: Relación entre CQI, SINR, MCS y eficiencia espectral considerando un valor umbral de 10% BLER

CQI	SINR rango [dB]	MCS		Eficiencia espectral [bits/RE]
		Modulación	Coding Rate Aprox.	
0	$\text{SINR} < -6,936$	Fuera de rango	--	--
1	$-6,936 \leq \text{SINR} < -5,146$	QPSK	0,0762	0,1523
2	$-5,147 \leq \text{SINR} < -3,18$	QPSK	0,1172	0,2344
3	$-3,18 \leq \text{SINR} < -1,253$	QPSK	0,1885	0,377
4	$-1,253 \leq \text{SINR} < 0,761$	QPSK	0,3008	0,6016
5	$0,761 \leq \text{SINR} < 2,699$	QPSK	0,4385	0,877
6	$2,699 \leq \text{SINR} < 4,694$	QPSK	0,5879	1,1758
7	$4,694 \leq \text{SINR} < 6,525$	16 QAM	0,3691	1,4766
8	$6,525 \leq \text{SINR} < 8,573$	16 QAM	0,4785	1,9141
9	$8,573 \leq \text{SINR} < 10,366$	16 QAM	0,6016	2,4063
10	$10,366 \leq \text{SINR} < 12,289$	64 QAM	0,4551	2,7305
11	$12,289 \leq \text{SINR} < 14,173$	64 QAM	0,5537	3,3223
12	$14,173 \leq \text{SINR} < 15,888$	64 QAM	0,6504	3,9023
13	$15,888 \leq \text{SINR} < 17,184$	64 QAM	0,7539	5,5234
14	$17,184 \leq \text{SINR} < 19,829$	64 QAM	0,8525	5,1152
15	$\text{SINR} > 19,829$	64 QAM	0,9258	5,5547

Los valores de CQI se pueden reportar por subbandas (el tamaño mínimo de la subbanda es el PRB) o para todo el ancho de banda. La Fig. 3.13 muestra los dos tipos de CQI que menciona el estándar. El CQI reportado usa las medidas de SINR evaluados en el último TTI. En nuestro caso en particular se usa un valor CQI promedio para todo el ancho de banda (*CQI wideband*) con reportes CSI que se generan cada 2 ms y que son enviados en la PCell del enlace UL usando el canal PUCCH. El principal razonamiento para la selección de *CQI wideband* es que, en la banda no licenciada, las fluctuaciones de SINR debido a interferencias son bastante significativas, lo que se traduce en una asignación muy dinámica de los PRB sobre todo el ancho de banda. De este modo, realizar un seguimiento fiable por medio de CQI a nivel de subbanda de PRB es complicado. Por consiguiente, lo que se busca es tener una idea promedio del estado de canal sobre toda la banda y no en partes de la misma, lo que se consigue con el uso de *CQI wideband*.



Ancho de banda dividido en sub-bandas de PRB
 Figura 3.13: CQI wideband vs CQI subbanda

El motivo para la selección de un periodo de 2ms para los reportes de CQI es para asegurar que la medida de CQI es tomada dentro del tiempo de duración de una trama LAA que está definido por el valor MCOT. Considerando el valor mínimo de MCOT que define el estándar es igual a 4ms, el valor seleccionado de 2 ms permite cumplir con este requerimiento. Adicionalmente, tal como fue acordado en la reunión ad hoc de RAN1 LAA: “*Interference measurement for CSI is not allowed outside of the serving cell transmission period*” para una portadora no licenciada [106], [107], lo que quiere decir que todas las medidas CSI deben ser realizadas durante la transmisión de DRS o datos de usuario. Por tanto, si el eNB no envía alguna de estas señales, el UE no debe realizar las mediciones.

Como se mencionó en el capítulo anterior, las señales DRS sirven para ejecutar tareas de sincronización y reportes RRM. Las señales DRS son desplegadas en la SCell en una red LAA, son modeladas para tener una duración de 1 ms (14 símbolos OFDM) y pueden ser enviadas en conjunto con datos de usuario. Es decir, si el eNB está transmitiendo datos en DL a sus UE, estos datos pueden incluirse en el TTI asignado para transmitir la señal DRS o de forma independiente cuando el eNB no tiene datos a transmitir en DL. Por este motivo, es posible tener reportes CSI basados en mediciones de CQI del canal a pesar de que el eNB no haya transmitido datos de usuario sobre la SCell, ya que el canal es evaluado en base a los valores de SINR que se obtienen de la señal DRS que periódicamente se envía en DL y, en caso que el UE esté habilitado, reportará el CQI a su eNB. Los reportes CQI también se originan a partir de los datos de usuario, en donde el valor de CQI es calculado en función del valor de SINR que se obtiene en el último TTI; es decir, para un periodo de reporte de CQI igual a 2ms existen dos TTI, el cálculo de CQI emplea el valor de SINR del último TTI. Debido a la configuración de 2 ms establecido para los reportes CQI, es posible enviar hasta 4 medidas CQI al eNB cuando la trama tiene una MCOT=8 ms, que es el valor empleado en esta tesis. En la banda no licenciada, las interferencias co-canal (colisiones) pueden ocurrir en tres escenarios posibles: Primero, durante la transmisión de datos de usuario, segundo, durante la transmisión de datos de usuario y señal DRS, y tercero y menos probable durante la transmisión conjunta de señales DRS, por parte del nodo servidor y nodo interferente.

La release 13 indica que se debe realizar las medidas RRM para una correcta selección/reselección de la SCell LAA. Las medidas RRM se basan en la recepción de las señales de referencia que pueden estar contenidas en las señales DRS o en tramas LAA para la generación de los reportes de RSRP, RSRQ y el cálculo del RSSI. De forma general, el nivel de la conectividad en un sistema de comunicación móvil en términos de *throughput* de un sistema basado en paquetes es dependiente de cuatro factores: la posición del UE, el ambiente, el nivel de interferencia y la cantidad de tráfico de datos transmitidos por otros usuarios en la misma celda [108]. Para la evaluación de la calidad del canal en un sistema LTE a nivel del UE, el 3GPP ha definido algunos indicadores, los cuales ya han sido mencionados y son: RSRP, RSSI y RSRQ. El RSRP basa sus medidas en las RS que son enviadas por el eNB con una potencia constante y son independientes de la actividad de los UE. Por este motivo, solo la posición del dispositivo influye en este indicador. El RSSI caracteriza la potencia total recibida en el espectro empleado por LTE; es decir, esta medida incluye la señal útil de todos los usuarios en la celda, más el ruido térmico y la interferencia. Y finalmente, el RSRQ describe la relación entre RSRP, RSRQ y el número de PRB usados para medir el RSSI. Tanto el RSSI y el RSRQ son influenciados por los tres principales factores de conectividad como son: la posición del UE, el nivel de interferencia y la cantidad de tráfico producido por los usuarios en la misma celda. Por este motivo, considerando la naturaleza dinámica de las condiciones del canal en el espectro no licenciado, la movilidad de los UE en interior de la celda y el nivel de carga del eNB nos inducen a considerar a los reportes de medidas de UE como otra fuente potencial de información útil para la detección de colisiones la cual será desarrollada en el próximo capítulo.

A continuación, el análisis se centra inicialmente en la variable CQI, evaluando cómo el canal y la presencia de nodos ocultos afectan a los valores de CQI reportados por UE ubicados tanto en zona oculta como en zona libre de contienda para la banda no licenciada.

3.3.2 Impacto de la presencia de nodos ocultos sobre el CQI

A continuación, se considera el uso de los valores de CQI instantáneos (*CQI wideband*) reportados hacia el *scheduler* del eNB con un periodo de 2 ms y que son agrupados en forma de una distribución estadística para su análisis, a diferencia de otros trabajos como [75], que consideran valores de CQI promediados. De forma general, los valores instantáneos de CQI no reflejan la condición exacta del canal en el momento que el eNB transmite la información hacia el UE debido a los retardos de procesamiento que existen desde el momento que la medida es tomada hasta que el valor CQI reportado llega al *scheduler*. Sin embargo, los resultados de esta tesis muestran que la distribución estadística basada en los valores instantáneos de CQI tienen una correlación directa con la presencia de nodos ocultos que afectan a los UE ubicados en zona oculta. Así también, se analiza el efecto que el canal de comunicaciones puede ejercer sobre la métrica CQI. Para este estudio se consideran los dos modelos de canal anteriormente definidos como canal

ideal y real. Este análisis permite entender cuáles son las fortalezas y limitaciones que la variable CQI puede tener en el contexto de problemas de terminal oculto.

Debido al carácter aleatorio asociado con las interferencias en un canal compartido, se espera que los índices CQI reportados por los UE ubicados en interior de la zona oculta tendrán un comportamiento oscilante entre dos estados: colisión y no colisión. El análisis profundo de esta variable permite apreciar cuál es el rango de los índices CQI que pueden ser asociados con el estado de colisión o de no colisión. También se estudia el uso potencial del porcentaje de CQI asociado con colisiones como un estimador del tráfico del nodo interferente. El análisis incluye el entendimiento de cómo el *scheduler* asigna los PRB a los nodos afectados por colisiones, las implicaciones que el algoritmo de *backoff* tiene en el cálculo de CQI y cómo las diferentes posiciones del UE en el interior de la zona oculta inciden en el valor del índice CQI. Todo esto se realiza mediante la variación controlada de parámetros como la carga de tráfico de la celda servidora y de la celda interferente, la posición de los UE en el interior de la zona oculta y las características del canal, lo cual permite tener una mejor comprensión de cómo el CQI varía en función de cada uno de estos parámetros y de cómo el UE en zona oculta y las métricas asociadas a este dispositivo varían y e inciden sobre el rendimiento de los diferentes elementos de la red. Toda esta información será útil para el desarrollo de algoritmos para la detección de nodos ocultos.

En un inicio solo se considera el uso de las estadísticas de CQI; sin embargo, conforme se profundiza en el entendimiento acerca de las colisiones y su efecto sobre otros indicadores de LTE se podrá involucrar más variables y proponer algoritmos más sofisticados cuyo rendimiento permita una mejor detección de los nodos ocultos. En primer lugar, se realiza un análisis considerando un canal ideal y posteriormente se usará un canal real de comunicaciones.

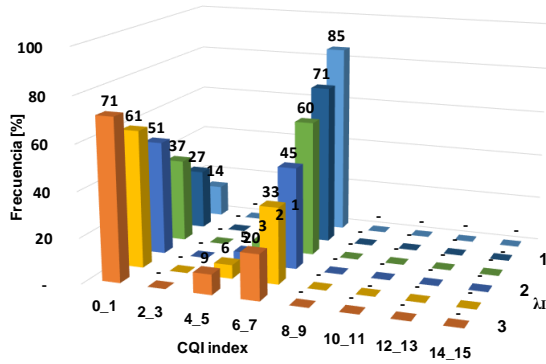
3.3.2.1 Canal ideal sin movilidad de los UE o STA

3.3.2.1.1 Impacto de la presencia de nodos ocultos en la distribución estadística de los CQIs

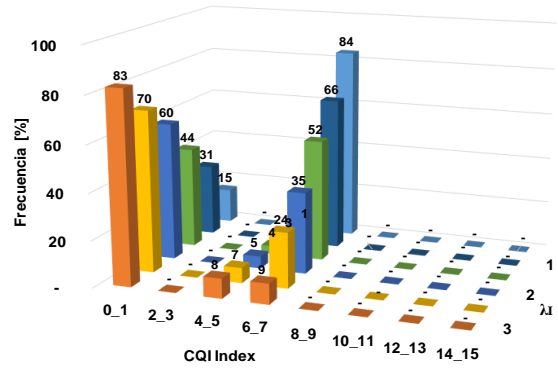
A continuación, se obtiene la distribución estadística de los CQI generados por nodos ocultos considerando un canal ideal (no se considera el efecto multitrayectoria), en donde los UE o STA permanecen inmóviles durante todo el tiempo de simulación.

La Fig. 3.14 muestra la distribución de CQI reportado por el UE_{HA ser} para un escenario de coexistencia LAA LAA como se detalla en la Fig. 3.1 a), en donde el tráfico DL del eNB servidora es igual a $\lambda_S = 0,5$ archivos/segundo, mientras que el tráfico DL del eNB interferente varía en un rango $\lambda_I = [0,5, 3]$ archivos/segundo en incrementos de 0,5. El nodo de prueba UE_{HA ser} se ubica en 3 posiciones (Pos. A, Pos. B y Pos. C) en el interior de la zona oculta, en donde la Pos. A está cerca del nodo servidora y la Pos. C es la más alejada del mismo. En esta tesis se emplea el termino posición o subárea de forma indistinta, e indica la ubicación de los nodos de prueba en el ambiente de simulación.

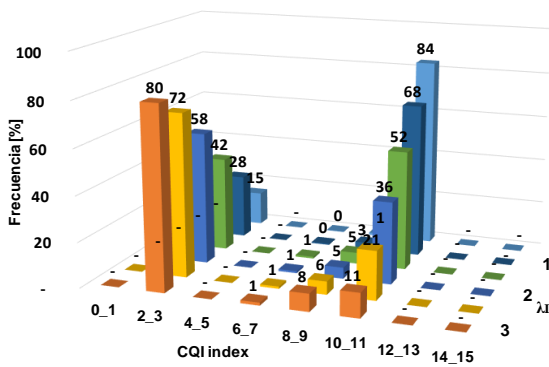
3.3 Análisis de Métricas LTE para la Detección de Nodos Ocultos



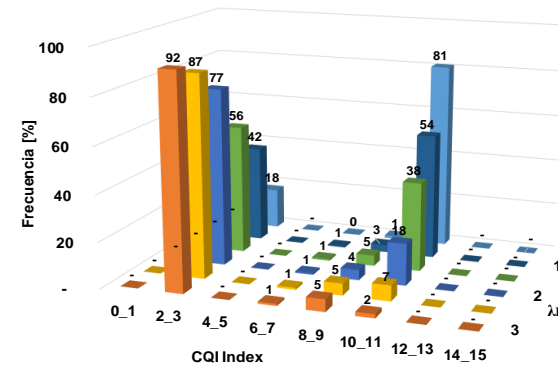
a) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. C (Mala cobertura y fuerte interferencia) y un $\lambda_s=0,5$.



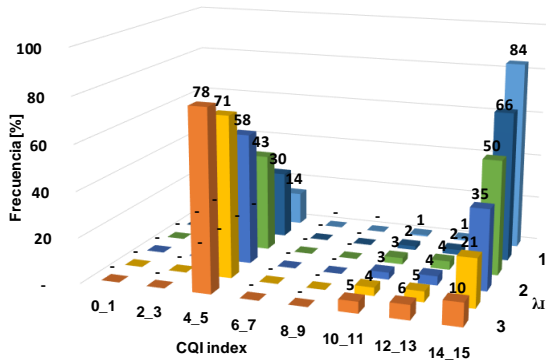
d) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. C (Mala cobertura y fuerte interferencia) y un $\lambda_s=0,5$. Escenario con dos tipos de nodos ocultos UE_{HA ser} y UE_{HA int} (Pos C).



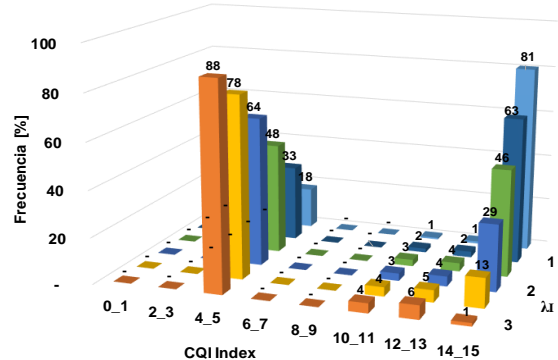
b) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) y un $\lambda_s=0,5$.



e) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) y un $\lambda_s=0,5$. Escenario con dos tipos de nodos ocultos UE_{HA ser} y UE_{HA int} (Pos B)



c) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. A (Buena cobertura y baja interferencia) y un $\lambda_s=0,5$.



f) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. A (Buena cobertura y baja interferencia) y un $\lambda_s=0,5$. Escenario con dos tipos de nodos ocultos UE_{HA ser} y UE_{HA int} (Pos A)

Figura 3.14: Distribuciones CQI reportados por UE_{HA ser} coexistencia LAA LAA para escenario con un tipo de nodo oculto UE_{HA ser} (Fig. 3.1 a.1) y dos tipos de nodos ocultos UE_{HA ser} y UE_{HA int} (Fig. 3.1 a.2) para un canal ideal.

Las Fig. 3.14 a), b) y c) muestran la distribución de los CQI reportados por los UE_{HA ser} para las posiciones C, B y A como se ilustra en la Fig. 3.1 a.1), en donde solo existen nodos ocultos asociados a la celda servidora UE_{HA ser}. Por su parte, las Fig. 3.14 d) e) y f) muestran la distribución de CQI reportados por los UE_{HA ser} para las posiciones C, B y A cuando

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

existen nodos ocultos que pertenecen a la celda servidora $UE_{HA\ ser}$ y nodos ocultos que pertenecen a la celda interferente $UE_{HA\ int}$ como lo ilustra la Fig. 3.1 a.2).

La Fig. 3.14 a) presenta las estadísticas recolectadas desde los $UE_{HA\ ser}$ ubicados en la posición C, que refleja un escenario con pobre cobertura de su nodo servidor (eNB ser) y una fuerte interferencia por parte del nodo interferente (eNB int). En la Fig. 3.14 b) la posición de los UE_{HA} es más cercana a su servidora y por tanto las señales útil e interferente han aumentado y disminuido respectivamente. Finalmente, en la Fig. 3.14 c) los $UE_{HA\ ser}$ están lo más cerca posible de su nodo servidor sin abandonar la zona oculta, de modo que la señal útil es fuerte y la interferencia es la menor de todos los escenarios. En todos los casos, es posible observar que los valores de CQI se ubican en dos bandas: la banda inferior con índices de CQI en el intervalo de $[0, 5]$, que corresponde en general con aquellas situaciones en las que la transmisión de la eNB servidora y eNB interferente ocurren simultáneamente. A partir de ahora, nos vamos a referir a estas situaciones como (*CQI collision*), y la banda superior con índices de CQI que varían en un rango de $[6, 15]$ y que encajan con una recepción libre de colisiones o lo que es lo mismo libre de la interferencia generada por el eNB oculto, a la cual nos referimos como (*CQI freecollision*). Valores de CQI bajos también se pueden corresponder con bajos niveles de señal útil, pero en este caso, el hecho de que los CQI oscilen en dos bandas es un indicador de que se debe fundamentalmente a la presencia de interferencia.

La severidad de la colisión se refleja en los valores de los índices *CQI collision* del diagrama de distribución de frecuencias en donde se concentran los valores de CQI reportados por parte de los $UE_{HA\ ser}$. Cuando los $UE_{HA\ ser}$ están ubicados en la posición C, Fig. 3.14 a), se concentra en $CQI = [0,1]$, cuando están en B, Fig. 3.14 b), en el $CQI = [2, 3]$ y en C, Fig. 3.14 c), en $CQI = [4, 5]$. Como se aprecia, el peor escenario de colisión (Posición C, cerca de la fuente de interferencia) registra los peores valores de índice CQI Fig. 3.14 a). De igual manera, la posición de los índices *CQI freecollision* en el diagrama de distribución nos da una idea de la calidad del canal de transmisión en DL de la banda no licenciada, ya que al no existir colisiones los CQI reportados por los UE se ubican en la parte superior de la distribución, como sucede en las Fig. 3.14 a) $CQI = [6, 7]$, Fig 3.14 b) $CQI = [10, 11]$ y Fig. 3.14 c) $CQI = [14,15]$. Estos resultados permiten observar que existe una correlación entre la calidad del canal de comunicaciones (dada por su posición en relación a la fuente servidora) y el valor de los índices CQI reportados por los $UE_{HA\ ser}$.

La Fig. 3.14 d) tiene los mismos parámetros de configuración que la Fig. 3.14 a) con la diferencia de que el escenario de la Fig. 3.14 d) tiene nodos en zona oculta que pertenecen tanto al nodo servidor $UE_{HA\ ser}$ (Pos. C lejos de su nodo servidor) como al nodo interferente $UE_{HA\ int}$ (Pos. C cerca de su nodo servidor). Aquí se observa un aumento de la frecuencia de las estadísticas de *CQI collision* para el caso de la presencia simultánea de los nodos $UE_{HA\ ser}$ y $UE_{HA\ int}$. Esto se debe a que, del mismo modo que la presencia de los nodos $UE_{HA\ ser}$ se ven afectados por colisiones, la presencia de los $UE_{HA\ int}$ también se ven afectados por colisiones y por tanto las retransmisiones de ambos nodos ocultos se

incrementan. Estas retransmisiones hacen que el eNB interferente ocupe mayor tiempo el canal en relación a cuando no existen nodos ocultos que pertenezcan a su celda. Por tal motivo, aumenta el COT del nodo interferente y en consecuencia el número de colisiones sobre $UE_{HA\ ser}$, lo cual se ve reflejado en el incremento de la frecuencia de *CQI collision* para la Fig. 3.14 d). Este mismo fenómeno se reflejado en las Fig. 3.14 e) y f) los cuales son equivalentes a las Fig. 3.14 b) y c) con la diferencia que la celda interferente tiene nodos ocultos pertenecientes a su celda $UE_{HA\ int}$, mostrando también un incremento en la frecuencia asociada con *CQI collision*, producto de una mayor ocupación del canal generado por la presencia de los $UE_{HA\ int}$.

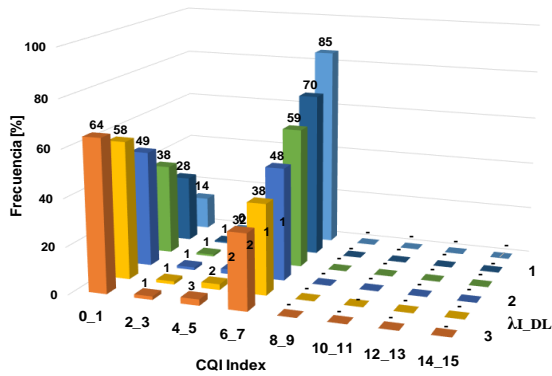
La Fig. 3.15 en cambio nos muestra la distribución de los diferentes CQI reportados por los $UE_{HA\ ser}$ hacia su eNB servidor para el escenario LAA Wi-Fi de la Fig. 3.1 b.1), en donde la interferencia proviene de un AP Wi-Fi y existe un grupo de $UE_{HA\ ser}$ ubicados en zona oculta. De igual manera, la Fig. 3.15 ilustra los CQI reportados por los $UE_{HA\ ser}$ cuando en la zona oculta existen STA Wi-Fi en el interior del área oculta ($STA_{HA\ int}$), correspondiente al escenario de la Fig. 3.1 b.2). El AP Wi-Fi solo transmite en DL. Los análisis se realizan considerando un tráfico de $\lambda_S=3$ archivos/segundo en el eNB servidor, mientras que el tráfico del AP en DL varía en el rango $\lambda_{I_DL}=[0,5, 3]$ archivos/segundo en incrementos de 0,5.

Las Fig. 3.15 a), b) y c) muestran la distribución de CQI reportados por los $UE_{HA\ ser}$ para el escenario Fig. 3.1 b.1), mientras que las Fig. 3.15 d), e) y f) ilustran la distribución de CQI para el escenario Fig. 3.1 b.2) en donde existen $UE_{HA\ ser}$ y $STA_{HA\ int}$ en la zona oculta común. La Fig. 3.15 a) presenta las estadísticas de los $UE_{HA\ ser}$ ubicados en la subárea C, que encaja con un escenario con una mala cobertura del nodo eNB servidor y una fuerte interferencia del nodo AP vecino. La Fig. 3.15 b) está asociada al contexto donde similares niveles de señal útil e interferente son percibidos por los $UE_{HA\ ser}$, mientras que en la Fig. 3.15 c) los $UE_{HA\ ser}$ se ubican en la subárea A sin abandonar la zona oculta y por tanto se percibe una fuerte señal del nodo servidor. Al igual que la Fig. 3.14, se aprecia que las distribuciones generan dos tipos de CQI: los CQI ubicados en la parte inferior de la distribución con valores bajos de índice y que corresponden a colisiones (*CQI collision*) y aquellos que se ubican en la parte superior de la distribución con valores altos de índices para una recepción libre de colisiones (*CQI freecollision*).

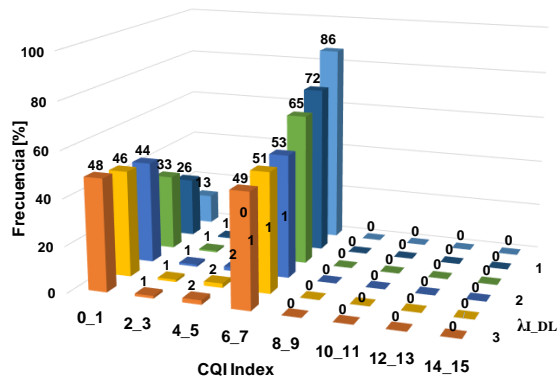
El valor de frecuencia CQI para cada uno de los valores de tráfico interferente, λ_{I_DL} , nos da una idea de la severidad de la interferencia producida por parte del nodo AP Wi-Fi y que está siendo percibida por los $UE_{HA\ ser}$. La ubicación de la distribución de *CQI collision* en la parte inferior del diagrama de distribución (índices 0, 1, 2, 3, 4 y 5) nos brinda información acerca de las condiciones radio que están siendo percibidas por los $UE_{HA\ ser}$ mientras recibe datos por parte de su nodo servidor eNB y se generan colisiones por los datos transmitidos por el nodo interferente AP. Cuanto menor sea el valor del índice CQI reportado por los $UE_{HA\ ser}$ mayor es la intensidad de la señal interferente, obteniendo valores de CQI = [0, 1] cuando el $UE_{HA\ ser}$ está más cercano a la fuente interferente y con

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

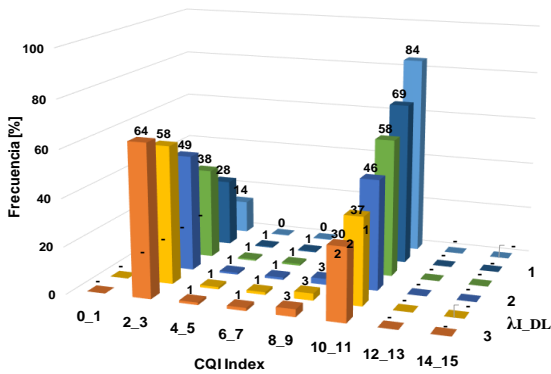
menor señal útil recibida; y un CQI = [4, 5] cuando UE_{HA ser} está más cerca de su fuente servidora y con menor señal interferente percibida.



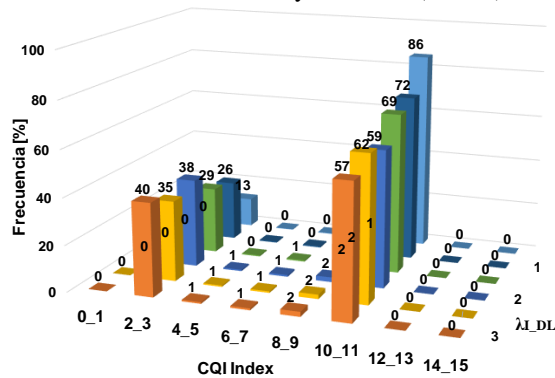
a) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. C (Mala cobertura y fuerte interferencia) y un $\lambda_S=3$.



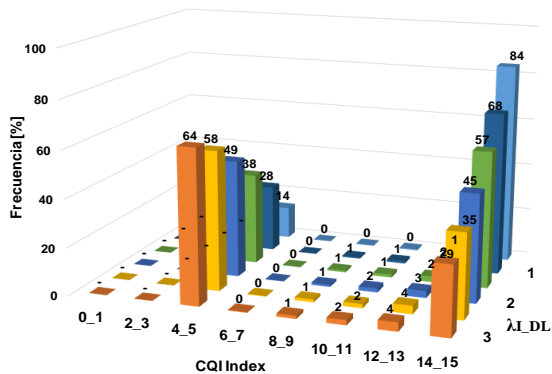
d) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. C (Mala cobertura y fuerte interferencia) y un $\lambda_S=3$. Escenario con dos tipos de nodos ocultos UE_{HA ser} y STA_{HA int} (Pos. C)



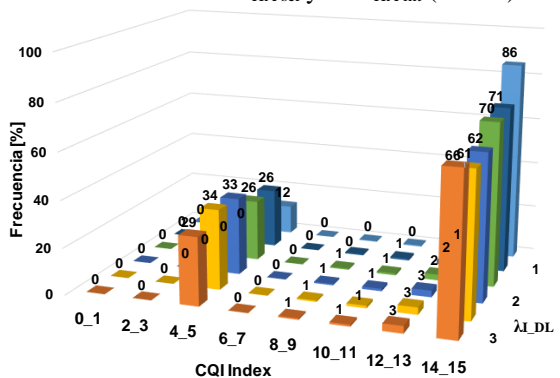
b) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) y un $\lambda_S=3$.



e) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) y un $\lambda_S=3$. Escenario con dos tipos de nodos ocultos UE_{HA ser} y STA_{HA int} (Pos. B)



c) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. A (Buena cobertura y baja interferencia) y un $\lambda_S=3$.



f) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. A (Buena cobertura y baja interferencia) y un $\lambda_S=3$. Escenario con dos tipos de nodos ocultos UE_{HA ser} y STA_{HA int} (Pos. A).

Figura 3.15: Distribuciones CQI reportados por UE_{HA ser} coexistencia LAA Wi-Fi para escenario con un tipo de nodo oculto UE_{HA ser} (Fig. 3.1 b.1) y dos tipos de nodos ocultos UE_{HA ser} y STA_{HA int} (Fig. 3.1 b.2) para un canal ideal. El AP solo transmite en DL.

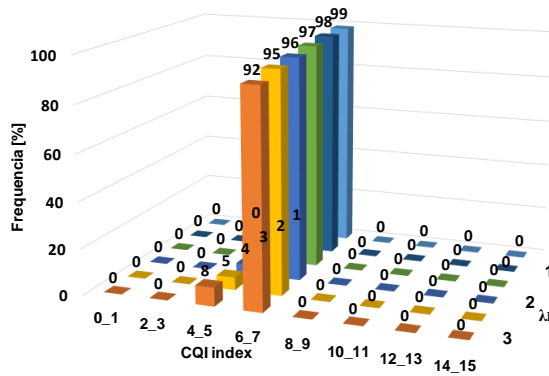
La Fig. 3.15 d) tiene los mismos parámetros de configuración que la Fig. 3.15 a), pero ahora el escenario de la Fig. 3.15 d) tiene dos tipos de nodos en la zona oculta que pertenecen tanto al eNB servidor ($UE_{HA\ ser}$ ubicado en la posición C) como al AP interferente ($STA_{HA\ int}$ ubicado en la posición C). Comparando las distribuciones de ambas figuras se aprecia que el porcentaje de *CQI collision* se ve reducido para la Fig. 3.15 d) en comparación con Fig. 3.15 a). Este decremento se debe a que la presencia de $STA_{HA\ int}$ en la zona oculta involucra un incremento en las colisiones percibidas por parte de este nodo y este incremento en las colisiones implica que el STA enviará un menor número de ACK a su AP servidor. Cabe notar que Wi-Fi detecta un mayor número de colisiones en relación a LAA para un escenario equivalente, esto se debe a las diferencias en los métodos de detección de colisiones que presentan LAA y Wi-Fi, que es más estricto en el caso de Wi-Fi ya que cada vez que cualquier usuario no reporta un ACK debido a una transmisión previa por parte del AP, el procedimiento de *backoff* se ejecutará automáticamente, mientras que en LAA el procedimiento de *backoff* se activa si el porcentaje de NACK para una subtrama de referencia (usualmente la primera) asociada a una ráfaga transmitida es mayor que un valor umbral (80%). Entonces, si la ráfaga de referencia no pertenece a los UE_{HA} (que son los UE que están siendo afectados por las colisiones), toda la subtrama será evaluada como ACK, y en caso de que la subtrama de referencia pertenezca a un UE_{HA} , esta debe rebasar el valor umbral de 80% de señales NACK para el periodo evaluado. El efecto general es que el AP detectará un mayor número de colisiones en relación con LAA, aumentando su ventana de *backoff*, de tal modo que todas las transmisiones en DL en la celda de Wi-Fi tienen que lidiar con mayores tiempos de espera. De este modo, los UE_{HA} se benefician, ya que tiene menor interferencia porque el AP usa menos tiempo el canal debido a los continuos incrementos en las CW. Este efecto también se ve reflejado en las Fig. 3.15 e) y f) en donde efectivamente el porcentaje de *CQI collision* es también menor que sus contrapartes Fig. 3.15 b) y c), respectivamente.

Adicionalmente, al comparar las Fig. 3.15 d), e) y f) entre sí, se nota que cuando el nodo oculto $UE_{HA\ ser}$ está en la posición C (más alejado de su nodo servidor) el rango de índices de *CQI collision* se ubica en índices [0, 1], mientras que cuando $UE_{HA\ ser}$ está en la posición A (cerca de su nodo servidor) los valores de *CQI collision* están en el rango [4, 5], lo que concuerda con los análisis anteriores. Sin embargo, también se aprecia que el porcentaje de *CQI collision* disminuye conforme ambos tipos de nodos ocultos pasan de la posición C a la posición A. Este fenómeno se debe a que, como se mencionó anteriormente, una red Wi-Fi es más sensible a las colisiones, lo que provoca un incremento en los tiempos de *backoff* en comparación con LAA. Cuando el nodo oculto $STA_{HA\ int}$ está en la posición C implica que se encuentra más cerca de su nodo servidor y cuando $STA_{HA\ int}$ se encuentra en la posición A implica que la estación está más alejada de su nodo servidor, contrastando con lo que sucede con $UE_{HA\ ser}$ para las mismas posiciones. Por tanto, la $STA_{HA\ int}$ en la posición C, al estar más cerca de su nodo servidor, percibirá menos colisiones y, por tanto, el AP Wi-Fi ocupará el canal en mayor proporción que cuando $STA_{HA\ int}$ está en la posición A. Como consecuencia de esta situación, el mayor o menor COT por parte del AP, debido a su sensibilidad a las colisiones, se ve reflejada en el aumento o reducción del

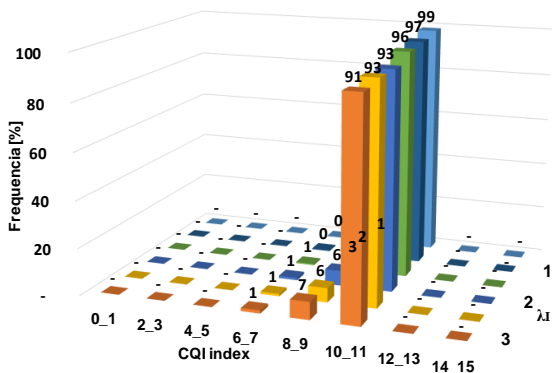
CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

porcentaje de *CQI collision* reportados por los $UE_{HA\ ser}$, tal como se indica en la Fig. 3.15 d) donde el AP ocupa mayor tiempo el canal y los porcentajes de *CQI collision* son mayores que los valores presentados en la Fig. 3.15 f) en donde el AP ocupa menos tiempo el canal.

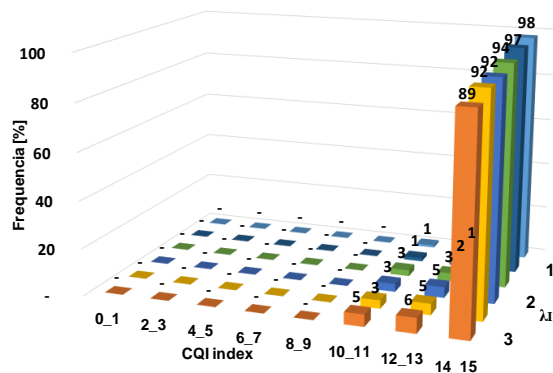
La Fig. 3.16 muestra la distribución de CQI reportados por los nodos de pruebas ubicados en la zona libre de colisión (subáreas A', B' C'), siendo su notación $UE_{GA\ ser}$. Estos nodos se ubican a similar distancia que su equivalente $UE_{HA\ ser}$, pero no sufren de colisiones debido a la presencia de nodos ocultos, sino solamente de malas condiciones del canal, ya que están ubicados en los límites de la zona de cobertura de la celda servidora eNB, tal como lo detalla la Fig. 3.1 a.1).



a) Distribución de CQI reportados por el $UE_{GA\ ser}$, ubicado en la Pos. C' (Mala cobertura) y un $\lambda S=3$.



b) Distribución de CQI reportados por el $UE_{GA\ ser}$, ubicado en la Pos. B' (Cobertura media) y un $\lambda S=3$.



c) Distribución de CQI reportados por el $UE_{GA\ ser}$, ubicado en la Pos. A' (Buena cobertura) y un $\lambda S=3$.

Figura 3.16: Distribuciones CQI reportados por $UE_{GA\ ser}$ escenario LAA LAA canal ideal.

La Fig. 3.16 a) muestra la distribución de CQI cuando los $UE_{GA\ ser}$ están en el límite de la zona de cobertura, en donde el mayor porcentaje de CQI tiene un índice entre 6 y 7 (subárea C'). Conforme los nodos de prueba $UE_{GA\ ser}$ se acercan a su nodo servidor las distribuciones de CQI aumentan el valor de sus índices hasta obtener índices entre 14 y 15 cuando los $UE_{GA\ ser}$ están cerca de su eNB servidor (subárea A'), tal como se observa en las Fig. 3.16 b) y c). Por tal motivo, y en concordancia con las distribuciones de las Fig. 3.14 y 3.15, se confirma que los *CQI freecollision* abarcan los índices ubicados en el rango de [6, 15] para las condiciones de canal ideal, tal como se definió anteriormente.

3.3.2.1.2 Correlación entre la Distribución de CQI y COT del Nodo Interferente

El objetivo de este apartado es analizar el grado de correlación que pueda existir entre la distribución *CQI collision* y la ocupación del canal por parte del nodo interferente.

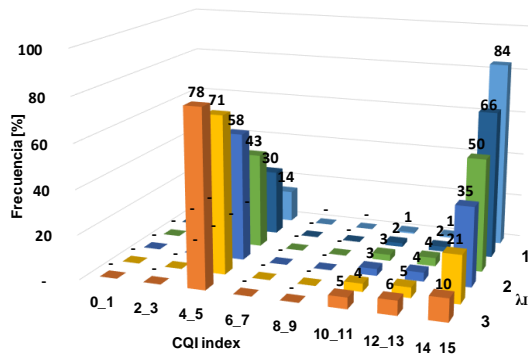
La Fig. 3.17 muestra la distribución de CQI reportados por los UE_{HA ser} Fig. 3.17 a), c) y e) en un escenario de coexistencia LAA LAA en donde existe un solo tipo de nodo oculto como se detalla en la Fig. 3.1 a.1). En esta oportunidad los UE_{HA ser} permanecen en una sola posición en el interior de la zona oculta (Pos. A), la cual corresponde a un canal con buena cobertura de su eNB servidor y bajo nivel de interferencia del eNB interferente. En este caso, el objetivo es analizar el impacto del nivel de tráfico generado en la celda interferente sobre la distribución *CQI collision* y mostrar la correlación que se desarrolla entre la distribución *CQI collision* y el nivel de ocupación del canal por parte del nodo interferente. Para ello, las Fig. 3.17 a), c) y e) muestran las distribuciones CQI para un tráfico de nodo servidor $\lambda_S=0,5$, 1,5 y 2,5 archivos/segundo, respectivamente, mientras que las Fig. 3.17 b), d) y f) muestran la *CQI collision* y *CQI collision Sinc* y el tiempo de ocupación del canal por parte del nodo interferente. Los resultados de este análisis son extrapolables a los escenarios en los que los UE_{HA ser} están ubicados en las zonas B y C.

Las Fig. 3.17 a), c) y e) muestran que los porcentajes de *CQI collision* y *CQI freecollision* para todas las distribuciones son similares a pesar del incremento del tráfico λ_S . Este fenómeno nos hace pensar que el porcentaje de *CQI collision* es directamente proporcional a la carga de tráfico del nodo interferente λ_I e independiente del tráfico del nodo servidor λ_S . De este modo, cuanto mayor sea la carga de tráfico de la celda interferente, mayor es la probabilidad de una colisión desde el punto de vista de los nodos ubicados en zona oculta UE_{HA}. Efectivamente, separando los valores de *CQI collision* de las Fig. 3.17 a), c) y e), e ilustrándolas en las Fig. 3.17 b), d) y f) respectivamente, es posible notar que existe una correlación entre el tiempo de ocupación del canal del nodo interferente, representado por la línea continua, y el porcentaje de la distribución *CQI collision* representado por los diagramas de barras.

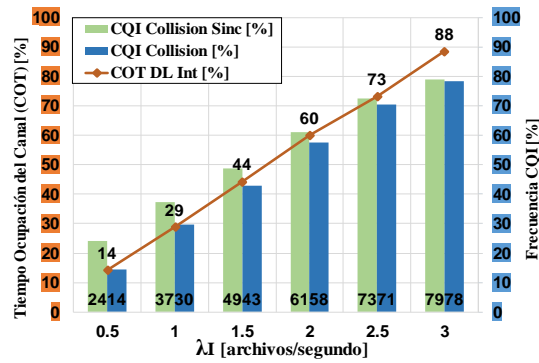
En relación a la distribución *CQI collision* hay que recordar que los valores de CQI se obtienen de las medidas de SINR de las señales DRS y tramas que contienen datos (PDSCH). En el caso de las medidas obtenidas a partir de la monitorización de las DRS el grado de sincronización de las celdas servidora e interferente tiene un impacto significativo en la medida. Como norma general, las celdas servidora e interferente no estarán sincronizadas, ya que pertenecen a operadores diferentes. Sin embargo, los resultados mostrados en las Fig. 3.17 b), d) y f) muestran dos diagramas de barras, en los que las barras color verde corresponden al peor escenario donde las celdas están sincronizadas (*CQI collision Sinc*), mientras que las barras color azul muestran el caso típico asociado a dos operadores sin ningún tipo de sincronización (*CQI collision*). Los diagramas de barras son incluidos en la misma figura para tener una mejor visualización del impacto que la sincronización entre radio bases LAA tiene sobre el reporte CQI, ya que el porcentaje de

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

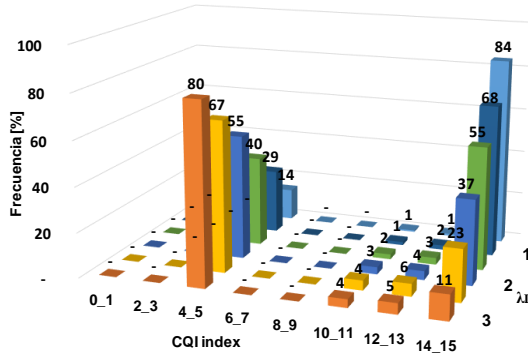
CQI collision depende tanto de la cantidad de CQI que provienen de datos PDSCH como de la cantidad de CQI que provienen de señales DRS.



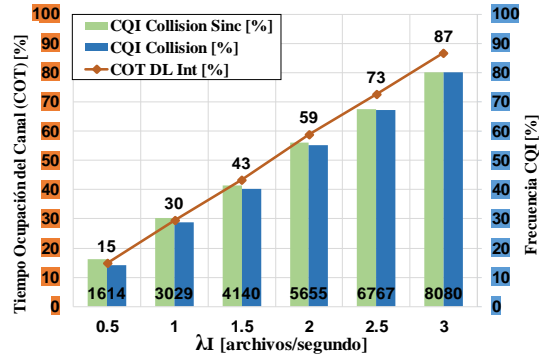
a) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. A (Buena cobertura y baja interferencia) y un $\lambda_S=0,5$.



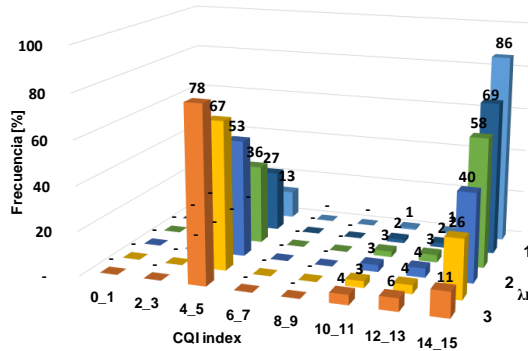
b) *CQI collision* reportado por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. A (Buena cobertura y baja interferencia) con un $\lambda_S=0,5$ y COT del eNB interferente.



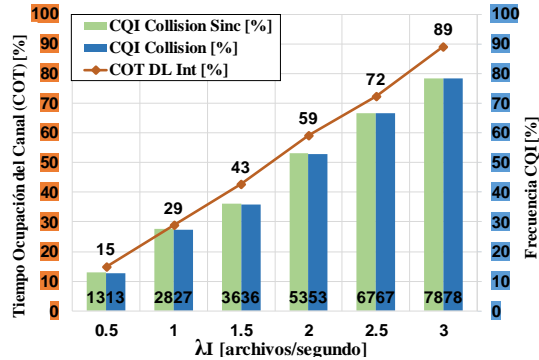
c) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. A (Buena cobertura y baja interferencia) y un $\lambda_S=1,5$.



d) *CQI collision* reportado por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. A (Buena cobertura y baja interferencia) con un $\lambda_S=1,5$ y COT del eNB interferente.



e) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. A (Buena cobertura y baja interferencia) y un $\lambda_S=2,5$.



f) *CQI collision* reportado por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. A (Buena cobertura y baja interferencia) con un $\lambda_S=2,5$ y COT del eNB interferente.

Figura 3.17: Distribución de CQI escenario LAA LAA y sus respectivos diagrama de barras para la distribución *CQI collision*, *CQI collision Sinc* y el COT del eNB interferente.

La carga de tráfico del eNB interferente λ_I varía en el rango [0,5, 3,0] archivos/segundo para los datos mostrados en la Fig. 3.17. La Fig. 3.17 b) muestra la frecuencia de la distribución *CQI collision* y *CQI collision Sinc*. *CQI collision* crece en una proporción similar al tráfico λ_I para un tráfico $\lambda_S=0,5$ archivos/segundo, mientras que *CQI collision Sinc* tiene un porcentaje mayor que *CQI collision* para valores bajos de tráfico λ_I . Esto se

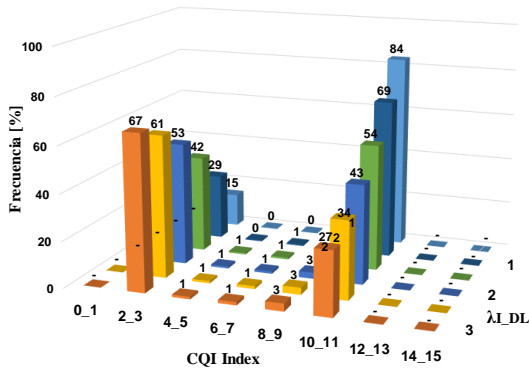
debe al mayor peso que tienen los CQI provenientes de las señales DRS (cuyos nodos eNB servidor e interferente están sincronizados) en relación a los CQI que se originan de los datos de usuario para bajas intensidades de tráfico interferente. Las Fig. 3.17 d) y f) incrementan el tráfico de celda servidora en $\lambda_S=1,5$ y $\lambda_S=2,5$ respectivamente; y aquí también se muestra que la frecuencia de la distribución *CQI collision* varía en función del tráfico de la celda interferente, siendo prácticamente los mismos para los tres casos mostrados en las Fig. 3.17 b), d) y f). Además, se observa que los diagramas de barras de *CQI collision* y *CQI collision Sinc* son similares a medida que los CQI que provienen de los PDSCH tienen mayor peso que los CQI asociados a señales DRS y, como se mencionó anteriormente, estos resultados son extrapolables a los que se obtienen si el nodo oculto se encuentra en otras posiciones en el interior de la zona oculta.

La Fig. 3.18 muestra la distribución de CQI reportados por los $UE_{HA\ ser}$ en un escenario de coexistencia LAA Wi-Fi en donde existe un solo tipo de nodo oculto como se detalla en la Fig. 3.1 b.1). Los nodos ocultos $UE_{HA\ ser}$ se ubican en la posición B, a la cual le corresponde un canal con niveles de cobertura e interferencia media, ya que se ubica a la mitad del eNB servidor y del AP Wi-Fi interferente. Al igual que la figura anterior, la Fig. 3.18 muestra la correlación que se desarrolla entre la distribución *CQI collision* y el tiempo de ocupación del canal del nodo interferente, siendo un AP en este caso la fuente de interferencia. Los resultados de este análisis son extrapolables a los escenarios en los que los $UE_{HA\ ser}$ están ubicados en las zonas A y C.

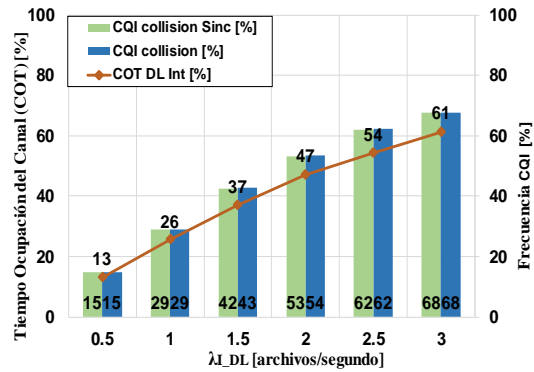
La distribución bimodal asociada a la presencia de nodos ocultos tiene las mismas características descritas anteriormente, notando que el valor de frecuencia para las distribuciones *CQI collision* y *CQI freecollision* son prácticamente las mismas a pesar del incremento del tráfico en el eNB servidor que inicia en $\lambda_S=0,5$, Fig. 3.18 a), se incrementa a $\lambda_S=1,5$ para la Fig. 3.18 c) y finalmente llega a $\lambda_S=2,5$ para la Fig. 3.18 e). De tal modo que, como se explicó en la Fig. 3.17, este hecho nos permite presumir que el porcentaje de *CQI collision* es directamente proporcional a la carga de tráfico del nodo interferente en DL (λ_{DL}) e independiente del tráfico λ_S cuando el escenario es LAA Wi-Fi.

Separando la distribución *CQI collision* de las Fig. 3.18 a), c) y e) e ilustrándolas en las Fig. 3.18 b), d) y f) respectivamente, se nota que existe una correlación entre el COT del AP Wi-Fi, que en esta oportunidad transmite en el enlace DL representado por la línea continua, y el porcentaje de la distribución *CQI collision* representado por el diagrama de barras color azul, en donde se aprecia la variación de la carga de tráfico interferente λ_{DL} en el rango dado por [0,5, 3,0] archivos/segundo. Esta tendencia se mantiene también para las Fig. 3.18 d) y f), en las cuales, a pesar del incremento en el tráfico del eNB servidor $\lambda_S=1,5$ y $\lambda_S=2,5$ respectivamente, la correlación entre COT del AP con la distribución *CQI collision* se mantiene. Adicionalmente, las Fig. 3.18 b), d) y f) muestran el diagrama de barras de *CQI collision* y *CQI collision Sinc*, en esta oportunidad al tratarse de diferentes tecnologías no existe sincronización entre la eNB y el AP, y en este sentido los porcentajes de *CQI collision* y *CQI collision Sinc* son prácticamente los mismos.

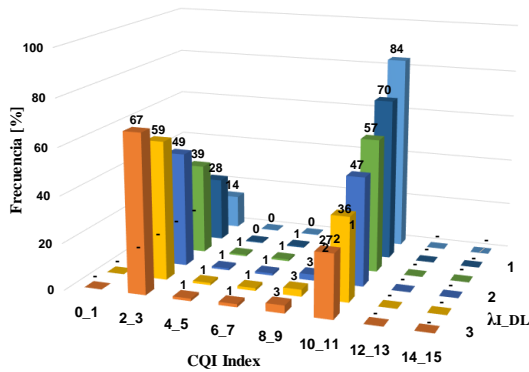
CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA



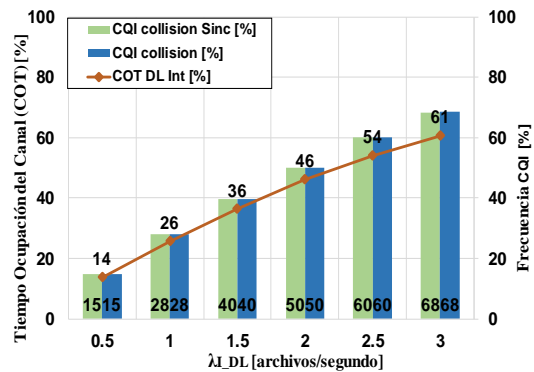
a) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA_ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) y un $\lambda_s=0,5$.



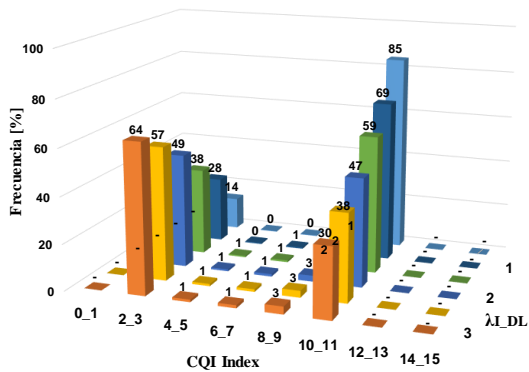
b) *CQI collision* reportado por el UE_{HA_ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) con un $\lambda_s=0,5$ y COT del AP interferente.



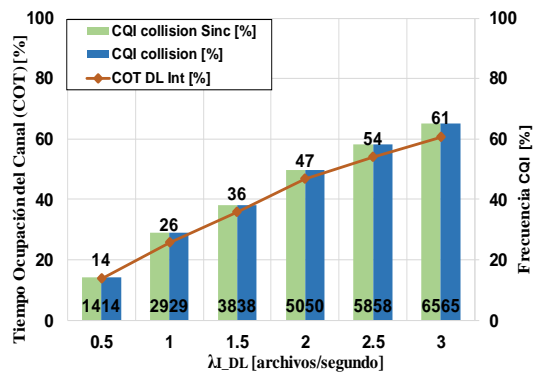
c) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA_ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) y un $\lambda_s=1,5$.



d) *CQI collision* reportado por el UE_{HA_ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) con un $\lambda_s=1,5$ y COT del AP interferente.



e) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA_ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) y un $\lambda_s=2,5$.



f) *CQI collision* reportado por el UE_{HA_ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) con un $\lambda_s=2,5$ y COT del AP interferente.

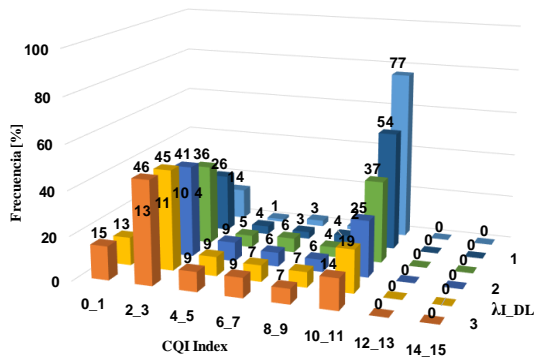
Figura 3.18: Distribución de CQI escenario LAA Wi-Fi con un solo tipo de nodo oculto (UE_{HA_ser}) y los diagramas de barras de la distribución *CQI collision*, *CQI collision Sinc* y el COT del AP interferente que transmite en DL.

A continuación, se analiza la distribución *CQI collision* y el COT cuando el tráfico del AP interferente se realiza en DL y UL simultáneamente.

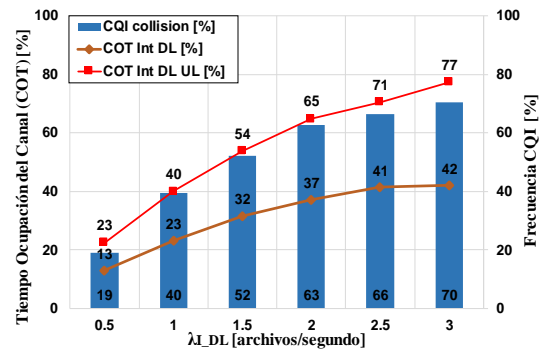
La Fig. 3.19 ilustra la distribución de CQI reportados por los UE_{HA_ser} en un escenario de coexistencia LAA Wi-Fi en donde existe un solo tipo de nodo en zona oculta UE_{HA_ser}, pero, a diferencia de la Fig. 3.18, en esta oportunidad el AP Wi-Fi transmite en DL y UL

3.3 Análisis de Métricas LTE para la Detección de Nodos Ocultos

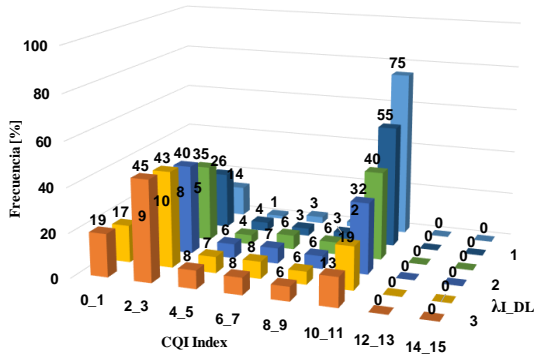
sobre el mismo canal tal como se representa en la Fig. 3.9 a). La relación entre tráfico interferente en DL y tráfico interferente en UL para el AP tiene una relación 2 a 1.



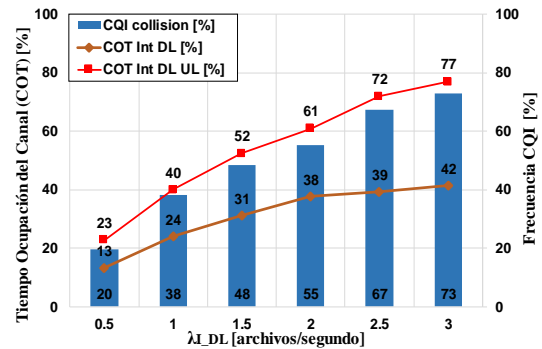
a) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) y un $\lambda_S=0,5$. AP transmite en DL y UL.



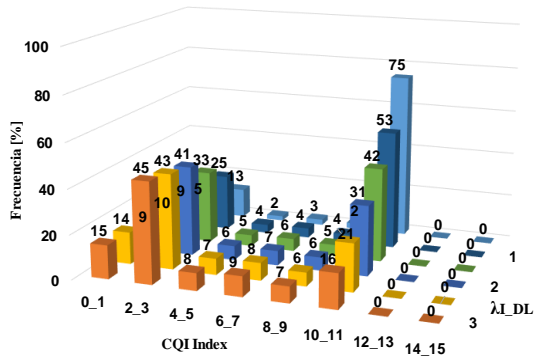
b) *CQI collision* reportado por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) con un $\lambda_S=0,5$ y COT del AP interferente que transmite en DL y UL.



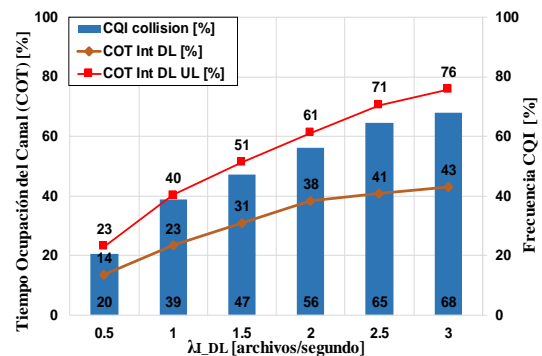
c) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) y un $\lambda_S=1,5$. AP transmite en DL y UL.



d) *CQI collision* reportado por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) con un $\lambda_S=1,5$ y COT del AP interferente que transmite en DL y UL.



e) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) y un $\lambda_S=2,5$. AP transmite en DL y UL.



f) *CQI collision* reportado por el UE_{HA ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) con un $\lambda_S=2,5$ y COT del AP interferente que transmite en DL y UL.

Figura 3.19: Distribución de CQI escenario LAA Wi-Fi con un solo tipo de nodo oculto (UE_{HA ser}) y los diagramas de barras de la distribución *CQI collision* y el COT del AP interferente que transmite en DL y UL.

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

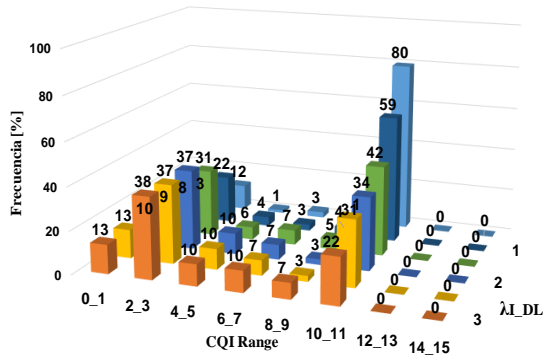
El nodo $UE_{HA\ ser}$ permanece en la posición B en el interior de la zona oculta, lo que corresponde con un canal con niveles medios de cobertura del eNB servidor y niveles medios de interferencia del AP interferente. Al igual que los casos anteriores, se realiza una comparación entre la frecuencia de la distribución *CQI collision* con el valor de COT que se genera en el AP, debido a que el AP transmite en DL y UL. Para una mejor visualización de resultados, el COT del AP es dividido en dos: i) el COT correspondiente a las transmisiones en DL (COT Int DL) y ii) el COT total del AP, el cual suma las contribuciones del COT en DL más el COT en UL (COT Int DL UL).

Las Fig. 3.19 a), c) y e) muestran las distribuciones de CQI, las cuales siguen el mismo patrón bimodal propio de un nodo que está sufriendo de colisiones. Sin embargo, ahora se nota que existen valores de *CQI collision* para los rangos [0,1], [2,3] la cual tiene la mayor frecuencia, y [4, 5]. Esto se debe a las transmisiones en UL por parte de cada STA ubicada en el interior de la celda Wi-Fi. Las transmisiones en UL provocan que cada STA pasa a ser un potencial nodo oculto para el eNB servidor y su efecto se nota en las distribuciones de *CQI collision* en los rangos [0, 1] y [4, 5]. El rango de *CQI collision* [2, 3] tiene la mayor frecuencia debido a que estas colisiones corresponden a la transmisión en DL por parte del AP.

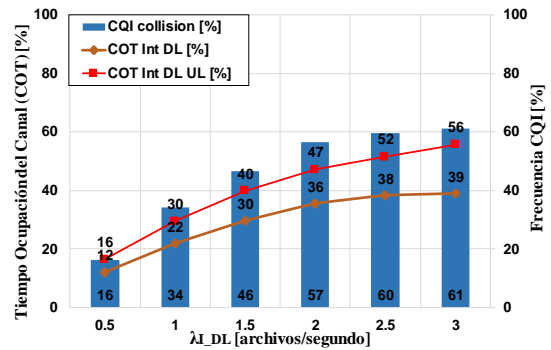
Separando los valores de la distribución *CQI collision* de las Fig. 3.19 a), c) y e) y mostrándolas en las Fig. 3.19 b), d) y f), respectivamente, se nota que la correlación entre la distribución de *CQI collision* representada por el diagrama de barras con la COT total del nodo interferente representada por la línea continua roja se mantiene; es decir, la COT del AP interferente que corresponde a la suma de los tiempos asociados con la transmisión en DL más la suma de los tiempos asociados con las transmisiones en UL de cada STA se correlacionan con el valor de la frecuencia de *CQI collision*. Esta correlación es representada para tres diferentes casos de tráfico en la celda servidora, tales como: Fig. 3.19 a) con un $\lambda_S=0,5$ archivos/segundo, Fig. 3.19 c) con un $\lambda_S=1,5$ y Fig. 3.19 e) con un $\lambda_S=2,5$, observando que prácticamente la *CQI collision* se mantiene constante a pesar del incremento en el tráfico del eNB servidor, tal como ocurrió en la Fig. 3.18, indicando que la *CQI collision* depende del tráfico interferente y no del tráfico de la celda servidora. Estos resultados son extrapolables para las posiciones A y C del $UE_{HA\ ser}$ en el interior de la zona oculta.

La Fig. 3.20 muestra la distribución de los CQI reportados por los $UE_{HA\ ser}$ en un escenario de coexistencia LAA Wi-Fi en donde existen dos tipos de nodos en zona oculta ($UE_{HA\ ser}$ y $STA_{HA\ int}$), ambos ubicados en la posición B, lo que permite tener un canal con niveles de cobertura e interferencia medias para cada nodo en relación a su respectivo nodo servidor e interferente. Así también, esta figura presenta la relación que se desarrolla entre la distribución *CQI collision* y el COT del AP, en donde el AP transmite datos en DL (COT Int DL) y transmite datos en UL (COT Int UL) en una proporción 2 a 1.

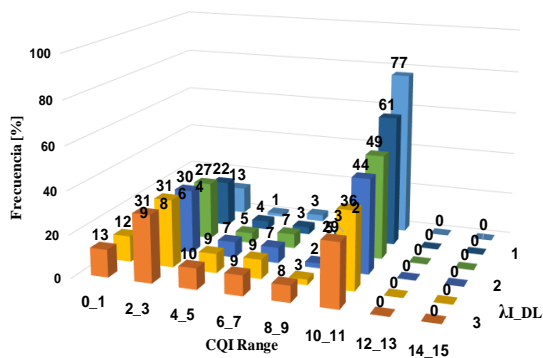
3.3 Análisis de Métricas LTE para la Detección de Nodos Ocultos



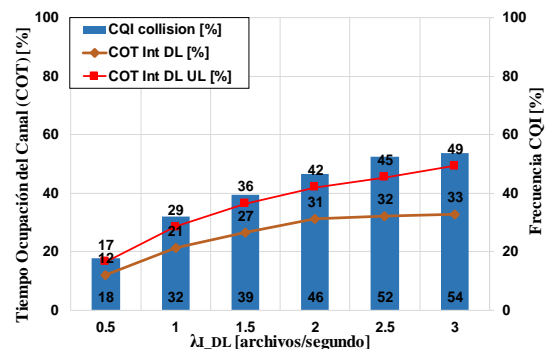
a) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA_ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) y un $\lambda_S=0,5$. AP transmite en DL y UL. Dos tipos de nodos ocultos (UE_{HA_ser} y STA_{HA_int})



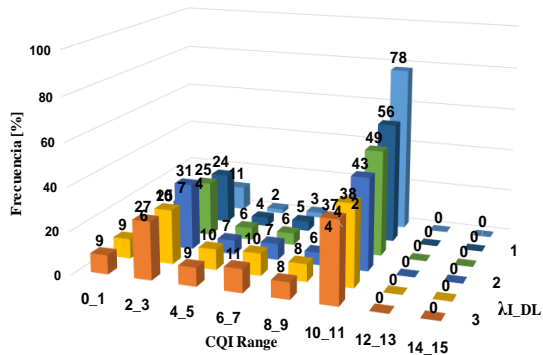
b) *CQI collision* reportado por el UE_{HA_ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) con un $\lambda_S=0,5$ y COT del AP interferente que transmite en DL y UL.



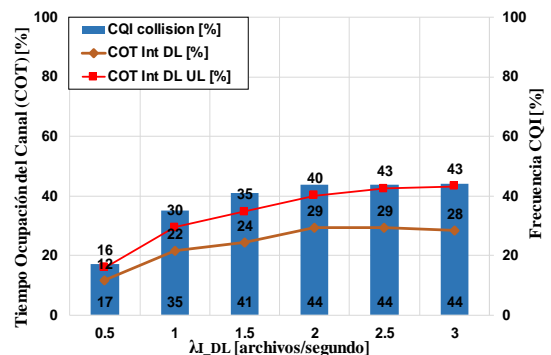
c) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA_ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) y un $\lambda_S=1,5$. AP transmite en DL y UL. Dos tipos de nodos ocultos (UE_{HA_ser} y STA_{HA_int})



d) *CQI collision* reportado por el UE_{HA_ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) con un $\lambda_S=1,5$ y COT del AP interferente que transmite en DL y UL



e) Distribución de CQI reportados por el UE_{HA_ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) y un $\lambda_S=2,5$. AP transmite en DL y UL. Dos tipos de nodos ocultos (UE_{HA_ser} y STA_{HA_int})



f) *CQI collision* reportado por el UE_{HA_ser}, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) con un $\lambda_S=2,5$ y COT del AP interferente que transmite en DL y UL

Figura 3.20: Distribución de CQI escenario LAA Wi-Fi con dos tipos de nodo oculto (UE_{HA_ser} y STA_{HA_int}) y los diagramas de barras de la distribución *CQI collision* y el COT del AP interferente que transmite en DL y UL.

Las Fig. 3.20 a), c) y e) presentan las distribuciones de CQI con el patrón bimodal y, al igual que las Fig. 3.19 a), c) y e), se aprecia que existen valores de *CQI collision* para los rangos [0,1], [2,3] la cual tiene la mayor frecuencia, y [4, 5]. Esto se debe a la presencia de STA transmitiendo en UL y ubicadas en diferentes posiciones en el interior de la celda

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

Wi-Fi, lo que convierte a cada STA en un potencial nodo oculto para el eNB. Al separar los valores de *CQI collision* de las Fig. 3.20 a), c) y e) y mostrándolas en las Fig. 3.20 b), d) y f), respectivamente, se nota que la correlación entre *CQI collision* y COT del AP se mantiene para diferentes valores de tráfico interferente (λ_{I_DL}). El COT del AP es la suma del tiempo usado en las transmisiones DL más la suma de los tiempos de las transmisiones en UL denominado como COT Int DL UL. Cabe notar que el valor de las frecuencias de la distribución *CQI collision* disminuye cada vez que el tráfico del eNB servidor se incrementa, tal como se representa en la Fig. 3.20 a) con un $\lambda_S=0,5$ archivos/segundo, Fig. 3.20 c) con un $\lambda_S=1,5$ archivos/segundo y Fig. 3.20 e) con un $\lambda_S=2,5$ archivos/segundo. Este fenómeno también está representado en la Fig. 3.15 d), e) y f). Esta disminución en la frecuencia de la distribución *CQI collision* se debe a la presencia del nodo $STA_{HA\ int}$ en zona oculta, el cual recibe las colisiones generadas por la transmisión del eNB, lo que genera errores en recepción de la $STA_{HA\ int}$. Por tal motivo la STA no envía los mensajes de ACK a su AP, el cual a su vez activa el procedimiento de *backoff* aumentando el tamaño de la CW. En resumen, el AP ocupa menor tiempo el canal cada vez que el tráfico de eNB servidor se incrementa debido a su sensibilidad en el incremento de su CW cada vez que una colisión es percibida. Esto se ve reflejado en el descenso de la frecuencia de *CQI collision* cada vez que se incrementa λ_S .

Valoración final

De los análisis efectuados en condiciones de movilidad estática y condiciones ideales de canal (en ausencia de pérdidas Rayleigh) se observa cómo la distribución CQI reportados por el $UE_{HA\ ser}$ tiene dos modos bien definidos. Específicamente, en los escenarios evaluados, en el primer modo, que denominamos *CQI freecollision*, los CQI se ubican en la parte superior de la distribución en un rango de [6, 15], que no son afectados por las colisiones y cuyos resultados dependen específicamente de las condiciones del canal. En el otro modo, que hemos llamado *CQI collision*, los CQI se ubican en la parte inferior de la distribución en un rango de [0, 5] y están asociados con colisiones. En relación con *CQI freecollision*, los CQI se ubicarán en función de cuán cerca o lejos se encuentra el UE en comparación a su nodo servidor. Es decir, si el UE está cerca de su nodo servidor, se espera que los CQI tengan índices entre [14, 15], mientras que si el UE está lejos de su nodo servidor (pero sin ser afectado por colisiones), estos CQI toman valores entre [6, 7], tal como lo indican las Fig. 3.14 y 3.15. Estos resultados son equivalentes a los mostrados en la Fig. 3.16: aquí el UE no está en zona oculta y los valores de CQI dependen exclusivamente de las condiciones del canal y sus distribuciones de CQI siguen el mismo patrón que tiene *CQI freecollision*.

El porcentaje de *CQI collision* nos da una idea de la severidad de la interferencia ya que, dependiendo de la ubicación del $UE_{HA\ ser}$ (más cerca o lejos de la fuente de interferencia), es posible apreciar que el CQI se ubica en ciertos valores específicos dentro del rango asociados a *CQI collision* tales como: si el $UE_{HA\ ser}$ está cerca de la fuente de interferencia, los *CQI collision* tienen unos índices en el rango de [0, 1], mientras que si el $UE_{HA\ ser}$ está cerca de su nodo servidor pero aún dentro de la zona oculta, sus índices están

en el rango de [4, 5]. Así también, el valor de la frecuencia de los *CQI collision* nos permite estimar la carga de tráfico de la celda interferente ya que, como se observa en las Fig. 3.14, 3.15, 3.17, 3.18, 3.19 y 3.20, el valor del porcentaje de *CQI collision* se incrementa conforme aumenta el tráfico de la carga interferente, observando este comportamiento para escenarios de coexistencia LAA LAA y LAA Wi-Fi. En este último, el AP transmitió en DL o simultáneamente en DL y UL.

El porcentaje de los *CQI collision* se incrementa cuando aparece un nodo oculto que pertenece a una celda interferente eNB, mientras que en forma contraria el porcentaje de *CQI collision* se reduce cuando aparece una STA asociada a la celda interferente en un escenario de coexistencia LAA Wi-Fi. Esta variación en el porcentaje de *CQI collision* se debe a que el algoritmo de *backoff* usado por LAA es menos propenso a incrementar su CW y por tanto ocupará mayor tiempo el canal en comparación con el algoritmo de *backoff* usado por Wi-Fi, el cual está en constante uso cada vez que una STA afectada por colisiones no reporta su mensaje de ACK como respuesta a una transmisión previa de su AP. El efecto es un incremento constante en la CW del AP, de tal modo que todas las transmisiones en DL con destino a las STA tienen que lidiar con mayores tiempos de espera y el UE_{HA ser} enfrentará menos interferencia porque el AP usa menos tiempo el canal.

3.3.2.2 Canal real con movilidad de UE o STA.

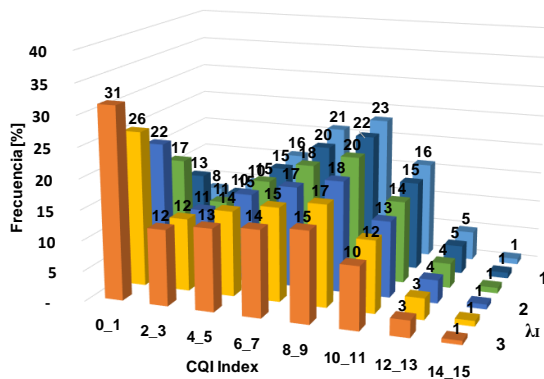
A continuación, se muestran las distribuciones CQI en el caso de un canal real con movilidad peatonal (3 Km/h) por parte de los UE para el escenario LAA LAA, tal como se muestra en la Fig. 3.1 a). Los UE o STA se movilizan dentro de áreas establecidas sin dejar de abandonar su condición de nodo ubicado en zona oculta o nodo en zona libre de contienda.

La Fig. 3.21 a), b) y c) muestra las distribuciones de los diferentes CQI que fueron reportados por los nodos de prueba UE_{HA ser} pertenecientes al eNB servidor para el escenario de LAA LAA de la Fig. 3.1 a.1), en donde la interferencia proviene de otro eNB y existe un solo grupo de nodos ubicados en zona oculta y perteneciente al eNB servidor UE_{HA ser}. De igual forma, la Fig. 3.21 d), e) y f) ilustra los CQI reportados por los UE_{HA ser} cuando en la zona oculta existen UE asociados al eNB servidor UE_{HA ser} y asociados al eNB interferente UE_{HA int}, correspondiente al escenario de la Fig. 3.1 a.2). Los análisis se realizan considerando un tráfico $\lambda_S=0,5$ archivos/segundo en el eNB servidor, mientras que el tráfico del eNB interferente varía en un rango $\lambda_I = [0,5, 3]$ archivos/segundo en incrementos de 0,5.

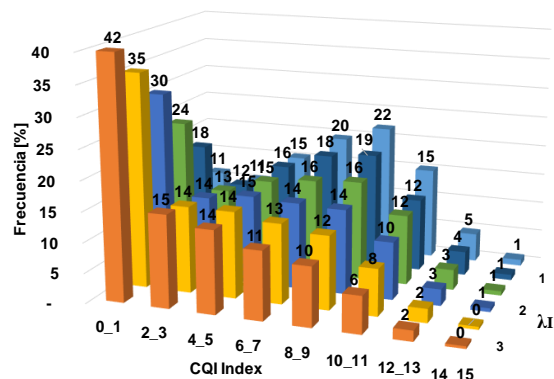
En esta oportunidad, las Fig. 3.21 a), b) y c) muestran que la distribución bimodal que estaba presente en el caso de canales ideales (Fig. 3.14), ha pasado a ser casi completamente distribuida a lo largo de todo el rango de índices CQI como resultado de la propia dispersión de los dos modos para las tres posiciones (C, B y A). Adicionalmente, es posible ver que conforme los UE_{HA ser} se alejan de su nodo servidor y se aproximan a un nodo interferente la frecuencia de CQI aumenta en el rango de *CQI collision* (0, 1, 2, 3, 4 y 5). Las Fig. 3.21

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

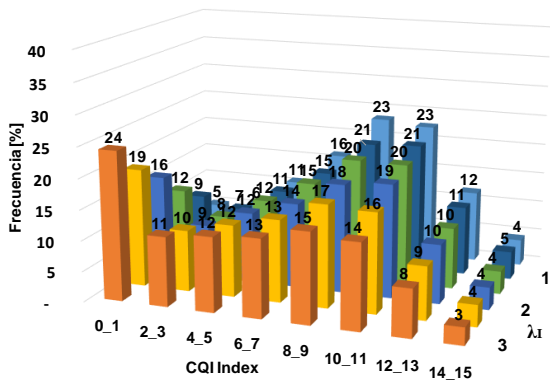
d), e) y f) tienen dos tipos de nodos ocultos: nodos en zona oculta asociados al nodo servidor ($UE_{HA\ ser}$) y nodos en zona oculta asociados al nodo interferente ($UE_{HA\ int}$).



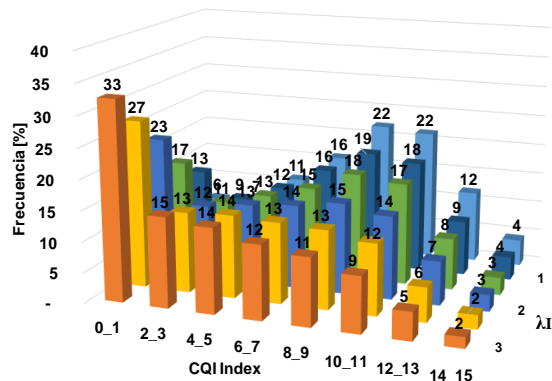
a) Distribución de CQI reportados por el $UE_{HA\ ser}$, ubicado en la Pos. C (Mala cobertura y fuerte interferencia) y un $\lambda_S=0,5$.



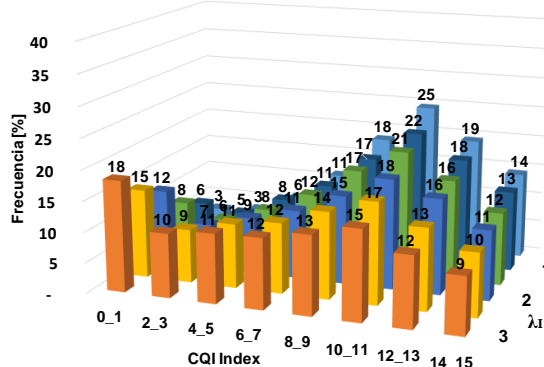
d) Distribución de CQI reportados por el $UE_{HA\ ser}$, ubicado en la Pos. C (Mala cobertura y fuerte interferencia) y un $\lambda_S=0,5$. Escenario con dos tipos de nodos ocultos $UE_{HA\ ser}$ y $UE_{HA\ int}$ (Pos. C).



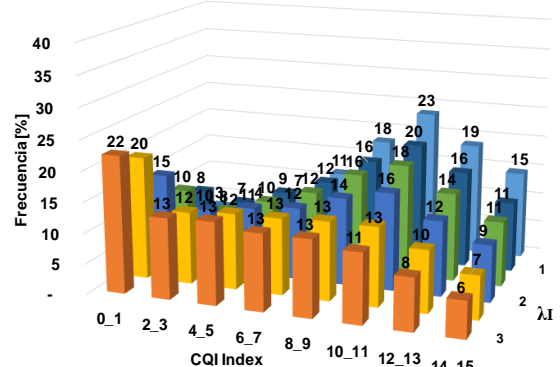
b) Distribución de CQI reportados por el $UE_{HA\ ser}$, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) y un $\lambda_S=0,5$



e) Distribución de CQI reportados por el $UE_{HA\ ser}$, ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) y un $\lambda_S=0,5$. Escenario con dos tipos de nodos ocultos $UE_{HA\ ser}$ y $UE_{HA\ int}$ (Pos. B).



c) Distribución de CQI reportados por el $UE_{HA\ ser}$, ubicado en la Pos. A (Buena cobertura y baja interferencia) y un $\lambda_S=0,5$.



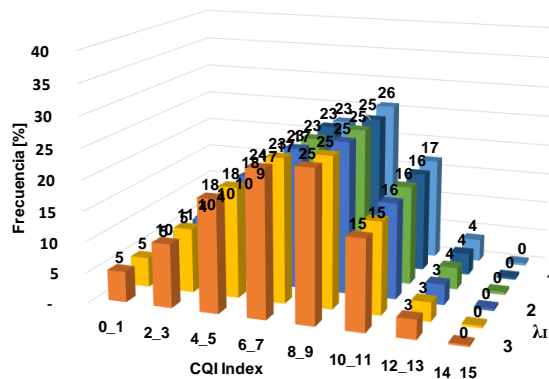
f) Distribución de CQI reportados por el $UE_{HA\ ser}$, ubicado en la Pos. A (Buena cobertura y baja interferencia) y un $\lambda_S=0,5$. Escenario con dos tipos de nodos ocultos $UE_{HA\ ser}$ y $UE_{HA\ int}$ (Pos. A)

Figura 3.21: Distribuciones CQI reportados por $UE_{HA\ ser}$ coexistencia LAA LAA para escenario con un tipo de nodo oculto $UE_{HA\ ser}$ Fig. 3.1 a.1) y dos tipos de nodos ocultos $UE_{HA\ ser}$ y $UE_{HA\ int}$ Fig. 3.1 a.2) para un canal real.

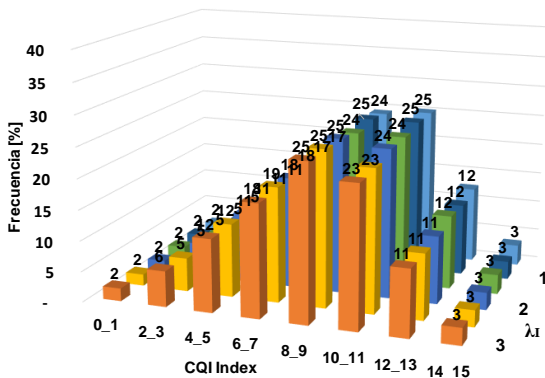
3.3 Análisis de Métricas LTE para la Detección de Nodos Ocultos

Ambos nodos ocultos ocupan simultáneamente las posiciones C, B y A en d), e) y f), respectivamente, pero mientras que el UE_{HA ser} en posición C está lejos de su servidor, el nodo UE_{HA int} en posición C está cerca de su nodo servidor, lo que se aplica también para las posiciones B y A. Las Fig. 3.21 d), e) y f) también muestran que sus CQI han sido dispersados en todo el rango de índices CQI. Además, comparando las Fig. 3.21 a) con d), b) con e) y c) con f) se puede notar que la presencia de UE_{HA int} genera un mayor número de *CQI collision* para los nodos UE_{HA ser}. Esto se debe a que el nodo en zona oculta que pertenece al eNB interferente es afectado por las colisiones provenientes del eNB servidor. Estas colisiones generan retransmisiones, las cuales, junto con un MCS adaptativo y un algoritmo de *backoff* poco propenso a incrementar su CW, hacen que el *scheduler* asigne un elevado número de PRB para cubrir las demandas asociadas con la retransmisión, de tal modo que el eNB interferente un tiempo mayor el canal. Este aumento en el COT del eNB interferente provoca el incremento en la distribución *CQI collision* que proviene de los nodos UE_{HA ser}. Estos resultados en el caso del escenario LAA LAA pueden ser extrapolados para el escenario LAA Wi-Fi, en donde también se tiene que la bimodalidad de CQI se desvanece en el contexto de un canal real.

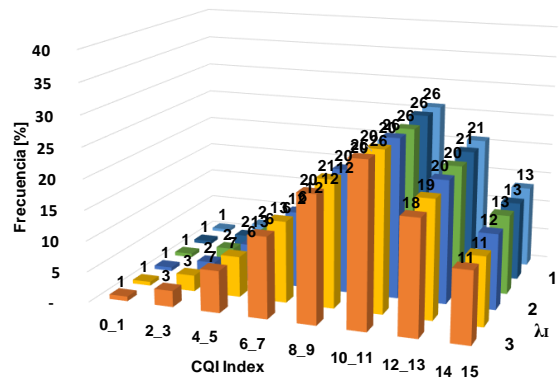
La Fig. 3.22 muestra las distribuciones de CQI por parte de los nodos de prueba UE_{GA} para la tres subáreas (A', B' y C') ubicadas en zona libre de colisión para el escenario con un solo nodo en zona oculta en coexistencia LAA LAA como lo indica la Fig. 3.1 a.1).



a) Distribución de CQI reportados por el UE_{GA ser}, ubicado en la Pos. C' (Mala cobertura) y un $\lambda_S=3$.



b) Distribución de CQI reportados por el UE_{GA ser}, ubicado en la Pos. B' (Cobertura media) y un $\lambda_S=3$.



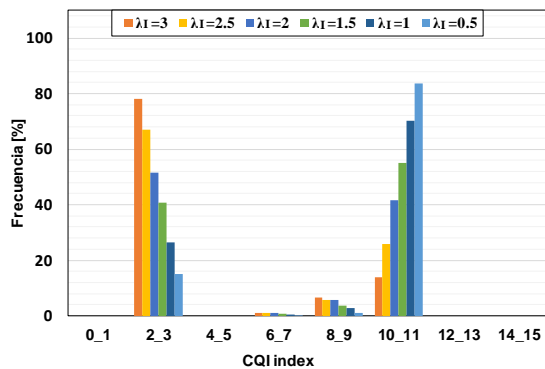
c) Distribución de CQI reportados por el UE_{GA ser}, ubicado en la Pos. A' (Buena cobertura) y un $\lambda_S=3$.

Figura 3.22: Distribuciones CQI reportados por UE_{GA ser} escenario LAA LAA canal real.

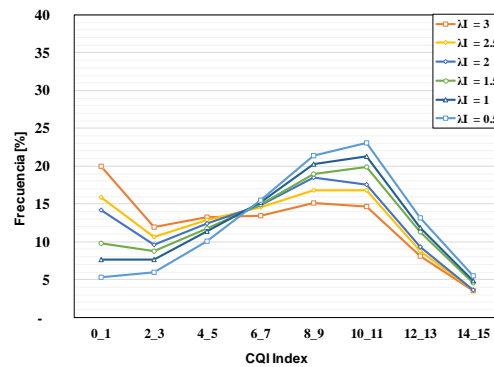
Las distribuciones aquí detalladas muestran que la unimodalidad obtenida para la distribución de CQI para los UE en zona libre de colisión para el caso de canales ideales ilustrado en la Fig 3.16 se ha desvanecido y ha sido sustituida por unas distribuciones que se aproximan a una distribución Rayleigh (con una desviación estándar aproximadamente igual a 4) propia del canal real. Se debe notar que, a diferencia de las distribuciones CQI de los nodos $UE_{HA\ ser}$ para el canal real, en donde la distribución se extiende por todo el rango de índices CQI, las distribuciones de los nodos $UE_{GA\ ser}$ se concentran en su mayoría en la parte superior del rango de índices CQI; es decir, en los índices (6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15), al cual se ha denominado como *CQI freecollision*.

3.3.2.3 Comparación de las distribuciones CQI canal ideal y canal real

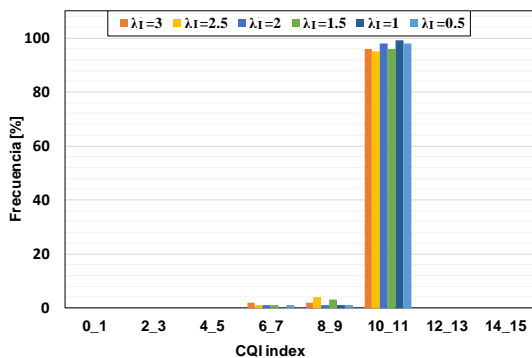
La Fig. 3.23 muestra las distribuciones CQI reportadas por los nodos de prueba ubicados en zona oculta $UE_{HA\ ser}$ y ubicados en zona libre de contienda $UE_{GA\ ser}$ para un escenario de coexistencia LAA LAA con un solo tipo de nodo en zona oculta. Se emplea una representación de la distribución de CQI en barras Fig. 3.23 a) y c) y de líneas Fig. 3.23 b) y d) para una mejor visualización de las variaciones en las distribuciones conforme cambia el tráfico interferente.



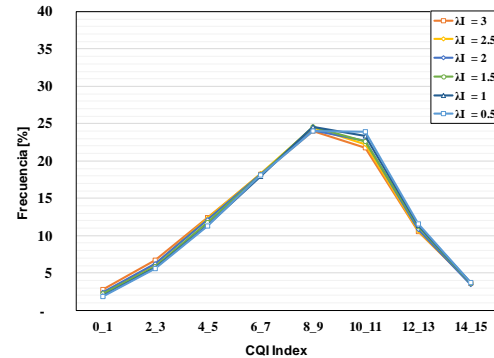
a) Distribución de CQI reportados por el $UE_{HA\ ser}$, ubicado en la Pos. B y un $\lambda_S=2$, canal ideal.



b) Distribución de CQI reportados por el $UE_{HA\ ser}$, ubicado en la Pos. B y un $\lambda_S=2$, canal real.



c) Distribución de CQI reportados por el $UE_{GA\ ser}$, ubicado en la Pos. B' y un $\lambda_S=2$, canal ideal.



d) Distribución de CQI reportados por el $UE_{GA\ ser}$, ubicado en la Pos. B' y un $\lambda_S=2$, canal real.

Figura 3.23: Distribuciones CQI reportados por $UE_{HA\ ser}$ y $UE_{GA\ ser}$ coexistencia LAA LAA para escenario con un tipo de nodo oculto (Fig. 3.1 a.1)) canal ideal y canal real.

Las Fig. 3.23 a) y c) muestran, respectivamente, la distribución CQI obtenida desde los $UE_{HA\ ser}$ y $UE_{GA\ ser}$ en un escenario de coexistencia LAA LAA para un canal ideal (movilidad y multitrayectoria no son considerados), con un tráfico constante de nodo servidor eNB $\lambda_S=2$ archivos/segundo y con un tráfico interferente que varía en el rango $\lambda_I=[0,5, 3]$ archivos/segundo. Para el caso de los nodos ubicados en zona oculta Fig. 3.23 a) se observa una distribución bimodal, con valores en los índices asociados a *CQI collision* (valores bajos de MCS) y *CQI freecollision* (valores altos de MCS). El esquema de MCS aumenta conforme el $UE_{HA\ ser}$ percibe menor cantidad de CQI asociados a *CQI collision*; es decir, conforme el tráfico λ_I disminuye y por ende también se reduce la probabilidad de colisiones. En cambio, la distribución para los $UE_{GA\ ser}$ tiene una distribución monomodal que debido a la ausencia de interferencia depende exclusivamente del canal y se ubica en los índices asociados a *CQI freecollision*.

Las Fig. 3.23 b) y d) ilustran la distribución CQI de los $UE_{HA\ ser}$ y $UE_{GA\ ser}$ respectivamente, cuando un canal más problemático (con movilidad de los UE y desvanecimientos Rayleigh) reemplaza al canal denominado ideal. La Fig. 3.23 b) muestra la que a priori era una distribución bimodal de CQI para los $UE_{HA\ ser}$ en el caso de un canal ideal, se ha diseminado sobre todo el rango de índices CQI en el caso del canal real. También se aprecia que la distribución *CQI collision* aumenta conforme lo hace el tráfico λ_I sobre todo el conjunto de índices asociados a esta distribución [0, 5] y en forma equivalente la distribución *CQI freecollision* disminuye conforme el tráfico interferente aumenta para todo el rango de índices [6, 15]. De igual manera, la Fig. 3.23 d) muestra que la distribución monomodal para los $UE_{GA\ ser}$ del canal ideal se dispersa en todos los índices CQI al considerar el canal real, alcanzando valores en el rango de *CQI collision* que dan la idea de falsas colisiones. A pesar de esto, hay que notar que el valor máximo de frecuencia y la mayor parte de la distribución se concentran en el rango de índices asociado a *CQI freecollision*. Es por este motivo que el CQI por sí solo no es suficiente en la detección de la presencia de nodos ocultos; a pesar de ello, los conocimientos adquiridos en relación a la métrica CQI son útiles y serán empleados en el próximo capítulo en el desarrollo de algoritmos para la detección de UE afectados por la presencia de nodos ocultos.

3.4 Conclusiones

En este capítulo se han evaluado las afectaciones que la presencia de terminales ocultos ejerce sobre las redes LAA y Wi-Fi en coexistencia y se ha hecho una breve introducción de potenciales métricas presentes en el estándar de LTE útiles para la detección de UE afectados por interferencias, enfocándose por el momento en la distribución estadística de la variable CQI, que genera una distribución bimodal debido a los dos estados que el UE ubicado en zona oculta enfrenta (colisión y libre de colisión). Para una mejor generalización de resultados, se inicia la evaluación con escenarios que consideran un canal

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

ideal y se concluye con escenarios con canales más complejos. Los resultados mostrados en este capítulo nos permiten extraer las siguientes conclusiones:

En redes LAA, la tasa de satisfacción de los UE_{HA} varía en función de la potencia de la señal interferente y de la intensidad de la carga de tráfico del nodo interferente, lo que se relaciona con su COT; es decir, si se asume que el nodo interferente ocupa el canal un cierto periodo de tiempo (COT), el efecto sobre la tasa de satisfacción del UE_{HA} y del resto de UE de la celda es distinta dependiendo de si el UE_{HA} se encuentra más cerca o lejos de la fuente interferente. Los UE_{HA} que están más cerca de la fuente interferente consumen una mayor cantidad de recursos radio, como consecuencia de una baja eficiencia espectral para la transmisión de una determinada cantidad de información. En cambio, si los UE_{HA} están afectados por igual COT del nodo interferente, pero se encuentran más cerca de su nodo servidor, su tasa de satisfacción es mejor, ya que consumen una menor cantidad de recursos radio debido a una mejor eficiencia espectral para igual cantidad de información a transmitir. El efecto que los UE_{HA} ubicados cerca de una fuente interferente y con elevadas cargas de tráfico servidor pueden generar sobre los PRB disponibles en la celda servidora puede ser tal que es posible afectar la tasa de satisfacción de los nodos ubicados en zonas libre de colisión UE_{GA} pertenecientes a la misma celda. Por este motivo, es importante la detección de UE afectados por la presencia de nodos ocultos y en especial de aquellos que ven severamente afectado su servicio para corregir el monopolio de recursos radio que estos nodos podrían incurrir en detrimento de otros UE ubicados en la misma celda. Así también, se ha visto que la presencia de nodos en zona oculta, que pertenecen a celdas distintas, provocan un efecto en cascada que genera una mayor ocupación del canal por parte del nodo servidor y del nodo interferente en escenarios de coexistencia LAA LAA en comparación a si una de las celdas contiguas no tuviese nodos en zona oculta. Esto se debe a las características particulares de asignación de recursos por parte del *scheduler* en LTE y al procedimiento de *backoff* por parte de LBT, que incentivan una transmisión constante y agresiva a pesar de las malas condiciones o intensa interferencia que el canal puede presentar.

En un escenario de coexistencia LAA Wi-Fi y considerando los criterios de equidad, LAA presenta un comportamiento más robusto en comparación a su contraparte Wi-Fi a pesar de las similitudes que existen entre sus métodos de acceso LBT y CSMA/CA. En LTE el procedimiento de *backoff* se activa si se supera un umbral de 80% de NACK para una subtrama de referencia, mientras que en Wi-Fi el procedimiento de *backoff* se activa cada vez que exista una ausencia de respuesta ACK. Estas diferencias provocan que en promedio la ventana de contienda CW de LAA crezca en una proporción menor en comparación que la CW de Wi-Fi para similares condiciones de tráfico interferente. Esta situación conduce a que LAA es más propenso a ocupar mayor tiempo el canal a diferencia de 802.11n para similares condiciones de interferencia, lo que provoca una inequidad en el uso del espectro radioeléctrico en beneficio de LAA.

En un escenario de coexistencia LAA Wi-Fi, un AP Wi-Fi detecta mayor número de colisiones en relación a LAA para escenarios equivalentes. Esto se debe a las diferencias

de los métodos de detección de colisiones entre la tecnología Wi-Fi y LBT, tal como se indica en el párrafo anterior. Este fenómeno provoca que la ventana de *backoff* de Wi-Fi aumenta su tamaño cada vez que se detecta una nueva colisión, lo que en escenarios con STA en zona oculta induce a que el AP permanezca largos periodos de tiempo en silencio en función de la intensidad del tráfico interferente, lo que favorece a cualquier otra tecnología que comparta el espectro con Wi-Fi, ya que al no existir transmisiones del AP en DL el canal será aprovechado por la tecnología con la que comparte el medio, que en este caso es LAA. Debido a que las transmisiones en UL para Wi-Fi se realizan en el mismo canal que las transmisiones en DL, cada STA puede convertirse en un potencial nodo oculto y la severidad de la interferencia estará en función de la distancia entre la STA con el UE_{HA} y el COT de la STA que transmite en UL. Sólo aquellas STA ubicadas en zona oculta estarán dentro del rango de sensado del eNB y no serán un potencial nodo oculto.

Para escenarios estáticos *indoor* con condiciones de canal ideal (no se considera las pérdidas multitrayectoria ni movilidad) la distribución de CQI reportados por nodos UE_{HA} presenta una distribución bimodal, lo cual es un indicativo de que estos nodos son afectados por interferencias que provienen de terminales ocultos. En líneas generales, se aprecia que el rango de CQI ubicados en la parte baja del diagrama de distribución de frecuencias (índices 0, 1, 2, 3, 4 y 5) se asocian con colisiones, y el valor de su frecuencia nos da una estimación de la intensidad de la carga de tráfico generada por el nodo interferente. Por otro lado, los valores de CQI ubicados en la parte alta de la distribución (índices 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15) se asocian a las transmisiones que estuvieron libres de interferencias, donde el valor de frecuencia depende exclusivamente de las condiciones del canal. Además, la distancia entre los valores medios de los dos modos *CQI collision* y *CQI freecollision* se relaciona con la diferencia de potencia de los nodos servidor e interferente desde el punto de vista del UE_{HA}. En los escenarios simulados si el UE_{HA} está cerca de la fuente interferente, la distribución *CQI collision* concentra sus índices CQI en torno a valores de (0 y 1). En cambio, si el UE_{HA} está lejos de la fuente de interferencia, la distribución *CQI collision* tendrá índices en torno a valores de (4 y 5). Algo similar ocurre con los valores reportados por los UE_{GA}, en donde los valores de CQI reportados se asocian a la distribución *CQI freecollision* y su valor de índice medio varía conforme a la potencia media de la señal servidora recibida; es decir, si el UE_{GA} está cerca del nodo servidor, el valor de los índices de la distribución *CQI freecollision* se ubicará en valores en torno a (14 y 15), mientras que si el UE_{GA} se ubica en los límites de la cobertura del nodo servidor, sus valores de índice *CQI freecollision* se ubicarán en torno a (6 y 7). El carácter bimodal de la distribución de los CQI de los UE_{HA} determina su presencia en zona oculta, pero además los valores medios de cada modo nos dan una idea de la posición de los UE en la zona libre de colisión y en la zona oculta.

Los resultados obtenidos para el canal ideal pueden hacer pensar que la identificación de un comportamiento bimodal del CQI puede ser suficiente para la detección de UE afectados por nodo oculto. Sin embargo, en un análisis más riguroso se observa que al contemplar un canal más problemático con movilidad de usuarios, la distribución bimodal obtenida en escenarios con un canal ideal y estático se diluye y ahora la distribución de

CAPÍTULO 3: PROBLEMA DEL NODO OCULTO EN REDES LTE DESPLEGADAS EN BANDA SIN LICENCIA

CQI que proviene de los UE_{HA} se dispersa a lo largo de todos los índices CQI como resultado de la propia dispersión de los dos modos identificados en el caso ideal. Estos resultados muestran que el CQI por sí solo no es suficiente para su aplicación en algoritmos de detección de nodos ocultos. Sin embargo, este acercamiento con la métrica CQI permite buscar una nueva interpretación a esta variable que será presentada en el siguiente capítulo y que en conjunto con el uso de otras métricas permitirán el desarrollo de algoritmos de detección de nodos ocultos más robustos.

Capítulo 4

DetECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

En el capítulo anterior se analizaron los efectos que la presencia de nodos ocultos puede ejercer sobre los UE ubicados en la zona oculta y sobre la red del nodo servidor. Este primer análisis muestra que el terminal oculto tiene un efecto sobre la red LAA que no puede ser despreciado, llegando incluso a afectar el desempeño de toda la red. De igual manera, se estudiaron los efectos que las interferencias y el canal de comunicaciones ejercen sobre las métricas CQI reportados por los dispositivos ubicados en zona oculta y dispositivos ubicados en zona libres de contienda para una red LAA. Del análisis de estos resultados, se observa que el CQI refleja con buena precisión cuándo un UE es afectado por malas condiciones del canal y cuándo el UE es afectado por interferencias provenientes de nodos ocultos en un canal ideal. Sin embargo, estos resultados tienen un alcance limitado, ya que cuando las condiciones de movilidad o del canal cambian y se comportan de la manera que hemos definido como un canal real los resultados de las distribuciones CQI cambian, haciendo que el CQI por sí solo no sea un buen indicador de la presencia de nodos ocultos. Por tal motivo, la combinación de varias métricas para determinar la probabilidad de colisión es una solución atractiva en especial en ambientes dinámicos en donde, debido a las condiciones complejas y variables del canal, se generan escenarios en los cuales los diferentes conjuntos de mediciones pueden encontrarse incompletos o con algún tipo de error. De este modo, la combinación de varias métricas reducirá la probabilidad de error en la detección de colisión.

En este capítulo se profundiza el estudio de la métrica CQI en escenarios con canales reales, permitiendo identificar una nueva variable basada en esta métrica. Así también, se exploran las otras variables descritas en el capítulo anterior y que forman parte de los reportes periódicos del UE y se estudia cómo estas métricas varían considerando un canal de comunicaciones agresivo (denominado canal real). Los resultados obtenidos permiten determinar patrones que están relacionados directamente con las interferencias (colisiones), los cuales permiten el desarrollo de un algoritmo heurístico simple basado en comparaciones y valores de umbral que permiten discernir cuándo un conjunto de métricas en forma combinada corresponde al caso de que un UE está siendo afectado por un terminal oculto o está siendo afectado por malas condiciones del canal.

Así también, este capítulo analiza y evalúa el uso de técnicas basadas en aprendizaje automático y redes neuronales como una alternativa a soluciones heurísticas para identificar cuándo un UE que pertenece a una red LAA está siendo afectado por colisiones que provienen desde terminales ocultos. De esta manera, se emplean modelos basados en técnicas de aprendizaje supervisado para clasificar a los UE en dos posibles categorías: UE afectados por colisión y libres de colisión. Para esto se utilizan las mismas variables empleadas para la solución heurística para alimentar a diferentes algoritmos de clasificación, los cuales una vez entrenados y optimizados permiten predecir cuándo un UE está enfrentando colisiones, considerando los mismos escenarios y condiciones de simulación que fueron aplicados para la solución heurística. Finalmente, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos por la solución heurística y la solución basada en aprendizaje automático, para determinar cuál tiene la mejor eficiencia en la detección, menor complejidad computacional y menor tiempo de decisión.

Este Capítulo está organizado de la siguiente manera: la Sección 4.1 presenta un estudio de las métricas LTE usadas en el desarrollo de los algoritmos de detección de colisiones, pero evaluados en condiciones de un canal adverso denominado canal real. A continuación, en la Sección 4.2 se desarrolla un algoritmo de detección de nodos ocultos basados en métodos heurísticos, el cual considera valores umbrales y comparaciones para tomar la decisión de si el algoritmo está siendo afectado por interferencias provenientes de nodos ocultos. Seguidamente, en la Sección 4.3 se analizan varios clasificadores basados en algoritmos de aprendizaje automático y redes neuronales, los cuales clasifican al UE en afectado por colisiones o libre de colisiones. Ambas soluciones, heurística y aprendizaje automático se basan en las métricas LTE analizadas anteriormente. La Sección 4.4 analiza los resultados obtenidos por cada clasificador y los compara evaluando diferentes métricas con el fin de seleccionar el mejor clasificador en función de ciertos criterios de evaluación. Finalmente, la Sección 4.5 presenta las conclusiones correspondientes a este Capítulo. Los resultados de estas contribuciones han sido publicados en [109], [110].

4.1 Análisis de Métricas LTE en un Canal con Multitrayectoria

Tal como se ha descrito en líneas previas, y considerando los resultados obtenidos para la distribución CQI en un escenario afectado por desvanecimientos lognormales y rápidos (Rayleigh) debido a la movilidad de los UE/STA, la distribución CQI presenta una distribución que cambia en función del tipo de canal utilizado en la simulación (canal ideal o real). Por este motivo, en este capítulo se presenta un análisis para diferentes métricas generadas desde el UE LAA en el contexto de un canal de comunicaciones real, considerando los mismos escenarios definidos en el capítulo anterior, manteniendo las características de tráfico, configuración de parámetros y escenarios tal como se encuentran representados en la Fig. 3.1.

La información obtenida en el contexto de un canal dinámico y complejo se emplea para desarrollar una solución basada en un algoritmo heurístico que habilite la detección de UE que están siendo afectados por nodos ocultos y a la vez permita distinguir aquellos UE que no son afectados por nodos ocultos, sino por malas condiciones del canal. Posteriormente, con los datos recolectados durante este estudio se analizará el uso potencial de estas métricas en el contexto de métodos de clasificación basados en algoritmos de aprendizaje automático también conocidos como algoritmos de ML (*Machine Learning*). Como se aprecia, es necesario contar con datos de buena calidad que permitan el desarrollo de los diferentes algoritmos propuestos, en el caso del presente estudio las métricas analizadas son:

- La distribución CQI.
- RSRP, RSRQ, RSSI y número de PRB.

4.1.1 Distribución CQI

En el capítulo anterior se presentó el uso potencial de la distribución estadística de los índices CQI reportados por los UE para determinar si el dispositivo móvil está afectado por colisiones que pueden originarse por interferencias de nodos ocultos eNB o AP/STAWi-Fi, considerando tanto un canal ideal como un canal real. Así también, se analizó la relación que se desarrolla entre la carga de tráfico del nodo interferente con la distribución CQI del UE ubicado al interior de la zona oculta, considerando un canal ideal. En esta oportunidad se va a determinar si las relaciones estadísticas obtenidas entre la distribución *CQI collision* y el COT del nodo interferente se mantienen cuando el canal de comunicaciones presenta condiciones más adversas, como es el caso de un canal con desvanecimientos multitrayectoria y movilidad de dispositivos.

4.1 Análisis de Métricas LTE en un Canal con Multitrayectoria

Se recuerda que el UE genera CQI periódicos, los cuales corresponden a un valor representativo del estado del canal que es calculado sobre todos los PRB en uso durante la transmisión de 1 TTI (método *wideband*). El valor reportado de índice CQI varía desde un valor 0 hasta 15, donde 0 representa fuera de rango y 15 las mejores condiciones del canal. En el contexto de LAA, los CQI se obtienen de forma periódica cada vez que una señal DRS o datos de usuario son transmitidos por el eNB servidor. Esto implica que durante los periodos de silencio los CQI no pueden ser calculados. Todos los UE calculan su correspondiente valor de CQI sin importar si los datos transmitidos por el nodo servidor fueron o no dirigidos a un dispositivo móvil en particular.

De los resultados obtenidos para la distribución CQI para el caso de un canal ideal, se observó que un UE ubicado en zona oculta genera una distribución bimodal, en donde el conjunto de CQI ubicados en la parte baja del diagrama de distribución de frecuencias $CQI = [0, 5]$ representa a las colisiones (*CQI collision*) y el conjunto de CQI ubicado en la parte superior del diagrama de distribución $CQI = [6, 15]$ se asocian a las transmisiones libres de interferencias (*CQI freecollision*). Al momento que el canal tiene un comportamiento más complejo, la bimodalidad de la distribución CQI generado por los UE ubicados en zona oculta se desvanece; sin embargo, los rangos asociados con *CQI collision* y *CQI freecollision* en forma general se mantienen. De estos resultados, se puede decir que las colisiones se ven reflejadas en la parte inferior de la distribución CQI y de este modo se puede definir un histograma truncado de CQI que lo notamos como (TCQI), el cual refleja la frecuencia de las colisiones.

$$TCQI(L) = \sum_{i=0}^{i=L} NCQI(i) \quad (4.1)$$

donde, i es el valor de índice CQI (i varía de 0 a 15), $NCQI(i)$ representa el valor de frecuencia para un CQI con índice i , L constituye el límite superior máximo que está asociado con colisión/interferencia y $TCQI(L)$ es el valor de frecuencia del histograma truncado CQI.

Enfocando la atención en la distribución de CQI asociado con colisiones en un canal ideal, se aprecia que existe un límite superior bien definido, el cual está vinculado con la existencia de interferencia, siendo este límite cuando $CQI = 5$. Este resultado concuerda con los valores obtenidos en el trabajo desarrollado en [105], en donde los datos generados en este estudio y representados en la Tabla 3.3 muestran la relación existente entre CQI, SINR, MCS y eficiencia espectral de acuerdo a los parámetros establecidos en la Tabla 7.2.3-1 de la TS 36.213 [9]. Como se detalló en el capítulo anterior, el simulador seleccionado especifica que el índice CQI corresponde al esquema MCS con mayor eficiencia espectral que garantice una BLER que no exceda el 10%. La Tabla 4.1 muestra un resumen de la Tabla 3.3 para el índice $CQI=5$: aquí se aprecia que este índice tiene un rango asociado de SINR entre $0,761 \leq SINR < 2,699$ que de manera general corresponde a un canal con pésimas condiciones o con alta interferencia, de tal modo que la SINR está

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

próxima a cero. Esto permite justificar la selección de un valor de índice máximo CQI asociado con colisiones igual a 5 para el valor de $TCQI(L)$.

Tabla 4.1: Relación entre CQI, SINR, MCS y eficiencia espectral considerando un valor umbral de 10% BLER para CQI=5

CQI	SINR rango [dB]	MCS		Eficiencia espectral [bits/RE]
		Modulación	Coding Rate Aprox.	
5	$0,761 \leq \text{SINR} < 2,699$	QPSK	0,4385	0,877

En forma similar como se procedió en el capítulo anterior, este capítulo recolectará las métricas de los UE de prueba ubicados tanto en zona libre de colisión como en zona oculta y que han sido etiquetados como UE_{GA} y UE_{HA} , respectivamente.

Los resultados representados en las Fig. 3.21, 3.22 y 3.23 del capítulo anterior muestran que la distribución de CQI por sí sola no es suficiente para identificar la presencia de nodos ocultos cuando las condiciones del canal no son ideales, ya que la distribución bimodal de la CQI generada por los UE_{HA} propia de un canal ideal se desvanece bajo las nuevas condiciones del canal. Sin embargo, es posible obtener información adicional mediante el empleo de la variable $TCQI$; por este motivo, se va a proceder a comparar los resultados que se obtienen para $TCQI(L)$ asociado con cada nodo de prueba UE_{HA} y UE_{GA} para el caso de canales reales, considerando que $L=5$, lo que equivale a obtener la sumatoria de los valores de frecuencia de la variable CQI en el intervalo $CQI=[0, 5]$ que anteriormente se describió como *CQI collision*.

La Fig. 4.1 muestra los porcentajes alcanzados por la variable $TCQI(5)$ que se obtienen de los nodos UE_{GA} ubicados en la zona libre de colisión, subáreas A', B' y C', para un tráfico servidor $\lambda_S=2$ y varios tráficos interferentes $\lambda_I=[0,5; 3,0]$ archivos/segundo para un escenario de coexistencia LAA LAA como se detalla en la Fig. 3.1 a.1). Debido a que los UE_{GA} se encuentran en zona libre de colisión, la señal recibida por estos dispositivos móviles es afectada principalmente por el ruido térmico y las pérdidas de propagación aleatorias inherentes al canal. Para cada una de las tres posiciones (subáreas), la Fig. 4.1 muestra que la variable $TCQI$ permanece prácticamente constante para todo el rango de valores de tráfico interferente λ_I . La métrica $TCQI$ se incrementa ligeramente debido a la influencia mínima que el eNB interferente ejerce en la red. En la Fig. 4.1, la posición A' (Buena cobertura) muestra porcentajes en torno al 10%, la posición B' (Cobertura media) tiene un porcentaje de 20% y la posición C' (Mala cobertura, debido a pésimo canal) el valor de $TCQI$ está en torno al 34 %.

4.1 Análisis de Métricas LTE en un Canal con Multitrayectoria

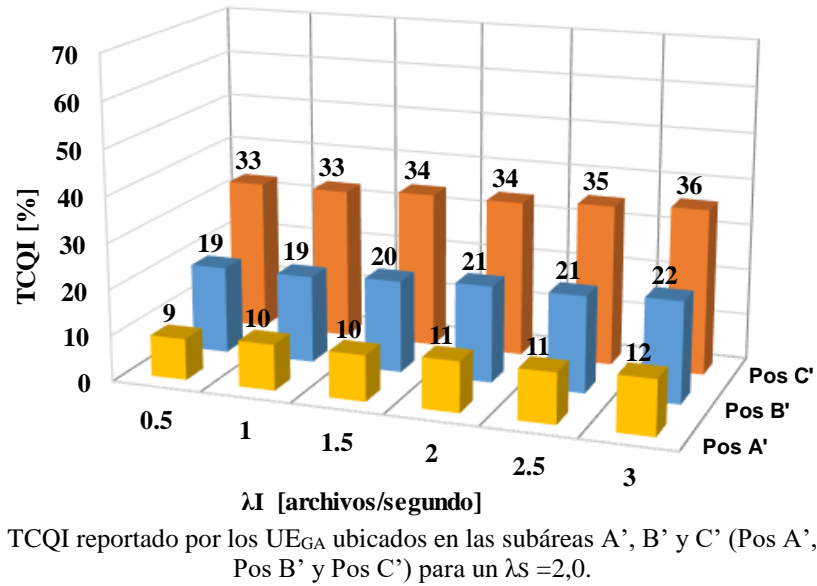


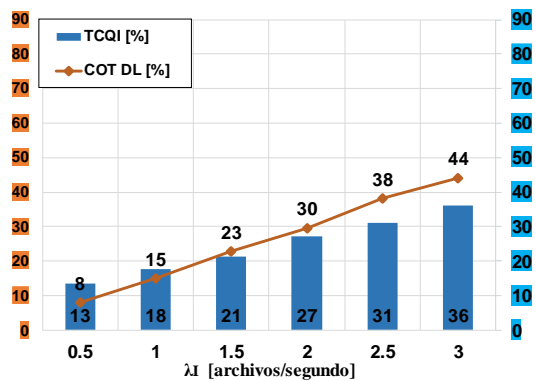
Figura 4.1: TCQI(5) para UE_{GA} canal real escenario LAA LAA

La distribución TCQI que se obtiene de los reportes generados por los UE_{GA} nos permite tener una idea acerca del estado del canal en el borde de la celda. En este escenario, valores en torno al 10% nos indica que el UE está comenzando a sentir la influencia de las malas condiciones del canal, mientras que un valor del 35% determina el límite máximo de la cobertura de la celda.

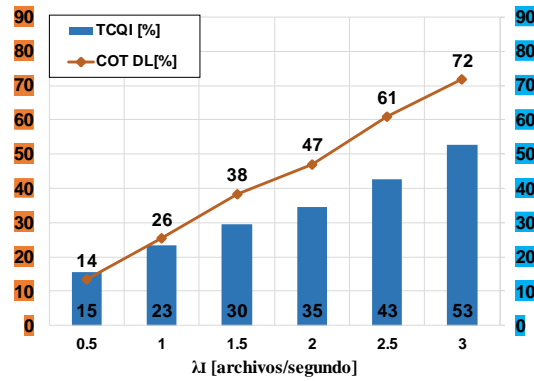
A continuación, se evalúa cómo la distribución de la variable TCQI varía para los nodos de prueba ubicados en la zona oculta. La Fig. 4.2 muestra los porcentajes que la métrica TCQI(L) con (L=5) adquiere en función de los reportes provenientes de los nodos UE_{HA} y los compara con los valores del porcentaje de COT del nodo interferente eNB para un escenario de coexistencia LAA LAA. Los resultados que se muestran en la Fig. 4.2 a), c) y e) se obtienen de las subáreas A (Buena cobertura y baja interferencia), B (Cobertura e interferencia media) y C (Mala cobertura y fuerte interferencia) respectivamente, para un tráfico $\lambda S = 2$ archivos/segundo y diferentes valores de tráfico λI , cuando el escenario tiene un tipo de nodos ocultos UE_{HA ser} en el interior de la zona oculta como se detalla en la Fig. 3.1 a.1) bajo el contexto de un canal real de comunicaciones. En todos los casos es posible observar que la distribución TCQI se correlaciona con el COT del interferente. Así mismo, al comparar las Fig. 4.2 a), c) y e) entre sí, se nota que el porcentaje de TCQI se incrementa conforme los UE_{HA} pasan de la posición A (Buena cobertura y baja interferencia) a la posición C (Mala cobertura y fuerte interferencia) a pesar que el COT DL del eNB interferente es el mismo. Este aumento en el porcentaje de TCQI se debe a las malas condiciones del canal y, al asociarlo con los resultados de la Fig. 4.1, este incremento en la TCQI para cada uno de los valores de tráfico interferente λI es prácticamente constante para cada una de las posiciones (A, B y C). Es decir, TCQI se compone de un valor asociado al tráfico interferente y otro asociado a las malas condiciones del canal: el valor de TCQI asociado al tráfico interferente es prácticamente el mismo a pesar que el UE_{HA} se aleja de su nodo servidor y se acerca a la fuente de interferencia, mientras que el valor de TCQI

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

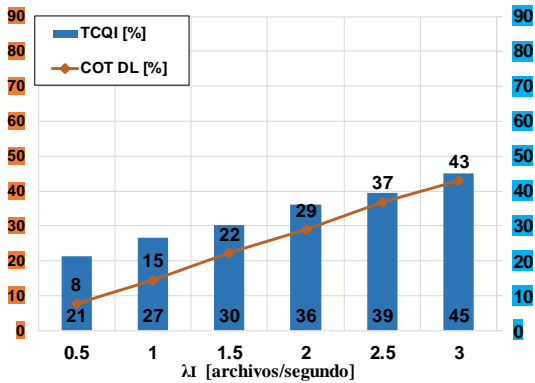
asociado a las malas condiciones del canal aumenta conforme el UE_{HA} se aleja de su eNB servidor.



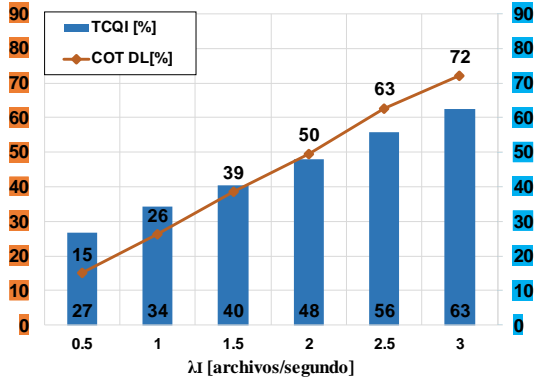
a) TCQI reportado por UE_{HA ser} ubicado en la Pos. A (Buena cobertura y baja interferencia) con un $\lambda S=2,0$. Escenario con un tipo de nodo oculto UE_{HA ser}.



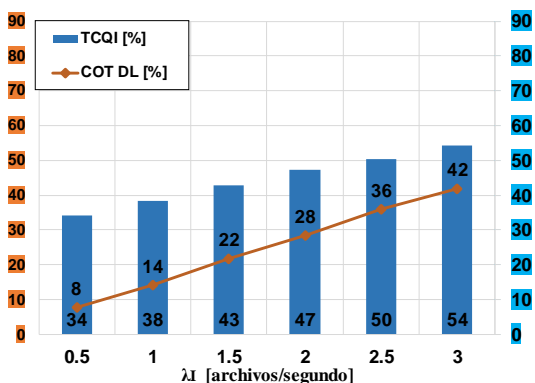
b) TCQI reportado por UE_{HA ser} ubicado en la Pos. A (Buena cobertura y baja interferencia) con un $\lambda S=2,0$. Escenario con dos tipos de nodos ocultos UE_{HA ser} y UE_{HA int}.



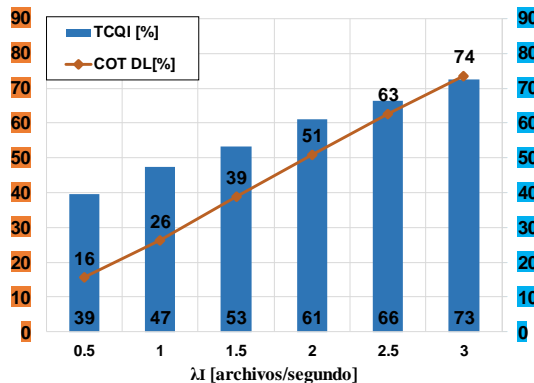
c) TCQI reportado por UE_{HA ser} ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) con un $\lambda S=2,0$. Escenario con un tipo de nodo oculto UE_{HA ser}.



d) TCQI reportado por UE_{HA ser} ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) con un $\lambda S=2,0$. Escenario con dos tipos de nodos ocultos UE_{HA ser} y UE_{HA int}.



e) TCQI reportado por UE_{HA ser} ubicado en la Pos. C (Mala cobertura y fuerte interferencia) con un $\lambda S=2,0$. Escenario con un tipo de nodo oculto UE_{HA ser}.



f) TCQI reportado por UE_{HA ser} ubicado en la Pos. C (Mala cobertura y fuerte interferencia) con un $\lambda S=2,0$. Escenario con dos tipos de nodos ocultos UE_{HA ser} y UE_{HA int}.

Figura 4.2: Distribución TCQI(5). Coexistencia LAA LAA, las figuras a), c) y e) corresponden al escenario con un tipo de nodo en zona oculta UE_{HA ser}. Para las figuras b), d) y f) corresponden al escenario con dos tipos de nodos en zona oculta UE_{HA ser} y UE_{HA int} canal real.

4.1 Análisis de Métricas LTE en un Canal con Multitrayectoria

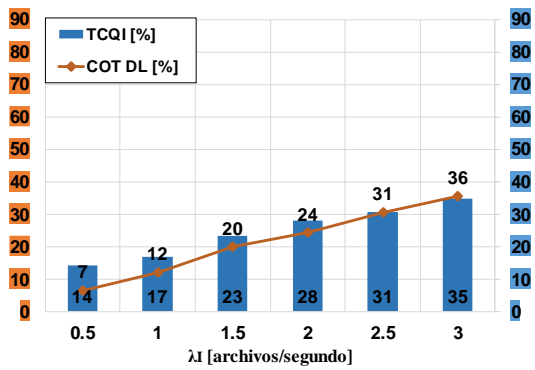
Se analiza ahora la siguiente columna en donde se ubican las Fig. 4.2 b), d) y f), que corresponden al caso cuando se tienen los dos tipos de nodos ($UE_{HA\ ser}$ y $UE_{HA\ int}$) en el interior de la zona oculta como se detalla en la Fig. 3.1 a.2). En este caso, al igual que el caso de un solo tipo de nodo oculto, la distribución TCQI se correlaciona con el COT del nodo eNB interferente. Adicionalmente, las figuras permiten apreciar que el COT del eNB interferente para las Fig. 4.2 b), d) y f) es mayor en comparación con las Fig. 4.2 a), c) y e). Esto se debe a la presencia de un segundo grupo de nodos ocultos ($UE_{HA\ int}$) que generan un mayor número de colisiones, los cuales incrementan los errores y en consecuencia se generan más retransmisiones por parte de los dos eNB. Todo esto implica un valor mayor de COT por parte de los nodos eNB interferente y servidor. Este efecto en cascada puede causar que el *scheduler* asigne una excesiva cantidad de recursos radio a los UE_{HA} en detrimento de otros UE_{GA} que pertenecen a su respectiva celda, este comportamiento es similar que el caso de canal ideal. Así también, comparando las Fig. 4.2 b), d) y f) entre sí se aprecia que el porcentaje de la métrica TCQI se incrementa conforme los nodos de prueba UE_{HA} pasan de la posición A hasta la posición C. Al igual que su contraparte Fig. 4.2 a), c) y e) este incremento se debe exclusivamente a las condiciones del canal, que empeoran conforme se aleja de su nodo servidor. Por consiguiente, el valor de TCQI reportado por un nodo UE_{HA} tiene una parte asociada a las condiciones del canal y otra asociada con las colisiones.

Un análisis similar se ha desarrollado cuando el nodo interferente es un AP Wi-Fi, cuyos resultados se muestran en la Fig. 4.3. En esta figura a), c) y e) ilustran el valor de la variable TCQI que proviene de los nodos de prueba $UE_{HA\ ser}$ que se ubican respectivamente en las posiciones A, B y C cuando el nodo interferente es un AP Wi-Fi (este escenario corresponde al ilustrado en la Fig. 3.1 b.1). En este caso en particular, sólo el tráfico de DL se encuentra habilitado, el tráfico λ_S es igual a 2 archivos/segundo y el tráfico λ_I varía entre 0,5 a 3 archivos/segundo. Los resultados aquí representados, al igual que en el caso anterior de coexistencia LAA LAA, muestran que los valores de TCQI provenientes de los UE_{HA} están correlacionados con el COT del nodo interferente. La Fig. 4.3 b), d) y f) muestra los valores de TCQI reportados por los nodos de prueba $UE_{HA\ ser}$ para el caso que existen dos tipos de nodos de prueba ($UE_{HA\ ser}$ y $STA_{HA\ int}$) ubicados en zona oculta pero pertenecientes a diferentes operadores. En este caso, es posible notar que la presencia de STA en la zona oculta implica un valor menor COT por parte del AP en comparación con su contraparte ilustrada en Fig. 4.3 a), c) y e). Esto se debe a que las colisiones que ocurren sobre las STA_{HA} incrementan la CW asociada al procedimiento de *backoff* sobre el AP, lo que provoca que el AP permanezca un tiempo mayor en silencio mientras se desarrolla el procedimiento de *backoff*, en forma similar como sucedió en el caso de un canal ideal.

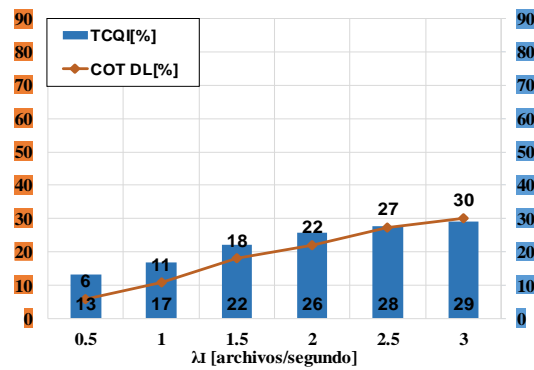
Adicionalmente, comparando las Fig. 4.3 a), c) y e) entre sí se aprecia que la variable TCQI se incrementa conforme el $UE_{HA\ ser}$ se aleja del eNB servidor. Este aumento se debe exclusivamente a las nuevas condiciones del canal y no al aumento en sí del número de colisiones. En el caso de la Fig. 4.3 b), d) y f), la variable TCQI también aumenta su porcentaje conforme el nodo de prueba $UE_{HA\ ser}$ tiene peores condiciones de canal debido

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

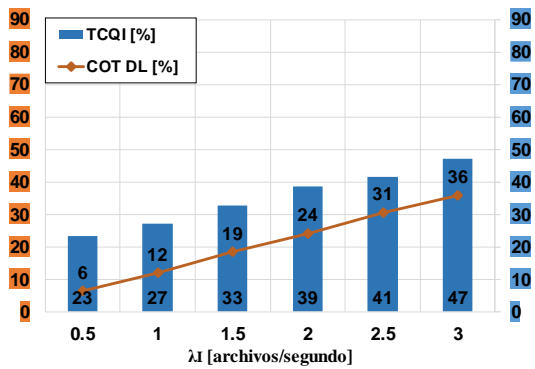
a que se aleja del eNB servidor. Sin embargo, al comparar las Fig. 4.3 a), c) y e) con las Fig. 4.3 b), d) y f) se nota que el porcentaje de TCQI es menor para b), d) y f).



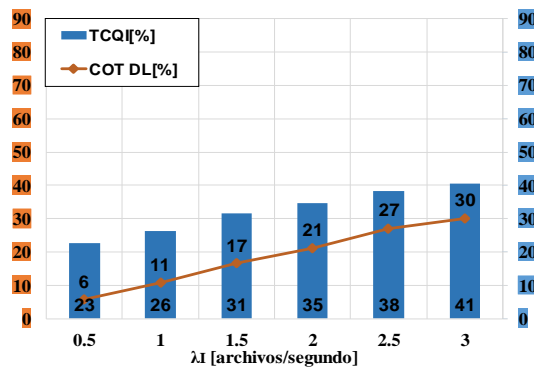
a) TCQI reportado por UE_{HA ser} ubicado en la Pos. A (Buena cobertura y baja interferencia) con un $\lambda_S=2,0$. Escenario con un tipo de nodo oculto UE_{HA ser}.



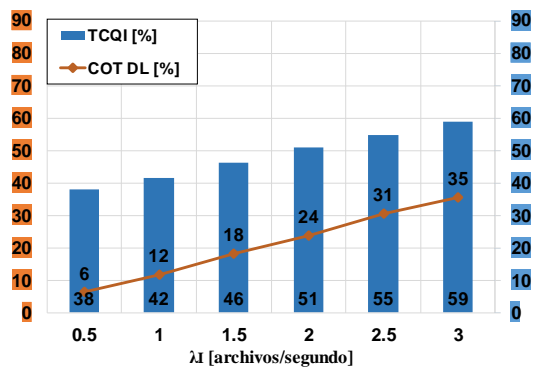
b) TCQI reportado por UE_{HA ser} ubicado en la Pos. A (Buena cobertura y baja interferencia) con un $\lambda_S=2,0$. Escenario con dos tipos de nodos ocultos UE_{HA ser} y STA_{HA int.}



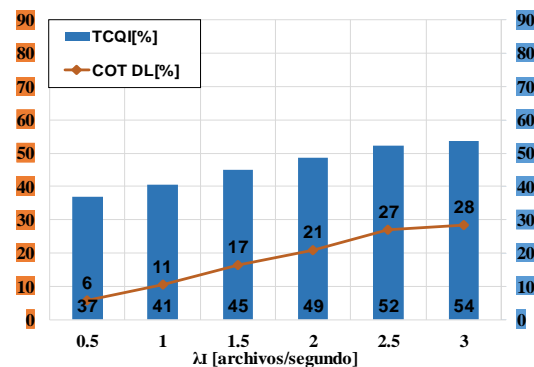
c) TCQI reportado por UE_{HA ser} ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) con un $\lambda_S=2,0$. Escenario con un tipo de nodo oculto UE_{HA ser}.



d) TCQI reportado por UE_{HA ser} ubicado en la Pos. B (Cobertura e interferencia media) con un $\lambda_S=2,0$. Escenario con dos tipos de nodos ocultos UE_{HA ser} y STA_{HA int.}



e) TCQI reportado por UE_{HA ser} ubicado en la Pos. C (Mala cobertura y fuerte interferencia) con un $\lambda_S=2,0$. Escenario con un tipo de nodo oculto UE_{HA ser}.



f) TCQI reportado por UE_{HA ser} ubicado en la Pos. C (Mala cobertura y fuerte interferencia) con un $\lambda_S=2,0$. Escenario con dos tipos de nodos ocultos UE_{HA ser} y STA_{HA int.}

Figura 4.3: Distribución TCQI(5). Coexistencia LAA Wi-Fi, las figuras a), c) y e) corresponden al escenario con un tipo de nodo en zona oculta UE_{HA ser}. Las figuras b), d) y f) corresponden al escenario con dos tipos de nodos en zona oculta UE_{HA ser} y STA_{HA int.} AP transmite sólo en DL.

4.1 Análisis de Métricas LTE en un Canal con Multitrayectoria

Esto se debe a que el porcentaje de TCQI en b), d) y f) se incrementa cada vez que el nodo $UE_{HA\ ser}$ se aleja de su nodo servidor. Sin embargo, las colisiones no aumentan, sino al contrario disminuyen debido a que la presencia del nodo oculto $STA_{HA\ int}$ genera una disminución del COT del AP Wi-Fi, lo que se refleja en un mayor porcentaje de TCQI en las Fig. 4.3 a), c) y e) en comparación con las Fig. 4.3 b), d) y f). Los motivos de los aumentos en las CW y los procedimientos de *backoff* en la red Wi-Fi son los mismos que fueron explicados en el caso de un canal ideal. Estos resultados son aplicables también al caso de coexistencia LAA Wi-Fi cuando las STA transmiten en el segmento UL en el mismo canal no licenciado y compartido con LAA.

Es claro que las conclusiones globales obtenidas para los escenarios LAA LAA son aplicables a escenarios LAA Wi-Fi u otros escenarios en los que el nodo interferente emplea una tecnología distinta sobre el espectro compartido. Además, es interesante notar cómo el procedimiento de *backoff* de Wi-Fi induce al AP a permanecer un mayor tiempo en silencio, siendo esta condición agravada en el contexto de nodos ocultos. Concentrándonos en la variable TCQI, de manera general las colisiones y una parte de las malas condiciones del canal se alojan en los índices $CQI = [0, 5]$. Por medio de los resultados de las simulaciones se observa que es factible encontrar un valor umbral adecuado para la variable TCQI, el cual permitiría detectar cuándo un UE se halla en el interior de la zona oculta, a pesar de las condiciones de canal. Sin embargo, los UE_{GA} afectados por pésimas condiciones del canal no pueden ser fácilmente diferenciados de los UE_{HA} . Por este motivo, es necesario explorar métricas adicionales para desarrollar un algoritmo que, utilizando un conjunto de métricas en forma combinada, obtenga mejores resultados en la detección de UE afectados por nodos ocultos.

4.1.2 RSRP, RSRQ, RSSI y número de PRB

La métrica RSRP mide la potencia de la RS, es decir, la potencia útil que proviene del eNB servidor y excluye todas las potencias asociadas al ruido o interferencias. Por tal motivo, el RSRP es una medida que se asocia con la cobertura de la celda y está relacionada con las pérdidas debido a la propagación de la señal en el canal de comunicaciones, siendo idealmente independiente de la carga de la red (propia o interferente). Por medio de una correcta selección de un valor umbral, el RSRP es capaz de proveer al eNB la información suficiente para clasificar al UE como situado en el interior de la celda o en los límites de la celda. El parámetro RSRQ es una métrica potencial para la estimación del ruido y la interferencia observada en los RE que portan datos. Definida a partir del RSRP y RSSI, el RSRQ es una métrica que reacciona a las variaciones de la carga de tráfico provenientes tanto de su propia celda servidora como de las celdas interferentes. Por tal motivo, inicialmente se busca un rango de variación para esta métrica.

Bajo condiciones ideales, es decir cuando el canal no es afectado por ruido e interferencias, el RSRQ varía entre $[-10,79, -3,01]$ dB, dependiendo de la cantidad de la carga de datos en su celda. En el caso particular que la celda no está cargada, cada símbolo

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

OFDM que porta RS tiene 2 RS entre sus RE. Entonces, el valor de RSRP es igual al promedio del valor de potencia de todas las RS, mientras que el valor de RSSI es igual a la suma de la potencia de $N_{RB} * 2$ RS. Por tanto, el valor de $RSRQ_{No\ load}$ es igual a:

$$RSRQ_{No\ load} = 10 \log \left(\frac{N_{RB} * RSRP}{RSSI} \right) = 10 \log \left(\frac{1}{2} \right) = -3,01 [dB] \quad (4.2)$$

Por el contrario, cuando la celda transmite datos en su total capacidad, por cada símbolo OFDM que trasmite RS, el RSRP es igual al promedio del valor de potencia de todas las RS y el RSSI es igual a la suma de la potencia de 12 RE en cada PRB, 2 correspondiente a RS y 10 correspondientes al resto de RE ($2 * P_{RS} + 10 * P_{RE}$), contenidos en el símbolo OFDM que porta RS. Estos cálculos se realizan asumiendo que en el interior del PRB todos los RE presentan el mismo nivel de potencia, siendo esta condición razonable de acuerdo a la asignación de potencia definida en el estándar. Despreciando el efecto del ruido e interferencia, el $RSRQ_{Full\ load}$ es igual a:

$$RSRQ_{Full\ load} = 10 \log \left(\frac{1}{12} \right) = -10,79 [dB] \quad (4.3)$$

Entonces, para determinar los efectos globales que el canal, movilidad e interferencia ejercen sobre las señales transmitidas desde el eNB hacia los UE en la métrica RSRQ es necesario establecer un mecanismo que refleje su efecto en la señal recibida. Aunque el RSRQ no representa la SINR, ambas métricas están relacionadas. Por este motivo, se considera que esta relación se puede alcanzar determinando un valor de margen SINR (*marSinr*), el cual lo asociamos con los diferentes valores de RSRQ que varían en función de las condiciones de carga de la celda. En forma similar, se evalúan los valores de RSRQ asociados a este *marSinr* en función de la intensidad de interferencia que el UE enfrenta en un escenario de colisión. De este modo, se puede decir que los UE cuyos niveles de RSRQ están sobre este nivel de *marSinr* enfrentan mínima o nula interferencia. El criterio para la selección de este *marSinr* se describe más adelante.

Según la definición de SINR se tiene que $SINR = S / (I + No)$, donde S es la potencia promedio de la señal útil, I la potencia de la interferencia y No la potencia de ruido que afectan a un RE. Por lo tanto, si la SINR es menor que el *marSinr*, implica que el valor de la señal recibida es afectado por colisiones. Esta condición se mantiene verdadera mientras el UE no abandone el área de cobertura de la celda, entonces se tiene que:

$$\frac{S}{(I + No)} \leq \text{marSinr} \rightarrow \text{There is collision} \quad (4.4)$$

Si el valor de *marSinr* está dado en dB.

4.1 Análisis de Métricas LTE en un Canal con Multitrayectoria

$$(I + N_o) \approx 10^{-\frac{\text{marSinr}}{10}} * S \quad (4.5)$$

Considerando que la potencia de las RS es igual a la potencia de los RE, $P_{RS} = P_{RE}$ en el interior del PRB, Siendo N_{RB} el número de PRB sobre el ancho de banda de trabajo usado para la transmisión de datos por parte del eNB servidor, se tiene que el RSRQ es igual a:

$$RSRQ = \frac{N_{RB} \cdot P_{RS}}{\{(\delta) \sum_{k=0}^{N_{RB}-1} P_{RE}(k) + 12 \sum_{k=0}^{N_{RB}-1} [I(k) + N_o(k)]\}} \quad (4.6)$$

donde δ es el número promedio de RE por PRB que son empleados como RS o utilizados para transmitir datos de usuario sobre un símbolo OFDM. Es decir, $\delta/12$ es la razón del nivel de ocupación del canal en DL para un determinado eNB. δ varía entre 2 (*no load*) cuando sólo las RS son transmitidas y 12 (*full load*), cuando todos los RE son empleados ($2 \leq \delta \leq 12$). Considerando que el nivel promedio de interferencia y ruido por RE es igual para todos los RE se obtiene:

$$RSRQ = \frac{N_{RB} \cdot P_{RE}}{(\delta) \cdot N_{RB} \cdot P_{RE} + 12 \cdot N_{RB} \cdot (I + N_o)} \quad (4.7)$$

Usando la ecuación (4.5) en (4.7):

$$RSRQ_{Th} = \frac{1}{\delta + 12 \cdot (10^{-\text{marSinr}/10})} \quad (4.8)$$

donde $RSRQ_{Th}$ representa un RSRQ umbral asociado al valor de marSinr para diferentes valores de carga de celda. Los valores que se encuentran por debajo de este valor umbral serán evaluados como afectados por colisiones (interferencias).

La Tabla 4.2 muestra los valores esperados de $RSRQ_{Th}$ para diferentes valores de marSinr cuando δ es igual a 2 ($RSRQ_{ThNoLoad}$) y 12 ($RSRQ_{ThFullLoad}$).

Tabla 4.2: Umbrales de RSRQ para diferentes marSinr y carga de celda

marSinr[dB]	RSRQ _{ThNoLoad} [dB]	RSRQ _{ThFullLoad} [dB]
4	-8,31	-12,25
3	-9,04	-12,56
2	-9,81	-12,92
1	-10,62	-13,33
0	-11,46	-13,8
-1	-12,33	-14,33

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

Evaluando los resultados de la Tabla 4.2, se aprecia que dependiendo del valor seleccionado de marSinr el valor de umbral de $RSRQ_{ThNoLoad}$ varía desde $[-12,33, -8,31]$ dB. Algo similar ocurre con el umbral definido por $RSRQ_{ThFullLoad}$, el cual varía desde $[-14,33, -12,25]$. Adicionalmente, considerando en forma conjunta el rango de valores de RSRQ cuando el canal está libre de interferencias y los valores de RSRQ de la Tabla 4.2, se pueden identificar 3 rangos. Por ejemplo, considerando un $\text{marSinr}=2$, el primer rango corresponde con los valores de RSRQ asociados a UE libres de colisión; en este caso el RSRQ está en el rango de $[-9,81, -3,01]$ dB. Para el segundo rango $[-12,92, -9,81]$ dB, el valor de $RSRQ_{Th}$ varía dinámicamente en función de la carga de la celda de tal modo que si $RSRQ > RSRQ_{Th}$, el UE es considerado como libre de interferencia. Finalmente, en el tercer rango ($RSRQ < -12.92$) el UE es afectado por diferentes rangos de interferencia comenzando desde bajos, medianos, y fuertes. Siendo que la sensibilidad del $RSRQ_{Th}$ está determinada por el valor de marSinr , la sintonización de este parámetro permitirá encontrar un valor óptimo que será aplicado en el desarrollo del algoritmo de detección de colisiones.

Carga del tráfico en el eNB servidor

Se define a la variable PRBr como el cociente entre el número de PRB usado por el *scheduler* para la asignación de recursos radio a los UE y el número total de PRB disponibles durante una ventana de muestreo. Considerando la ecuación (4.8), se puede decir que la variable δ caracteriza el nivel de carga de tráfico que el eNB servidor está transmitiendo en el segmento de DL para el caso particular descrito en esta ecuación y, por consiguiente, permite tener una idea del nivel de ocupación del canal por parte del eNB servidor en DL. Como se demuestra en el análisis realizado a la métrica RSRQ en esta sección, el nivel de carga δ , de forma equivalente, el número de PRB usado para la transmisión de datos por parte del eNB servidor en DL tiene un efecto en el rango de valores RSRQ que están asociados a colisiones y, por lo tanto, constituye otro parámetro que puede ser considerado durante el desarrollo del algoritmo de detección de colisiones.

De manera general, del análisis realizado hasta el momento, se puede notar que variables como CQI y RSRQ, RSRP y el PRBr del nodo servidor pueden ser consideradas como métricas útiles para la identificación de la presencia de terminales ocultos cuando se emplea la tecnología LAA.

4.1.3 Reporte de medidas del UE

Hasta este momento se han calculado valores instantáneos de RSRP y RSRQ considerando un único símbolo OFDM en el interior de un PRB para una red LTE LAA. Así también, se ha definido un valor de $RSRQ_{Th}$ para un PRB promedio tomado como referencia, lo que hasta el momento nos permite predecir si el UE está expuesto a algún nivel de interferencia basándonos en la comparación del valor actual de RSRQ con un $RSRQ_{Th}$ (valor de RSRQ umbral).

4.1 Análisis de Métricas LTE en un Canal con Multitrayectoria

De acuerdo con lo definido en [111] en las secciones 9.1.4 y 9.1.7, el RSRP es reportado por la capa física en dBm, mientras que el RSRQ en dB. Los valores de RSRP y RSRQ son provistos a las capas superiores en forma periódica de acuerdo a un periodo configurable que va desde los 120 ms a 60 minutos, razón por la cual se ha seleccionado un valor de 200 ms, permitiendo la compatibilidad con otros procedimientos radio como *handover* o re-selección de celda. De este modo, los reportes de las medidas generados por un UE pueden alimentar simultáneamente el algoritmo de detección de colisiones y a la vez permitir el uso de los mismos tiempos de actualización que los establecidos para los procedimientos de re-selección y gestión de la movilidad en la red LAA. En cualquier caso, en este estudio, RSRP y RSRQ se refieren a las medidas obtenidas desde la capa física del UE, porque los reportes de RSRP y RSRQ que arriban a capa 3 en el UE son afectados por un filtro ubicado en esta capa, como se mencionó en el apartado 3.3.1 de esta memoria.

La capa física de LTE en el UE realiza un proceso de filtraje promediando los valores instantáneos de RSRP y RSRQ calculados en las subtramas 0 y 5 en los símbolos OFDM que portan señales RS durante una ventana temporal de 200 ms. Entonces, si durante la ventana de 200 ms se obtienen W muestras de valores de RSRP y RSRQ instantáneos, se obtendrán unos valores promedio iguales a.

$$RSRP_{av} = \frac{1}{W} \sum_{i=0}^{W-1} RSRP(i) \quad (4.9)$$

$$RSRQ_{av} = \frac{1}{W} \sum_{i=0}^{W-1} RSRQ(i) \quad (4.10)$$

donde $RSRP(i)$ y $RSRQ(i)$ son los valores promedio individuales en magnitud lineal medidos en la i -ésima subtrama 0 y 5 sobre todos los PRB que pertenecen al mismo TTI.

Aplicando la ecuación (4.8) en (4.6) y considerando que δ representa el número de RE usados para transmitir RS y datos de usuario hasta un máximo de 12 RE, el valor de umbral RSRQ ($RSRQ_{Th}$) en escala logarítmica se puede representar por:

$$RSRQ_{avTh} = -10 \log \left(2 + 10 \frac{K_{used}}{K_{total}} + 12 \left[10^{-\frac{marSinr}{10}} \right] \right) \quad (4.11)$$

donde, $0 \leq K_{used}/K_{total} \leq 1$ caracteriza la razón entre el número de RE que están transmitiendo datos (RE usados) y el número RE disponibles (RE total) que están contenidos en los símbolos OFDM que portan RS. Asumiendo que el nivel mínimo de granularidad a nivel de capa física es el PRB (y no el RE), una buena aproximación es reemplazar K_{used} por el número de PRB usados para transmitir datos de usuario y K_{total} por el número total

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

de PRB durante la ventana de 200 ms. Se debe recordar que el valor de RSRQ que se busca es el valor reportado por la capa física del UE sin aplicar el filtro de capa 3, ya que en el momento que se aplica el filtro en la capa 3 se pierde información asociada directamente con colisiones. Por este motivo el filtro debe ser deshabilitado.

Es importante destacar que las medidas de RSRQ calculadas por cualquier UE son reportadas al eNB independientemente de si el *scheduler* ha asignado o no recursos radio a este UE en particular. Las medidas de RSRQ son un valor promedio calculado sobre la banda de trabajo entera y está desvinculado del nivel de CQI.

Adicionalmente, continuando con el análisis de la variable RSRQ y considerando que el RSSI es igual a la suma de todas las fuentes de potencia (servidora, interferente y ruido) sobre todo el ancho de banda de la señal que es percibida por el UE, empleando la ecuación (4.6), la relación entre RSRP y RSRQ puede ser aproximada a:

$$RSRQ = \frac{(N_{RB} \cdot RSRP_s)}{\delta \cdot N_{RB} RSRP_s + PotInt} \quad (4.12)$$

donde el producto $N_{RB} \cdot RSRP_s$ representa la potencia RSRP recibida desde el nodo servidor multiplicada por el número de PRB usados por el nodo servidor (N_{RB}) y $PotInt$ es la potencia interferente más el ruido a lo largo de todo el ancho de banda de trabajo. La variable δ indica el número promedio de RE por PRB usados por el eNB servidor para la transmisión de RS y datos de usuario en los símbolos OFDM que portan las RS; por tanto ($2 \leq \delta \leq 12$). Todas estas mediciones se realizan en una ventana temporal definida específicamente para los reportes de mediciones del UE.

Tal como se mencionó anteriormente, en ausencia de interferencia y asumiendo al ruido como despreciable, existen unos límites superior e inferior que corresponden a las condiciones sin carga ($RSRQ_{No\ load} = -3,01$ dB) y carga completa ($RSRQ_{Full\ load} = -10,79$ dB). En el caso de nuestro simulador, el valor de $RSRQ_{No\ load} = -3,01$ dB no es alcanzado, ya que el canal PDCCH siempre está transmitiendo datos de control. Por este motivo la ocupación mínima del canal es del 25%: esto se debe a que el par PRB tiene 4 símbolos OFDM que portan RS y uno de estos símbolos (S0) se ubica sobre el canal PDCCH, el cual siempre está transmitiendo datos de control. La Fig. 4.4 muestra los datos de RSRP vs RSRQ promedios que se obtienen desde el UE_{HA} y UE_{GA} para diferentes magnitudes de interferencia en escenarios de coexistencia LAA LAA. La Fig. 4.4 a) muestra cómo los límites superior e inferior varían conforme el nivel de ruido e interferencia determinado por la variable $PotInt$ aumenta o disminuye. La figura muestra que existen 2 regiones claramente separadas: 1) la región donde RSRQ depende exclusivamente del nivel de ocupación del eNB y 2) la región que corresponde a un deficiente nivel de cobertura, incluida una región de transición entre las dos regiones. Los límites entre estas regiones dependen de la relación SINR y del nivel de ocupación del eNB (porcentaje de carga de tráfico en DL).

4.1 Análisis de Métricas LTE en un Canal con Multitrayectoria

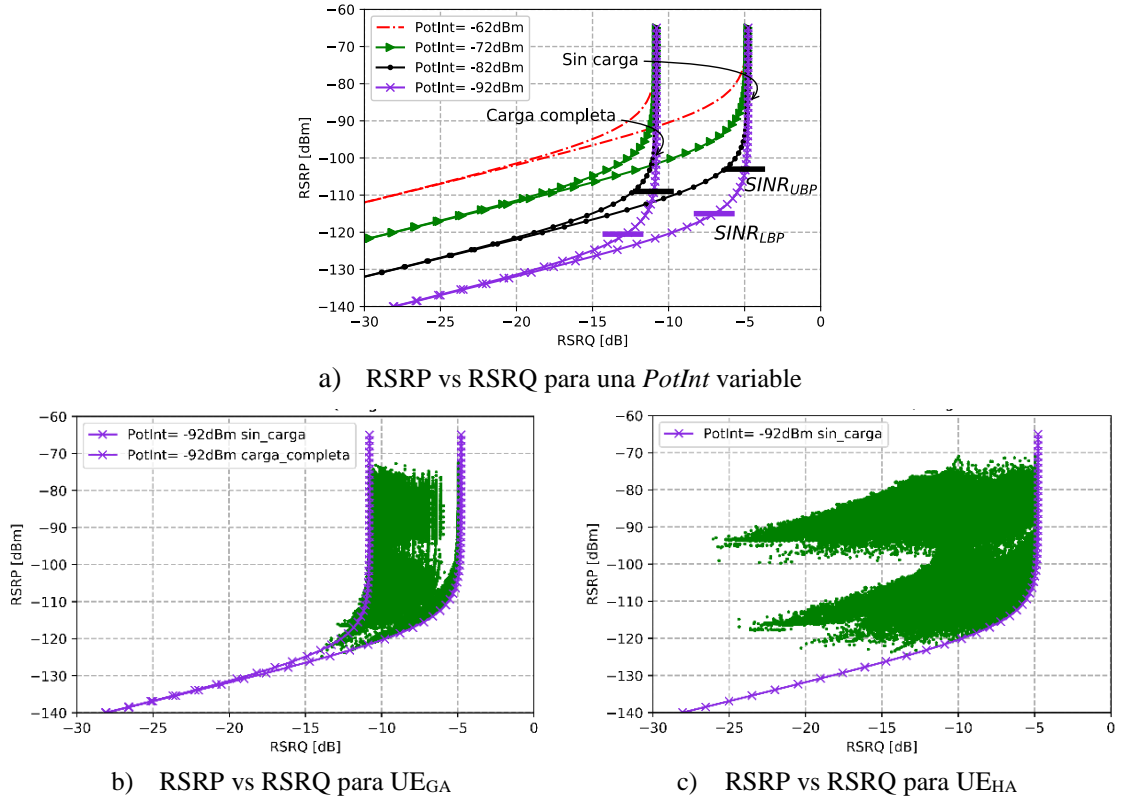


Figura 4.4: RSRP vs RSRQ a) Potencia interferente variable, b) caso UE_{GA} y c) caso UE_{HA}.

La ecuación (4.13) muestra la relación que existe entre el RSRQ y la SINR, siendo $\delta/12$ el porcentaje de carga de tráfico en DL y $SINR = RSRP / (PotInt / (12 * N_{RB}))$.

$$RSRQ = 1 / \left(12 * \left(\frac{\delta}{12} + SINR \right) \right) \quad (4.13)$$

Los niveles de SINR en la parte superior del punto de quiebre ($SINR_{UBP}$) en la Fig. 4.4 a) están alrededor de 20 dB para el 25% de la carga de tráfico y alrededor de 14 dB para el caso de carga completa, mientras que en el punto de quiebre inferior ($SINR_{LBP}$) los niveles de SINR están alrededor de 8 dB y 2 dB, respectivamente. Por tal motivo, considerando los valores de $SINR_{UBP}$ y $SINR_{LBP}$ en la Fig. 4.4 a), el valor umbral de RSRP entre estas dos regiones ($RSRP_{xBP}$) puede ser estimado a partir del valor de $PotInt$ como:

$$RSRP_{xBP}(\text{dBm}) = SINR_{xBP}(\text{dB}) + PotInt / (12 * N_{RB}).$$

Por ejemplo, cuando se considera sólo la potencia de ruido ($PotInt = Noise = -92,4$ dBm), el valor de $RSRP_{UBP}$ está en torno a -103 dBm para un valor de carga del 25% y -110 dBm para una condición de carga completa. De igual manera, el valor de $RSRP_{LBP}$ está en torno a -115 dBm para un valor de carga del 25% y alrededor de -121 dBm para la condición de carga completa. En este caso, es claro que cualquier valor bajo los -110 dBm corresponde con una condición de cobertura deficiente. Considerando los valores de SINR como se detallan en la Tabla 4.1, se puede decir que para valores de

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

SINR menores que 2,699 dB corresponde un valor menor o igual que 5 (índice CQI) y esto está asociado con la condición de mala calidad de la cobertura en el borde de la celda. Sin embargo, cuando el RSRP es mayor que -110 dBm, se debe distinguir entre un SINR degradado debido a malas condiciones del canal y debido a colisiones generadas por el problema del nodo oculto.

Las Fig. 4.4 b) y 4.4 c) muestran las gráficas de RSRP vs RSRQ que fueron obtenidas de los nodos de prueba UE_{GA} y UE_{HA} , los cuales se movilizan en las subáreas definidas como (A', B' y C') y (A, B y C) respectivamente, para un escenario de coexistencia LAA LAA, afectadas por condiciones de LOS y NLOS y un tráfico de carga variable para la celda servidora y celda interferente. Las figuras incluyen los límites máximos y mínimos que corresponden a los casos que el eNB servidor transmite sin carga y con carga completa cuando se considera solamente al ruido $PotInt=-92$ dBm. Como se esperaba para la Fig. 4.4 b), las muestras de pares RSRP vs RSRQ de los nodos UE_{GA} caen en el interior de los límites de nivel de ruido calculados. Por otro lado, en la Fig. 4.4 c) se aprecia que algunas muestras sobrepasan el límite mínimo, siendo estas las muestras que corresponden a colisiones. La condición LOS muestra un pico para el valor RSRQ cuando el RSRP= -95 dBm, mientras que para la condición de NLOS el valor pico de RSRQ aparece cuando el RSRP= -118 dBm. Resultados similares son obtenidos para el escenario LAA Wi-Fi. Considerando lo descrito en párrafos anteriores, es posible obtener un rango de valores RSRQ que pueden ser evaluados como colisiones, basados en el porcentaje de carga de tráfico y requerimientos mínimos de SINR.

En términos generales, se puede concluir que el RSRQ permite conocer si el UE está localizado o no en el interior de una zona de interferencias. Si el UE observa un buen nivel de RSRQ y una alta concentración de CQI con índices bajos, estadísticamente se puede decir que es razonable pensar que este comportamiento se debe a malas condiciones del canal. Por otro lado, si el RSRQ tiene un valor bajo, la correlación con el nivel de RSRP es importante. Resumiendo, un bajo RSRQ asociado a un buen nivel RSRP junto con una alta concentración de CQI con índices bajos se asocian con interferencias no predecibles (por ejemplo, interferencias que provienen desde un nodo oculto). Por otro lado, si el nivel de RSRP es aceptable y el UE está ubicado en los límites de la celda, la evaluación de existencia de nodos ocultos sigue los mismos criterios descritos hasta el momento. Sin embargo, surgirán errores debido a las malas condiciones del canal que, en conjunto con los efectos de interferencias, hacen que varíen los valores umbrales de decisión al momento de determinar la interferencia proveniente de terminales ocultos. Estos procedimientos son explicados con mayor detalle en la siguiente sección, en donde se desarrolla un algoritmo basado en las métricas y umbrales estudiados hasta el momento.

4.2 Algoritmo de Detección de Nodo Oculto Basado en Método Heurístico

Con los resultados extraídos en la sección anterior, se propone un algoritmo Dinámico de Detección de Colisiones (DCD), que hace uso de la distribución CQI mapeada en los valores de la variable TCQI junto con las métricas RSRP y RSRQ que se obtienen del UE. Este algoritmo hace posible la detección de colisiones que afectan al UE considerando un canal complejo en una red LAA cuando el nodo se encuentra localizado en la zona oculta. El algoritmo DCD se adapta automáticamente, de tal modo que es posible detectar colisiones en cualquier momento que el valor medido de RSRQ cae por debajo de un valor umbral y el valor de TCQI supera un valor mínimo, permitiendo generar una respuesta en intervalos de tiempo iguales a la duración de la ventana temporal usada para el reporte de mediciones del UE. Esta información puede utilizarse para tomar decisiones acerca de la conveniencia de que el UE permanezca en la banda no licenciada o su traspaso a una banda licenciada. La Tabla 4.3 muestra los parámetros utilizados por el algoritmo DCD.

Tabla 4.3: Definición de parámetros del algoritmo DCD

Parámetro	Descripción
CQI	Índice CQI reportado por UE
TCQI	Histograma CQI truncado
TCQIMin	Histograma CQI truncado umbral mínimo. Valores bajo este umbral representan ligeras malas condiciones del canal o colisiones leves
RSRQ _{av}	RSRQ reportado por las medidas del UE
RSRQ _{avTh}	Valor umbral de RSRQ obtenido como se define en ecuación (4.11)
RSRP _{av}	RSRP reportado por las medidas del UE
RSRP _{Th}	Valores de RSRP mayores que este umbral RSRP indican que el UE está dentro de la zona de cobertura de la celda. Caso contrario, si el UE tiene RSRP menores que este umbral, el UE está en zona de <i>handover</i> .
UeCol	Valor booleano, si es igual a 1 una colisión ha sido detectada
PRB _{UE}	Número de PRB enviados a un UE en específico
Kused	Número de PRB transmitidos desde el eNB a los UE asociados a su celda dentro de una ventana de 200 ms
Ktotal	Número total de PRB disponibles dentro de una ventana de 200 ms
α	Factor de compensación por la aproximación de RE to PRB
UeHA	Valor booleano, si es igual a 1 el UE está ubicado en zona oculta.

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

La solución propuesta no requiere de coordinación, ya que en despliegues reales es muy difícil encontrar alguna solución coordinada entre diferentes operadores. Por otro lado, se trata de minimizar los requerimientos de señalización extra entre el eNB y los UE. El algoritmo DCD es evaluado sobre diferentes tipos de escenarios con diferentes cargas de tráfico. Los análisis se desarrollan sobre un canal real tal como se ha definido en la descripción del escenario el cual considera LOS, NLOS, pérdidas de propagación lognormales y multitrayectoria y UE en movimiento dentro y fuera de la zona oculta en la banda de 5 GHz.

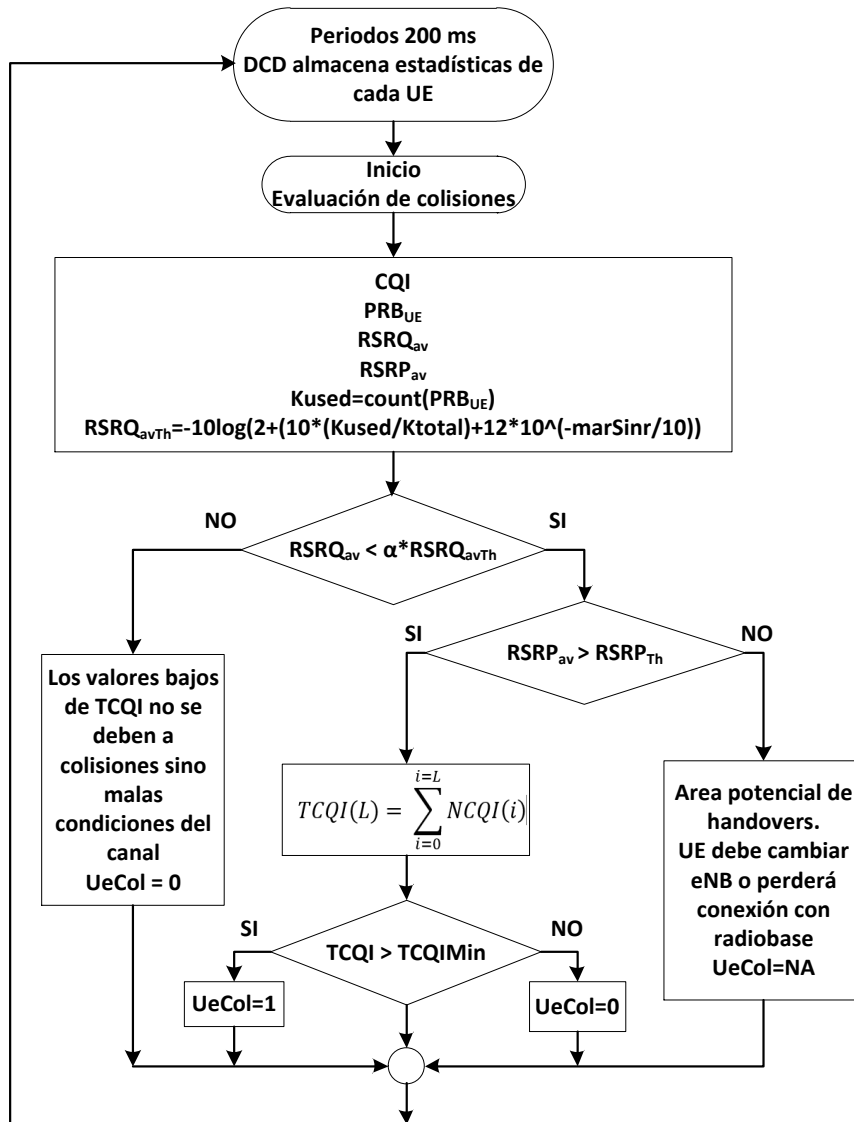


Figura 4.5: Algoritmo DCD (*Dynamic Collision Detector*)

La Fig. 4.5 muestra el diagrama de flujo del algoritmo DCD. De acuerdo al análisis previo, las dos métricas principales que evalúan las colisiones son el CQI y el RSRQ, las cuales están correlacionadas con el RSRP y las estadísticas de carga de la celda. El algoritmo DCD almacena las estadísticas generadas por cada UE asociado al eNB servidor en forma periódica en una ventana de 200 ms. Posteriormente, estos valores son empleados para la tarea de evaluar si la señal ha sufrido algún tipo de interferencia.

4.2 Algoritmo de Detección de Nodo Oculto Basado en Método Heurístico

Los valores promedios de RSRP y RSRQ se obtienen de las mediciones realizadas por el UE en su capa física (no se aplica filtro a nivel de capa 3), de acuerdo a la configuración establecida en el RRC y notificada por el eNB al UE. Los CQI son generados siguiendo el criterio de CQI *wideband* en donde la red notifica al UE por medio de mensajes DCI que los reportes de CQI deben ser enviados cada 2 ms. La razón por la cual se selecciona este intervalo de tiempo es para asegurar que varias medidas de CQI se realizan en el interior de la trama LAA. Considerando que el MCOT mínimo definido para LAA es igual a 4ms, el periodo de tiempo seleccionado de 2 ms permite cumplir con este requerimiento.

Continuando con el análisis del algoritmo, como se menciona en el apartado 4.1.1, se puede concluir que configurando un valor umbral adecuado para la métrica TCQI, es posible discriminar los UE_{HA} cuyos datos recibidos son afectados significativamente por las interferencias provenientes de terminales ocultos, sin importar las condiciones de su canal de comunicaciones y, recíprocamente, también se pueden discriminar los UE_{GA} que son afectados por un pésimo estado del canal. Como se muestra en la Fig. 4.1, la variable TCQI para los UE_{GA} presenta una frecuencia casi constante para los diferentes valores de tráfico λ y de manera general sólo depende de la calidad promedio del canal. Para los escenarios evaluados, y empleando un $TCQI(L)$ con $L=5$, los UE_{GA} en la posición C' (límite de la cobertura) tienen un TCQI(5) en torno al 35% debido a que estos UE están más alejados de su nodo servidor y soportan las peores condiciones del canal en un escenario sin línea de vista NLOS, mientras que los UE_{GA} ubicados en la posición A' (cerca del eNB servidor) son los que apenas comienzan a percibir las malas condiciones del canal y presentan un TCQI(5) en torno al 10%.

Por otro lado, los UE_{HA} presentan un TCQI cuyo valor depende de dos variables: la primera se correlaciona con la potencia del tráfico interferente percibido por el UE_{HA} durante el tiempo de transmisión del nodo interferente y la segunda depende de su posición relativa en el borde de la zona de cobertura de su celda en forma similar que los UE_{GA}. De manera general, los UE_{HA} cuyo servicio es afectado severamente por la interferencia proveniente de un nodo oculto tiene un valor TCQI alto, el cual es mayor que aquellos reportados por un UE_{GA} en las peores condiciones del canal. Con estas consideraciones, se han propuesto 2 valores umbrales para TCQI que denominamos $TCQIMin$ y $TCQIMax$ para distinguir a los UE afectados por diferentes niveles de degradación del canal y a los UE afectados por las interferencias, respectivamente.

Valores de TCQI menores que $TCQIMin$ están asociados a UE que enfrentan ligeros inconvenientes en la calidad de su canal de comunicaciones o que son afectados por interferencias mínimas que provienen desde algún nodo oculto. Por otro lado, un UE que reporta un TCQI mayor que $TCQIMax$ es un dispositivo que está percibiendo pésimas condiciones de canal (como los mostrados en UE_{GA} en la posición C') o está experimentando interferencias que van desde moderadas a intensas, lo que correspondería a un UE ubicado en zona oculta. Por su parte, los UE que se ubican en el rango entre $TCQIMin < TCQI < TCQIMax$ encajan con UE que enfrentan condiciones de canal con una calidad media (UE_{GA} en la posición B') o moderada interferencia. A diferencia de los UE_{GA}, se ha establecido que

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

los UE_{HA} para los escenarios evaluados comenzarán a percibir los efectos de las colisiones cuando su TCQI sea mayor que $TCQIMin$. Puntualizando, puede ocurrir que un UE tenga valores bajos de TCQI, sin embargo, lo importante es el hecho de la determinación de que el UE se encuentra efectivamente en zona oculta ya que al encontrarse en esta área puede tener una influencia negativa sobre el rendimiento del sistema y es aquí en donde acciones como el cambio a otra banda de trabajo pueden evitar degradaciones futuras del servicio de la red que aloja al UE_{HA}.

La selección adecuada de los umbrales para $TCQIMin$ y $TCQIMax$ es un problema importante a resolver, el cual puede ser resuelto aplicando los resultados obtenidos en las estadísticas recolectadas. De acuerdo a los resultados alcanzados durante la simulación de los diferentes escenarios para UE_{GA}, el umbral $TCQIMin$ puede ser configurado en 15%, mientras que el umbral para $TCQIMax$ es igual a 35%. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, se ha visto que la detección basada en TCQI puede ser dependiente del escenario y puede suceder que no se genere suficiente discriminación entre UE_{GA} afectados por malas condiciones del canal y UE_{HA} enfrentando colisiones. Por este motivo, la evaluación de la condición del UE es reforzada por otro filtro que está basado en los reportes de las medidas RSRP y RSRQ. A continuación, el dilema es cómo encontrar los valores umbrales para $RSRQ_{avTh}$ o mejor dicho cómo encontrar el valor adecuado de $RSRQ_{avTh}$. En efecto, el valor para el umbral $RSRQ_{avTh}$ cambia dinámicamente en cada periodo de evaluación debido a que depende de la carga de la celda. Consecuentemente, si el valor reportado de $RSRQ_{av}$ por el UE es mayor que el valor umbral $RSRQ_{avTh}$ (definido en la ecuación 4.11), los índices bajos de CQI estadísticamente se deben a las malas condiciones del canal antes que a problemas de interferencias. Bajo estas condiciones la bandera $UeCol$ es igual a 0. Pero si el valor de $RSRQ_{av}$ reportado es menor que el $RSRQ_{avTh}$, se requiere un análisis adicional para evaluar si el UE está en área de *handover*. Cuando el UE está en área de *handover* no importa si el UE está afectado o no por colisiones provenientes de nodos ocultos, ya que el UE podría perder la conexión con su eNB servidor. Por tal motivo, si $RSRQ_{av}$ es menor que $RSRQ_{avTh}$ el algoritmo considera las medidas de RSRP, de tal modo que los UE que reportan un $RSRP_{av}$ mayor que el umbral $RSRP_{Th}$ son evaluados como UE que están en el interior del límite de cobertura de la celda. El caso que $RSRP_{av}$ es menor que $RSRP_{Th}$ no se considera, ya que si el UE ha sobrepasado este umbral, debe realizar un *handover* a la celda próxima inmediatamente. En nuestro caso se ha seleccionado el valor de $RSRP_{Th} = -110 \text{ dBm}$. Para tomar la decisión de cuál es el estado del UE cuando el $RSRQ_{av}$ es menor que $RSRQ_{avTh}$ se ha establecido un factor de corrección para compensar algunas desviaciones que el uso de PRB antes que RE pueden generar al momento del cálculo de K_{used} en la ecuación (4.11). Después de varias campañas de simulación se ha seleccionado el valor de $\alpha = 0,95$.

Entonces, si $RSRP_{av}$ es mayor que $RSRP_{Th}$, el algoritmo decide que el UE es afectado por colisiones comparando el valor actual de $TCQI$ en conjunto con el valor de $RSRQ_{av}$. De este modo, si $TCQI > TCQIMin$ y $RSRQ_{av} < \alpha * RSRQ_{avTh}$, el UE es evaluado como un dispositivo enfrentando colisiones y se establece la bandera $UeCol = 1$.

4.2 Algoritmo de Detección de Nodo Oculto Basado en Método Heurístico

Se debe recordar que las decisiones del algoritmo son actualizadas en periodos de 200 ms para cada UE asociado con su eNB. Sin embargo, las decisiones acerca de si un UE debe ser clasificado como dispositivo afectado significativamente por colisiones provenientes de terminales ocultos no se pueden basar en las mediciones obtenidas en un solo periodo. Del análisis de los datos periódicos y consecutivos obtenidos cada 200 ms hasta un número máximo de periodos igual a M_A , se aprecia que, para un número corto de muestras consecutivas, la probabilidad de que un UE_{HA} sea etiquetado como afectado por colisiones ($UeCol = 1$) dado que ya fue anteriormente etiquetado como afectado por colisiones es mayor que la probabilidad de que un UE_{GA} sea etiquetado erróneamente con una segunda falsa colisión dado que una primera falsa colisión ocurriese. Esto se debe a que las colisiones (*verdaderas*) están concentradas en periodos de tiempos que varían en función del tamaño de las tramas transmitidas por los nodos servidor e interferente y, como los nodos están en condición oculta, durarán varias tramas LAA que serán consecutivas. Por otro lado, las colisiones (*falsas*) se deben a los efectos de los desvanecimientos que afectan al canal de comunicaciones, los cuales ocurren de forma aleatoria y son cortos en duración.

Con esto en mente, para etiquetar a un UE con la bandera $UeHA = 1$, es decir el UE se encuentra en zona oculta, el algoritmo DCD evalúa el número de veces que la bandera $UeCol = 1$ ocurre dentro de un intervalo M_A . Para el algoritmo DCD el valor establecido es $M_A = 4$, de tal modo, que si dentro de la ventana temporal de muestras definido por ($4 \cdot 200 = 800$ ms) se detecta que un UE fue etiquetado dos veces o un número mayor de veces consecutivas como $UeCol = 1$, este UE se etiqueta como $UeHA = 1$; en caso contrario el UE se etiqueta como $UeHA = 0$. De este modo, el algoritmo determina que el UE que está enfrentando colisiones se halla efectivamente en zona oculta, eliminando casi por completo los errores debido a falsas colisiones.

4.2.1 Análisis de resultados numéricos

En esta sección se evalúa el rendimiento del algoritmo DCD propuesto, para escenarios de coexistencia LAA LAA y LAA Wi-Fi, considerando un canal real de comunicaciones. Los escenarios y la configuración de parámetros son los mismos que fueron presentados en la sección 3.2.1 del capítulo anterior. Los resultados aquí presentados sólo muestran los casos en que la fuente de interferencia es un dispositivo LAA, esto se debe a que se desea evitar redundancias, ya que se han obtenido similares conclusiones independientemente de que la fuente de interferencia se trate de un eNB LAA o AP Wi-Fi.

En primer lugar, se procede a presentar los resultados correspondientes a las métricas RSRP y RSRQ que alimentan al algoritmo DCD. Como se mencionó anteriormente, las estadísticas provienen de los UE_{HA} y UE_{GA} que forman parte de los dispositivos de prueba ubicados en las subáreas (A, B, C) y (A', B', C'), respectivamente, al borde de celda, como se muestra en la Fig. 3.1.

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

En resumen, y a manera de recordatorio, las principales características de los escenarios de simulación son:

- UE_{HA} que pertenecen al nodo servidor o al nodo interferente, los cuales están ubicados individualmente o simultáneamente en la zona oculta.
- Tráficos de carga de nodo servidor y de nodo interferente que varían independientemente para cada eNB desde un valor mínimo hasta un valor máximo.
- Dos tipos de tráfico, FTP con un tiempo de arribo que sigue una distribución de Poisson, y tráfico UDP (*User Datagram Protocol*) para una tasa de bit constante (CBR). El tráfico UDP permite la transmisión de paquetes IP para mantener un valor de tasa constante R (*Rate*) objetivo que varía en un rango de [1,0, 3,5] Mbps en incrementos de 0.5 Mbps, con lo que se logra alcanzar la saturación. Los paquetes IP son solicitados de manera secuencial por cada uno de los UE/STA al interior de cada celda, de tal modo que cada UE/STA es capaz de alcanzar en forma independiente su valor de carga de tráfico. Es decir, se obtiene un valor específico de RI (tasa de tráfico interferente UDP) y RS (tasa de tráfico servidora UDP) para cada UE/STA en cada realización. La principal motivación para el uso de este modelo de tráfico es comprobar que los resultados conseguidos con el tráfico tipo ráfaga (denominado FTP) se mantienen para el modelo de tráfico CBR (que emplea UDP), y de este modo demostrar que los resultados de los algoritmos de detección de colisiones son independientes del modelo de tráfico. La Tabla 4.4 muestra el nuevo parámetro utilizado en las simulaciones.

Tabla 4.4: Parámetro adicional incorporado a la simulación

Parámetro	Valor
Parámetro Tráfico	
RS / RI (UDP)	[1,0 a 3,5] Mbps

- Movilidad de los UE con una velocidad peatonal constante dentro de un área limitada, de tal modo que cada UE permanecerá en su respectiva zona sin salir o entrar de su zona oculta o zona libre de colisión.
- Los UE_{HA} y UE_{GA} utilizados como dispositivos de prueba se ubican en 3 posiciones iniciales en el borde de la celda y se mueven de manera aleatoria alrededor de estas posiciones, de tal modo que mientras los UE_{GA} obtienen diferentes niveles de recepción de señal, con pérdidas que van desde niveles bajos a medios y altos debido a las diferentes condiciones del canal, los UE_{HA} sufren de interferencias que varían desde niveles bajos a medios y altos además de diferentes condiciones del canal. Ambos grupos de nodos de prueba tienen igual distancia promedio en relación con su eNB servidor. Esto se hace con fines comparativos, y así comprender cómo el canal afecta a la señal recibida por los UE_{GA} y también cómo el canal junto con la interferencia afecta a los datos recibidos por los UE_{HA} cuando los nodos de prueba se encuentran a la misma distancia promedio.

- Un canal definido como real que presenta desvanecimientos lognormales y multitrayectoria.

4.2.1.1 Medidas de capa física reportados por el UE

A continuación, se procede a recolectar unas muestras de los reportes de capa física provenientes de los nodos de prueba UE_{HA} y UE_{GA} en donde se observa cómo las métricas RSRP y RSRQ varían en el tiempo conforme los UE de prueba pasan por diferentes condiciones de canal y carga de tráfico en el eNB servidor durante el tiempo de simulación.

La Fig. 4.6 representa las medidas RSRP y RSRQ reportadas por los UE_{HA} y UE_{GA} a su eNB servidor para el escenario de simulación planteado cuando los dispositivos de pruebas están ubicados en la subárea B y B', respectivamente, del escenario de la Fig. 3.1 a.1) LAA LAA con un solo tipo de nodos ocultos UE_{HA} ser ubicados en zona oculta. Las ilustraciones muestran el RSRP y RSRQ vs tiempo de la realización, siendo el tiempo de simulación configurado igual a 120 segundos. El modelo de tráfico empleado corresponde al tipo FTP (*burst traffic*) con cargas de tráfico independientes para el eNB servidor y eNB interferente.

Las Fig. 4.6 a), c) y e) representan las medidas reportadas por el UE_{GA} para los tráficos $\lambda_S=0,5 - \lambda_I=0,5$, $\lambda_S=2,0 - \lambda_I=2,0$ y $\lambda_S=3,0 - \lambda_I=3,0$ archivos/segundo respectivamente. Analizando la variable RSRP se aprecia que debido a que el UE está en los límites de la celda, a la movilidad del UE y a los desvanecimientos esta variable varía en un rango dado por [-105, -115] dBm aproximadamente, siendo esta variación similar para las tres figuras. En relación con el reporte de RSRQ, se ha demostrado en el apartado 4.1.2 que el RSRQ varía en el rango [-10,79, -3,01] dB, que corresponde con las condiciones $RSRQ_{Full\ load}$ y $RSRQ_{No\ load}$, respectivamente. Con esta consideración, se aprecia que la métrica RSRQ varía en un rango aproximado de [-11, -5] dB y la métrica RSRQ no alcanza el valor de -3 dB, ya que la condición $RSRQ_{No\ load}$ no puede ser alcanzado por el simulador empleado, ya que su canal de control siempre tiene datos a transmitir. Debido a que el UE_{GA} prácticamente no es afectado por las interferencias, la variación de RSRQ se debe íntegramente al valor de carga de tráfico que el eNB servidor tiene durante el periodo de toma de muestras para el cálculo de esta variable. Por este motivo, se aprecia que conforme el tráfico del nodo servidor λ_S se incrementa, el valor de RSRQ tiende a adquirir valores en el rango inferior del intervalo [-11, -5] dB y que, como se observa en la Fig. 4.6 e), la variable RSRQ con un $\lambda_S=3,0$ tiene un RSRQ en torno a -11 dB en una proporción mayor que los datos obtenidos de RSRQ en la Fig. 4.6 a), la cual tiene un tráfico $\lambda_S=0,5$ archivos/segundo.

Para el caso de las Fig. 4.6 b), d) y f), estas representan las medidas reportadas por el UE_{HA} para los tráficos $\lambda_S=0,5 - \lambda_I=0,5$, $\lambda_S=2,0 - \lambda_I=2,0$ y $\lambda_S=3,0 - \lambda_I=3,0$ archivos/segundo, respectivamente. Todas las figuras muestran que el reporte de RSRP está en el rango de [-120, -100] dBm aproximadamente debido a las mismas razones que se indicaron previamente para los nodos UE_{GA} , con la diferencia que los UE_{HA} se encuentran en zona

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

oculta y se verán afectados por las interferencias provenientes del eNB interferente. Por este motivo, las Fig. 4.6 b), d) y f) muestran que la variable RSRQ varía en un rango dado por $[-18, -5]$, $[-27, -5]$ y $[-30, -5]$ dB, respectivamente y que RSRQ tiene valores por debajo del límite de $RSRQ_{Full\ load} = -10,79$ debido a las colisiones originadas por la presencia del nodo oculto. En consecuencia, la métrica RSRQ disminuye su valor conforme aumenta la carga de tráfico en el eNB servidor y debido al efecto de las colisiones en la señal recibida.

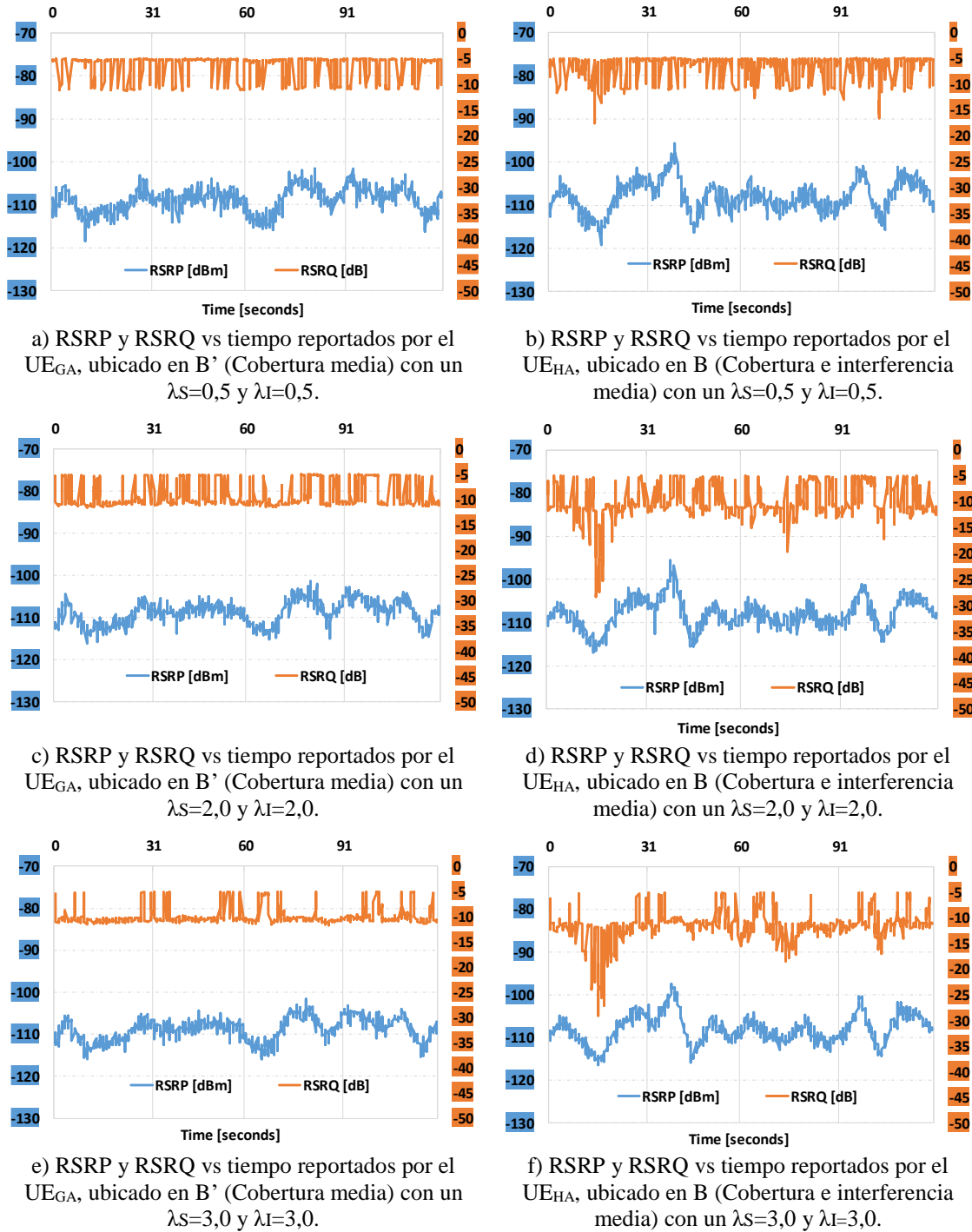


Figura 4.6: RSRP y RSRQ vs tiempo. Las Fig. a), c) y e) corresponden a las medidas reportados por UE_{GA}. Mientras que las Fig. b), d) y f) corresponden a las medidas reportadas por el UE_{HA}. Tráfico FTP (archivos/segundo), escenario LAA LAA.

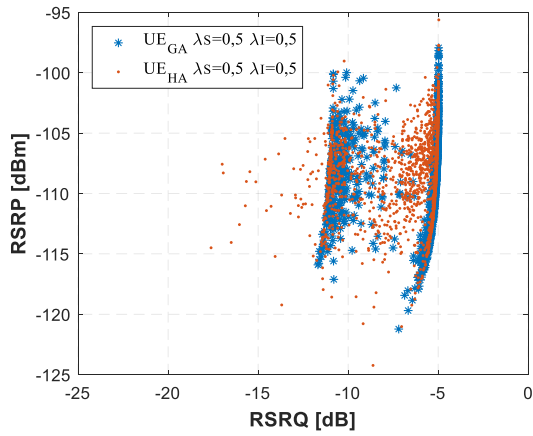
4.2 Algoritmo de Detección de Nodo Oculto Basado en Método Heurístico

Para apreciar la correlación de las métricas reportadas de RSRP y RSRQ, la Fig. 4.7 muestra cómo estos valores se ubican en el plano RSRP vs. RSRQ para los dispositivos de pruebas UE_{HA} y UE_{GA} en conjunto con sus respectivos histogramas RSRQ para un modelo de tráfico FTP considerando un escenario de coexistencia LAA LAA tal como lo detalla la Fig. 3.1 a.1). Las Fig. 4.7 a), c) y e) muestran los gráficos de RSRP vs RSRQ para un mismo valor de tráfico $\lambda S=0,5$ con incrementos en el tráfico λI (0,5; 2 y 3) archivos/segundo. Los datos obtenidos de los nodos UE_{HA} y UE_{GA} se encuentran sobrepuestos para tener una mejor visualización del efecto de las colisiones sobre la métrica RSRQ. En estas figuras se puede observar que los datos de RSRQ para el caso de UE_{GA} están dispersos entre dos límites, mientras que para el caso de UE_{HA} el límite inferior se amplía, siendo aquellos datos que sobrepasan el límite inferior ($RSRQ_{ThFullLoad}$) mostrado en la Tabla 4.2 los que son producto de las colisiones, y que conforme aumenta el tráfico interferente λI tienen una mayor presencia en las figuras. Adicionalmente, las gráficas permiten apreciar cómo el RSRQ alcanza una respuesta no lineal conforme el valor de RSRP sobrepasa el límite inferior determinado por el valor umbral $RSRP_{Th} = -110$ dBm. Estos resultados son aplicables para diferentes valores de cargas de tráfico λS .

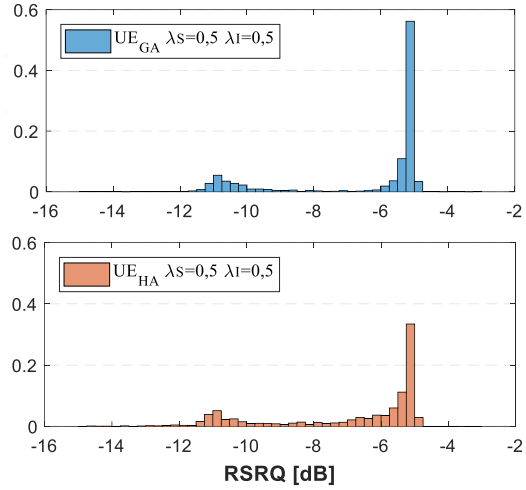
Las Fig. 4.7 b), d) y f) muestran los histogramas de la variable RSRQ para los nodos UE_{HA} y UE_{GA} para las mismas condiciones de evaluación que las Fig. 4.7 a), c) y e), respectivamente. El histograma de RSRQ presenta una distribución bimodal, en donde un modo está centrado en torno a un $RSRQ = -5$ dB y representa los periodos de tiempo con carga de tráfico nula o mínima en el eNB servidor (λS), mientras que el otro modo se centra alrededor de $RSRQ = -11$ dB y representa a un *scheduler* que asigna todos los PRB para satisfacer la demanda de los UE. Esta distribución bimodal de la variable RSRQ es característica de un tráfico tipo ráfaga como el desarrollado por el tráfico FTP. Fijando la atención en el histograma RSRQ asociado al UE_{HA} se aprecia que, aunque pocas, existen colisiones, las cuales en forma general se ubican en rangos inferiores a $RSRQ_{ThFullLoad} \leq -11$ dB. La poca cantidad de colisiones se debe a la baja carga de tráfico del eNB interferente, la cual hace que la probabilidad de colisión sea baja; el número de colisiones se incrementa conforme el tráfico interferente λI aumenta.

Un análisis similar se realiza en la Fig. 4.8 cuando el tráfico considerado es CBR sobre UDP. En este caso, un tráfico a tasa constante en Mbps es solicitado por cada UE a su respectivo eNB. En esta figura, RS representa la tasa objetivo que el eNB servidor trata de satisfacer para cada UE, mientras que RI representa la tasa objetivo que el eNB interferente trata de satisfacer para cada UE asociado a su celda. Las Fig. 4.8 a), c) y e) ilustran el resultado de RSRP vs RSRQ para los dispositivos de prueba UE_{HA} y UE_{GA}. Estas figuras se sobrepone para tener una mejor visualización del efecto que las colisiones tienen sobre la métrica RSRQ. Adicionalmente, las Fig. 4.8 b), d) y f) muestran los histogramas de la variable RSRQ.

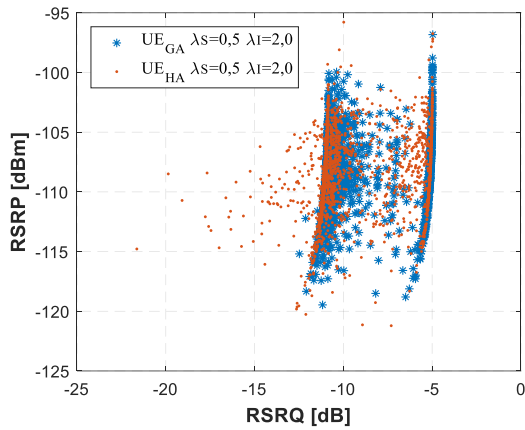
CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA



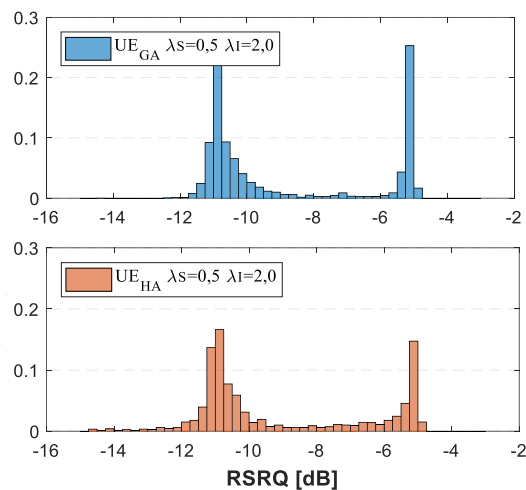
a) RSRP vs RSRQ reportados por UE_{GA} y UE_{HA}, ubicados en Pos. B' y B, $\lambda_S=0,5$ y $\lambda_I=0,5$.



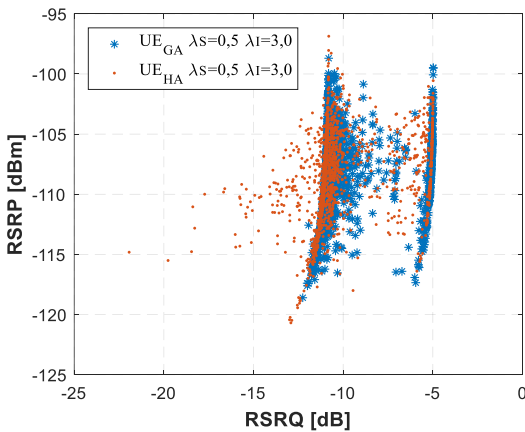
b) Histogramas RSRQ reportados por UE_{GA} y UE_{HA}, ubicados en Pos. B' y B, $\lambda_S=0,5$ y $\lambda_I=0,5$.



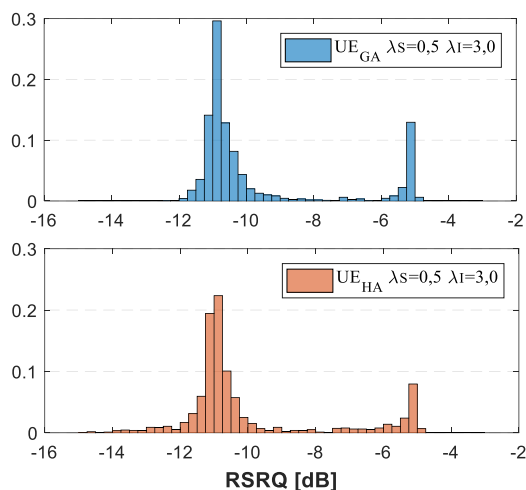
c) RSRP vs RSRQ reportados por UE_{GA} y UE_{HA}, ubicados en Pos. B' y B, $\lambda_S=0,5$ y $\lambda_I=2,0$.



d) Histogramas RSRQ reportados por UE_{GA} y UE_{HA}, ubicados en Pos. B' y B, $\lambda_S=0,5$ y $\lambda_I=2,0$.



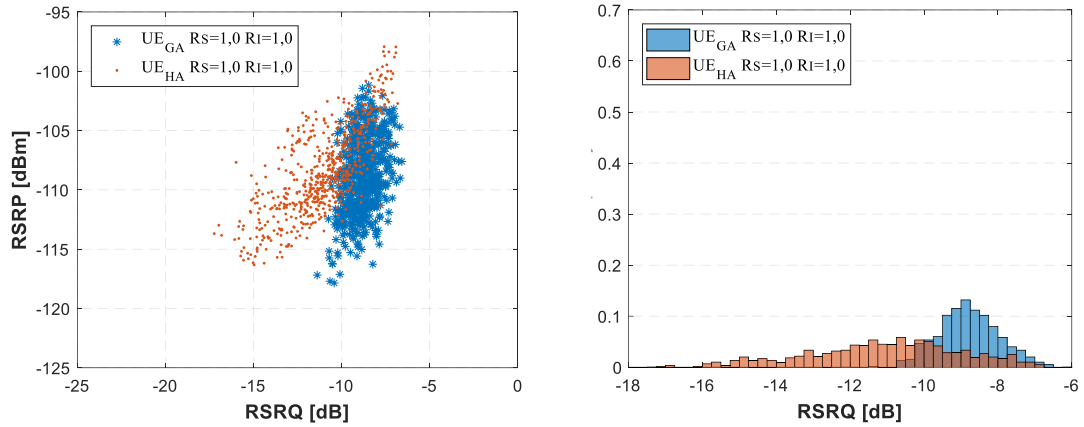
e) RSRP vs RSRQ reportados por UE_{GA} y UE_{HA}, ubicados en Pos. B' y B, $\lambda_S=0,5$ y $\lambda_I=3,0$.



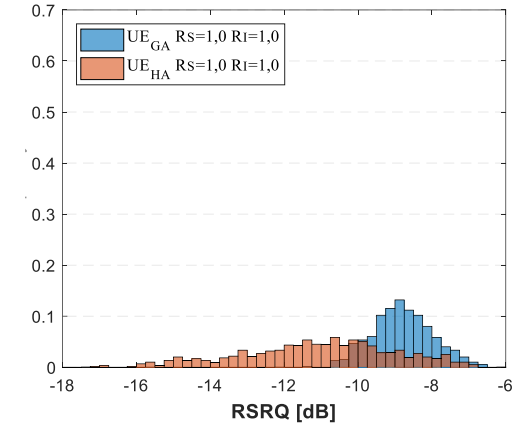
f) Histogramas RSRQ reportados por UE_{GA} y UE_{HA}, ubicados en Pos. B' y B, $\lambda_S=0,5$ y $\lambda_I=3,0$.

Figura 4.7: Las Fig. a), c) y e) muestran RSRP vs RSRQ para UE_{HA} y UE_{GA} ambos a una distancia (B, B'). Fig. b), d) y f) representan histogramas RSRQ para UE_{HA} y UE_{GA} para iguales condiciones que a), b) y c), tráfico FTP (archivos/segundo), escenario LAA LAA.

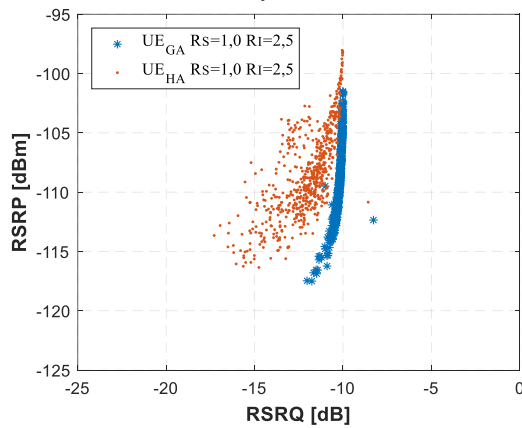
4.2 Algoritmo de Detección de Nodo Oculto Basado en Método Heurístico



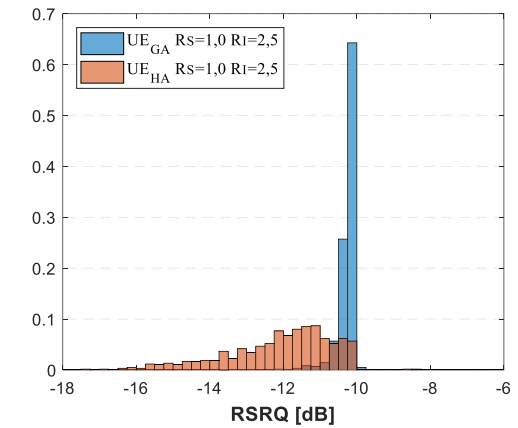
a) RSRP vs RSRQ reportados por UE_{GA} y UE_{HA} , ubicados en Pos. B' y B respectivamente con un $RS=1,0$ y $RI=1,0$.



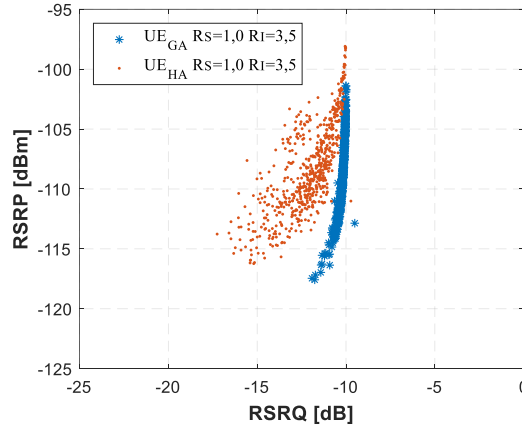
b) Histogramas RSRQ reportados por UE_{GA} y UE_{HA} , ubicados en Pos. B' y B, con un $RS=1,0$ y $RI=1,0$.



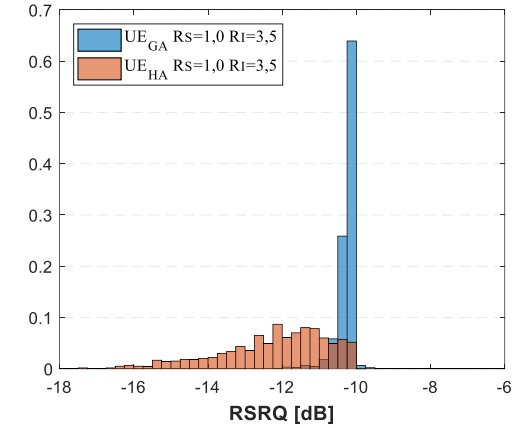
c) RSRP vs RSRQ reportados por UE_{GA} y UE_{HA} , ubicados en Pos. B' y B respectivamente con un $RS=1,0$ y $RI=2,5$.



d) Histogramas RSRQ reportados por UE_{GA} y UE_{HA} , ubicados en Pos. B' y B, con un $RS=1,0$ y $RI=2,5$.



e) RSRP vs RSRQ reportados por UE_{GA} y UE_{HA} , ubicados en Pos. B' y B respectivamente con un $RS=1,0$ y $RI=3,5$.



f) Histogramas RSRQ reportados por UE_{GA} y UE_{HA} , ubicados en Pos. B' y B, con un $RS=1,0$ y $RI=3,5$.

Figura 4.8: RSRP vs RSRQ e histogramas RSRQ. Las Fig. a), c) y e) muestran RSRP vs RSRQ para UE_{HA} y UE_{GA} a una distancia (B, B'). Fig. b), d) y f) representan los histogramas RSRQ para UE_{HA} y UE_{GA} para iguales condiciones que a), c) y e), tráfico UDP, escenario LAA LAA.

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

Los datos que provienen de UE_{HA} y UE_{GA} no presentan el comportamiento bimodal típico de los escenarios con tráfico tipo ráfaga (FTP). En cambio, para el tráfico a tasa constante, los valores mostrados en las figuras RSRP vs RSRQ se encuentran dispersos, mostrando los diferentes niveles de ocupación de los RE en el interior de los PRB. Estas figuras permiten apreciar la diferencia que se desarrolla entre los datos provenientes del nodo UE_{HA} y aquellos que proceden del nodo UE_{GA} . Así pues, para los datos provenientes de UE_{GA} y comparando los resultados de la Fig. 4.8 a) con aquellos de las Fig. 4.8 c) y e) se observa que la desviación estándar de estas dos últimas figuras es menor en comparación con la primera. El motivo principal es que a pesar de tener un tráfico en el eNB constante ($R_s=1,0$ Mbps), se produce un elevado número de colisiones y por ende retransmisiones originadas por una interferencia constante sobre el UE_{HA} , la cual se incrementa en las Fig. 4.8 c) y e). Por este motivo, aunque la interferencia no incide sobre los nodos UE_{GA} y considerando que el tráfico R_s se mantiene constante e igual a 1,0 Mbps para las Fig. 4.8 a), c) y e), el incremento en el tráfico R_I implica un aumento en el efecto de la interferencia sobre los UE_{HA} , lo que a su vez incide en un aumento de los recursos demandados al eNB servidor (retransmisiones y nuevas transmisiones), lo que presiona al número de PRB disponibles para el resto de UE que se encuentran en zonas libre de colisión. El incremento de la interferencia genera retransmisiones sobre los UE_{HA} , de tal modo que el eNB alcanza fácilmente el estado de *Full Load*, lo que provoca que el RSRQ reportado por los UE_{GA} (a pesar de no ser afectados directamente por la interferencia) perciban su efecto sobre en el nivel de RSRQ mínimo (en torno a -11 dB), lo que corresponde a un escenario de $RSRQ_{Full\ load}$.

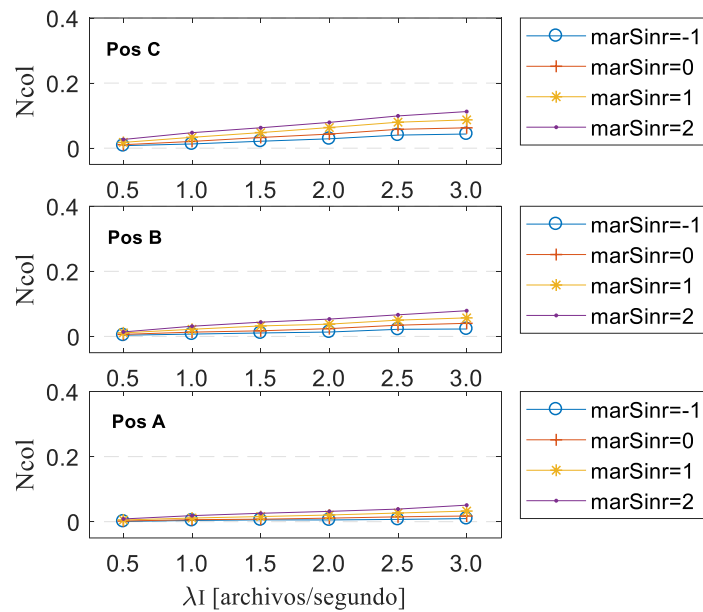
Al analizar los resultados del nodo UE_{HA} se puede apreciar que en las Fig. 4.8 a) y b) para un tráfico $R_s = 1,0$ Mbps y $R_I = 1,0$ Mbps, el rango de los datos reportados por RSRQ varía desde [-18, -6] dB aproximadamente, notando fácilmente que el efecto de las colisiones sobre el UE_{HA} no provoca la saturación del eNB servidor, debido principalmente a la baja carga del tráfico interferente R_I . Sin embargo, en las Fig. 4.8 c) con d) y e) con f) se aprecia que el valor de RSRQ reportado por el UE_{HA} varía en el rango [-18, -10] dB, aproximadamente. El valor de -10 dB para RSRQ se debe a que el eNB servidor se encuentra en el estado *Full Load* como se destacó en el párrafo anterior debido a las constantes colisiones y retransmisiones en conjunto con tráfico nuevo que son solicitados por los UE ubicados en zona libre de colisión, mientras que los valores de RSRQ reportados por el UE_{HA} disminuyen hasta en torno de los -18 dB debido específicamente al efecto de las colisiones sobre este nodo.

4.2.2 Resultados del algoritmo DCD en la detección de colisiones

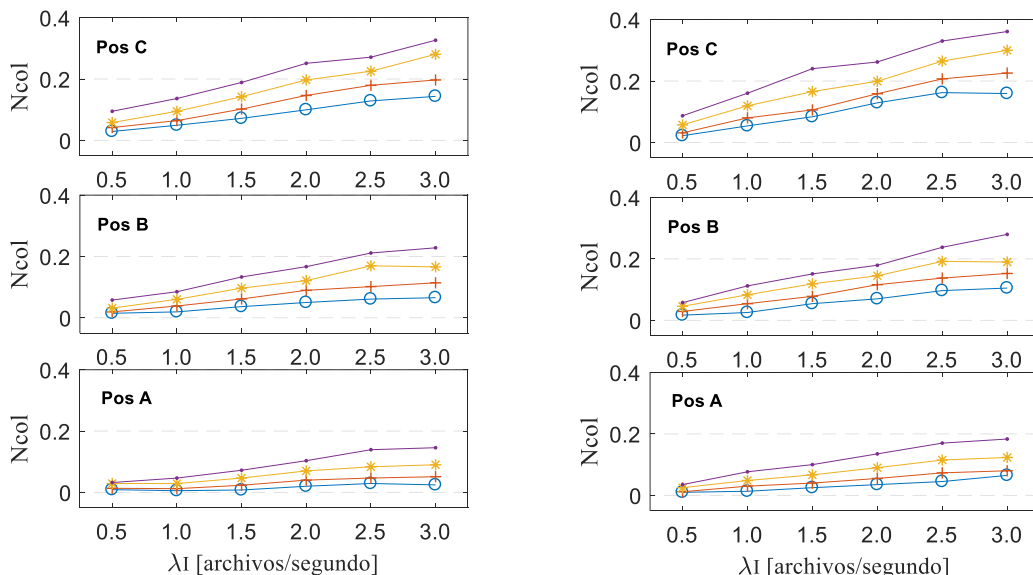
A continuación, se procede a la evaluación del algoritmo DCD para diferentes escenarios y condiciones de simulación, permitiendo de este modo validar su desempeño y la consistencia de los resultados. La Fig. 4.9 representa el porcentaje de veces que el algoritmo DCD determina que un UE_{HA} es categorizado como afectado por colisiones (N_{col}). Por ejemplo, $N_{col}=0,2$ indica que el algoritmo DCD ha detectado que 20% de las muestras

4.2 Algoritmo de Detección de Nodo Oculto Basado en Método Heurístico

(1 muestra es obtenida cada 200 ms) adquiridas durante todo el tiempo de simulación corresponde a colisiones. Las estadísticas mostradas en la Fig. 4.9 provienen del nodo de prueba UE_{HA} para el escenario LAA LAA (Fig. 3.1 a.1)) cuando un tipo de UE se encuentra en zona oculta ($UE_{HA\ ser}$). El objetivo es evaluar el efecto del valor seleccionado de $marSinr$ para diferentes condiciones de tráfico en el eNB servidor e interferente. Los resultados corresponden al escenario con un tráfico FTP con valores independientes y variables de tráfico λ_S y λ_I .



a) Número de colisiones (N_{col}) para $\lambda_S=0,5$ y λ_I variable, los datos provienen del UE_{HA} para las posiciones A, B y C, tráfico FTP



b) N_{col} para $\lambda_S=2,0$ y λ_I variable, los datos provienen del UE_{HA} para las posiciones A, B y C, tráfico FTP

c) N_{col} para $\lambda_S=3,0$ y λ_I variable, los datos provienen del UE_{HA} para las posiciones A, B y C, tráfico FTP

Figura 4.9: Número de colisiones vs tráfico λ_I para $UE_{HA\ ser}$. Tráfico FTP, escenario LAA LAA con un solo tipo de nodo en zona oculta.

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

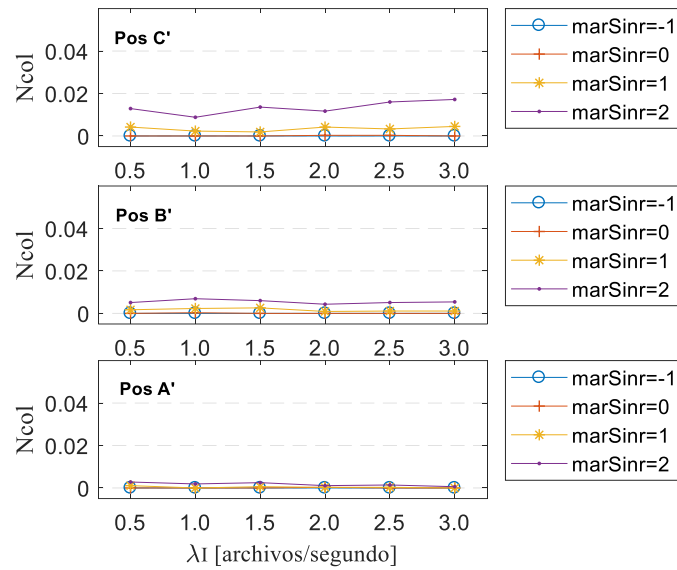
La Fig. 4.9 tiene 3 ventanas a), b), y c). La Fig. 4.9 a) ilustra el valor de N_{col} para el UE_{HA} con $\lambda_S=0,5$ y un valor de λ_I que se incrementa desde un valor de 0,5 hasta 3,0 archivos/segundo para diferentes valores de $marSinr$ (-1, 0, 1 y 2). La Fig. 4.9 a) a su vez está subdividida en 3 ventanas: la ventana superior corresponde al caso cuando el UE_{HA} está ubicado en la posición C (Mala cobertura y alta interferencia), la ventana intermedia representa los datos cuando el UE_{HA} está en B (cobertura e interferencia intermedia) y la ventana inferior es cuando el UE_{HA} se encuentra en A (Buena cobertura y baja interferencia) en relación con el eNB servidor. El eje X representa el tráfico interferente λ_I cuando se aplica un modelo FTP, mientras que el eje Y muestra el porcentaje de veces que el UE_{HA} fue calificado por el algoritmo DCD como enfrentando colisiones. Las Fig. 4.9 b) y c) muestra los resultados obtenidos para un tráfico $\lambda_S=2$ y $\lambda_S=3$, respectivamente. Comparando el número de colisiones mostrado en las 3 ventanas de la Fig. 4.9 a), b) y c) se aprecia que $N_{col_{PosC}} > N_{col_{PosB}} > N_{col_{PosA}}$. Esto se debe al hecho de que mientras el UE_{HA} se acerca a su nodo servidor la probabilidad de colisión se ve reducida.

Adicionalmente, la Fig. 4.9 indica que el N_{col} crece linealmente conforme los tráficos λ_S y λ_I se incrementan también linealmente. Sin embargo, el principal reto es la selección del valor adecuado para $marSinr$. Los resultados dependen en gran medida de la correcta selección de este margen, el cual se seleccionará mediante la comparación de resultados con aquellos que se obtienen para el UE_{GA} bajo similares condiciones de simulación.

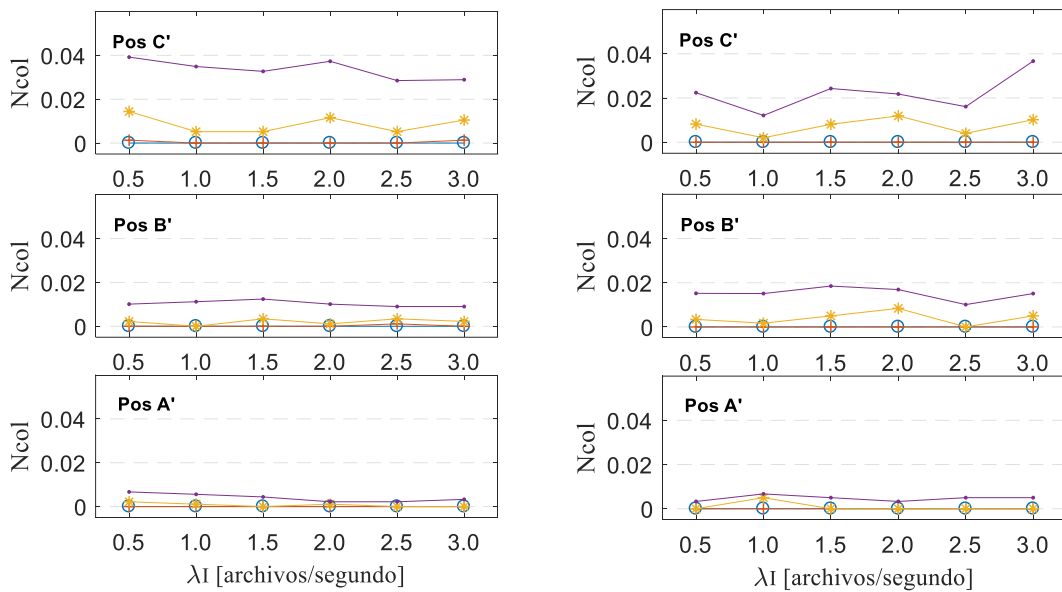
A continuación, la Fig. 4.10 muestra los resultados de N_{col} para el nodo de prueba UE_{GA} en condiciones similares que las descritas para la Fig. 4.9. Teóricamente, el número de colisiones para el UE_{GA} debería ser igual a cero, ya que no existe ninguna fuente de interferencia en torno a este nodo. Sin embargo, factores como la posición del UE al borde de la celda y el desplazamiento del UE_{GA} hace que en ciertas ocasiones el UE sea evaluado como que el UE entra en área de *handover*. Adicionalmente, las pérdidas debidas a NLOS y a muy malas condiciones del canal hacen que en ciertas ocasiones la señal recibida en el UE vaya por debajo del límite impuesto por $marSinr$ (especialmente cuando el UE está en el extremo del límite de cobertura) y, en consecuencia, al aplicar el algoritmo DCD la señal débil recibida es evaluada como una falsa colisión.

En resumen, la Fig. 4.10 permite apreciar que las falsas colisiones se incrementan conforme el dispositivo evaluado se aproxima a los límites del área de cobertura, en especial cuando está en la subárea C'. Esto se debe a que los errores en la detección son comunes al encontrarse en el límite de la cobertura de la celda, en donde valores altos de desvanecimientos, la no linealidad en las métrica RSRQ y los valores promedios de las métricas empleadas, dificultan la tarea del algoritmo. Entonces, si se selecciona un valor de $marSinr = 2$, el algoritmo DCD es más propenso a evaluar erróneamente que el UE_{GA} está enfrentando colisiones. Así también. La Fig. 4.10 permite ver que de manera general valores de $marSinr$ igual a -1 o 0 obtienen un buen resultado, reduciendo el número de falsas colisiones (logrando porcentajes de error cercanos a cero) para el UE_{GA} para todas las combinaciones de tráfico y posiciones ilustradas en las diferentes ventanas que forman parte de esta figura.

4.2 Algoritmo de Detección de Nodo Oculto Basado en Método Heurístico



a) N_{col} para $\lambda_S = 0.5$ y λ_I variable, los datos provienen del UE_{GA} para las posiciones A', B' y C', tráfico FTP



b) N_{col} para $\lambda_S = 2.0$ y λ_I variable, los datos provienen del UE_{GA} para las posiciones A', B' y C', tráfico FTP

b) N_{col} para $\lambda_S = 3.0$ y λ_I variable, los datos provienen del UE_{GA} para las posiciones A', B' y C', tráfico FTP

Figura 4.10: Número de colisiones vs tráfico λ_I para UE_{GA} ser. Tráfico FTP, escenario LAA LAA con un solo tipo de nodos en zona oculta.

Haciendo una comparación general entre los resultados obtenidos para UE_{GA} y UE_{HA} se puede concluir que fijando el valor de $marSinr$ menor que 2 dB, el algoritmo DCD detecta las colisiones en los nodos UE_{HA} y reduce el número de falsas colisiones en UE_{GA} . Ahora, para decidir cuál es el mejor valor de $marSinr$, se procede a evaluar el rendimiento del algoritmo DCD por medio de un banco de pruebas, en el cual se determina la cantidad de veces que el algoritmo evalúa un evento como colisión en relación al número real de colisiones para diferentes valores de $marSinr$ igual a -1, 0 y 1.

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

Se define que una colisión verdadera ocurre cuando el eNB servidor y el eNB interferente transmiten simultáneamente y la diferencia de potencia percibida en recepción, (en el UE_{HA}) entre la señal útil y la señal interferente está por debajo de cierto valor umbral. Idealmente, un valor umbral ≤ 0 dB significa que la potencia promedio interferente es al menos igual o mayor que potencia promedio que arriba del nodo servidor dentro de la ventana de evaluación (200 ms). Entonces, para minimizar los problemas debido al uso de potencias promedio y considerar todas las interferencias que pueden alcanzar al UE bajo prueba, se considera que un umbral de 2 dB es un valor adecuado para determinar que a partir de este valor umbral un dispositivo es evaluado como enfrentando colisiones. Por otro lado, el algoritmo DCD considera dos métricas: un valor umbral $RSRQ_{avTh}$ en función de $margin$ y TCQI por encima del umbral de $TCQIMin$ para evaluar cuándo las colisiones están sucediendo sobre un UE en específico. En el contexto del algoritmo DCD, una colisión ocurrirá cuando el UE ubicado en zona oculta reporte métricas de RSRQ y CQI que en forma simultánea superan los valores umbrales establecidos dentro del periodo de duración de una ventana de muestreo.

Para la evaluación del rendimiento del algoritmo DCD se hace uso de dos medidas que son comunes en problemas de clasificación tales como son la sensibilidad y la precisión, las cuales se definen a continuación:

Sensibilidad: Es el porcentaje de colisiones correctamente detectadas de entre el número de colisiones ocurridas (colisiones detectadas y no detectadas).

$$Sensibilidad = \frac{Verdaderos\ Positivos}{Verdaderos\ Positivos + Falsos\ Negativos} \quad (4.14)$$

Precisión: Es el porcentaje de colisiones correctamente identificadas de entre todos los eventos clasificados como colisiones:

$$Precisión = \frac{Verdaderos\ Positivos}{Verdaderos\ Positivos + Falsos\ Positivos} \quad (4.15)$$

Ambas métricas varían desde 0% (malo) a 100% (óptimo). Nótese que una alta precisión es útil si viene acompañado por una alta sensibilidad y viceversa.

Cualquier UE que opera en banda no licenciada puede presentar dos estados con respecto a la presencia de terminales ocultos, los cuales son: colisión o libre de colisión. En el caso de los nodos UE_{HA} las métricas de sensibilidad y precisión definen a un verdadero positivo cuando el UE_{HA} fue evaluado como enfrentando colisiones cuando efectivamente existe una colisión durante la ventana de evaluación. En cambio, los nodos UE_{GA} no son afectados por las interferencias provenientes de terminales ocultos y por tanto las métricas de sensibilidad y precisión se asocian a evaluar cuántas veces este nodo fue evaluado correctamente como libre de colisión. Entonces, un verdadero positivo para los terminales UE_{GA} corresponde al

4.2 Algoritmo de Detección de Nodo Oculto Basado en Método Heurístico

caso que este terminal fue evaluado correctamente como en estado libre de colisión durante la ventana de evaluación.

La Fig. 4.11 muestra los resultados de las medidas de sensibilidad y precisión realizadas en diferentes escenarios y condiciones de simulación. La Fig. 4.11 a) ilustra los resultados que provienen de las Fig. 4.10 y 4.9 y que corresponden al caso cuando existen UE en zona oculta que pertenecen solo al nodo servidor $UE_{HA\ ser}$, cuando el tráfico considerado corresponde a uno tipo ráfaga denominado FTP. La Fig. 4.11 b) muestra los resultados cuando el tráfico es FTP y existen UE en zona oculta que pertenecen tanto al nodo servidor ($UE_{HA\ ser}$) como al nodo interferente ($UE_{HA\ int}$). La Fig. 4.11 c) corresponde al caso de un tráfico a tasa constante denominado UDP en donde se seleccionan diferentes tasas de transmisión y el área oculta tiene un solo tipo de nodos ocultos ($UE_{HA\ ser}$). La Fig. 4.11 d) detalla los resultados de sensibilidad y precisión para un escenario que considera un tráfico UDP con UE en zona oculta que pertenecen al eNB servidor y al interferente. Todas las figuras corresponden al escenario de coexistencia LAA LAA.

La Fig. 4.11 a) tiene dos figuras: la superior muestra los resultados para los UE_{HA} , mientras que la figura inferior muestra los resultados para los UE_{GA} para diferentes valores de umbral $marSinr$ en el eje de las abscisas. Se debe notar que para obtener el rendimiento global se ha calculado la sensibilidad promedio de las sensibilidades individuales provenientes de todas las posibles combinaciones de tráfico λ_S y λ_I , las cuales toman valores como 0,5; 1; 1,5; 2,0; 2,5 y 3,0 archivos/segundo en conjunto con todas las combinaciones de posiciones (subáreas A, B y C) para el UE_{HA} y (subáreas A', B' y C') para el UE_{GA} ; situación similar se aplica para las Fig. 4.11 b), c) y d). Entonces, considerando que las medidas de sensibilidad y precisión son útiles cuando ambas presentan simultáneamente un valor cercano al óptimo, la Fig. 4.11 a) para el caso de UE_{HA} obtiene el mejor resultado cuando el valor de $marSinr=0$, mientras que para el caso de UE_{GA} prácticamente cualquiera de los valores de $marSinr$ tiene buenos resultados.

Resultados similares se obtienen para las Fig. 4.11 b), c) y d) a pesar de que estas figuras corresponden a diferentes tipos de tráfico y número de UE en zona oculta. Es decir, evaluando los resultados de sensibilidad y precisión para todos los escenarios detallados en la Fig. 4.11, se concluye que el valor de $marSinr=0$ tiene en promedio el mejor rendimiento de precisión y sensibilidad para todas las condiciones de tráfico y posiciones descritas, mientras que los otros valores de $marSinr$ tal vez pueden destacar en uno de los parámetros evaluados (sensibilidad o precisión) lo cual no es suficiente para ser seleccionados en base a los requerimientos anteriormente descritos.

Cuando $marSinr=0$ se observa que los valores de sensibilidad y precisión tienen un valor promedio sobre el 95% para los UE_{HA} y UE_{GA} , lo que implica que el algoritmo DCD clasifica correctamente sobre el 95% de las veces cuándo un UE está sufriendo de colisiones y en torno a un 100% de las veces cuándo un UE está sometido solamente a malas condiciones del canal.

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

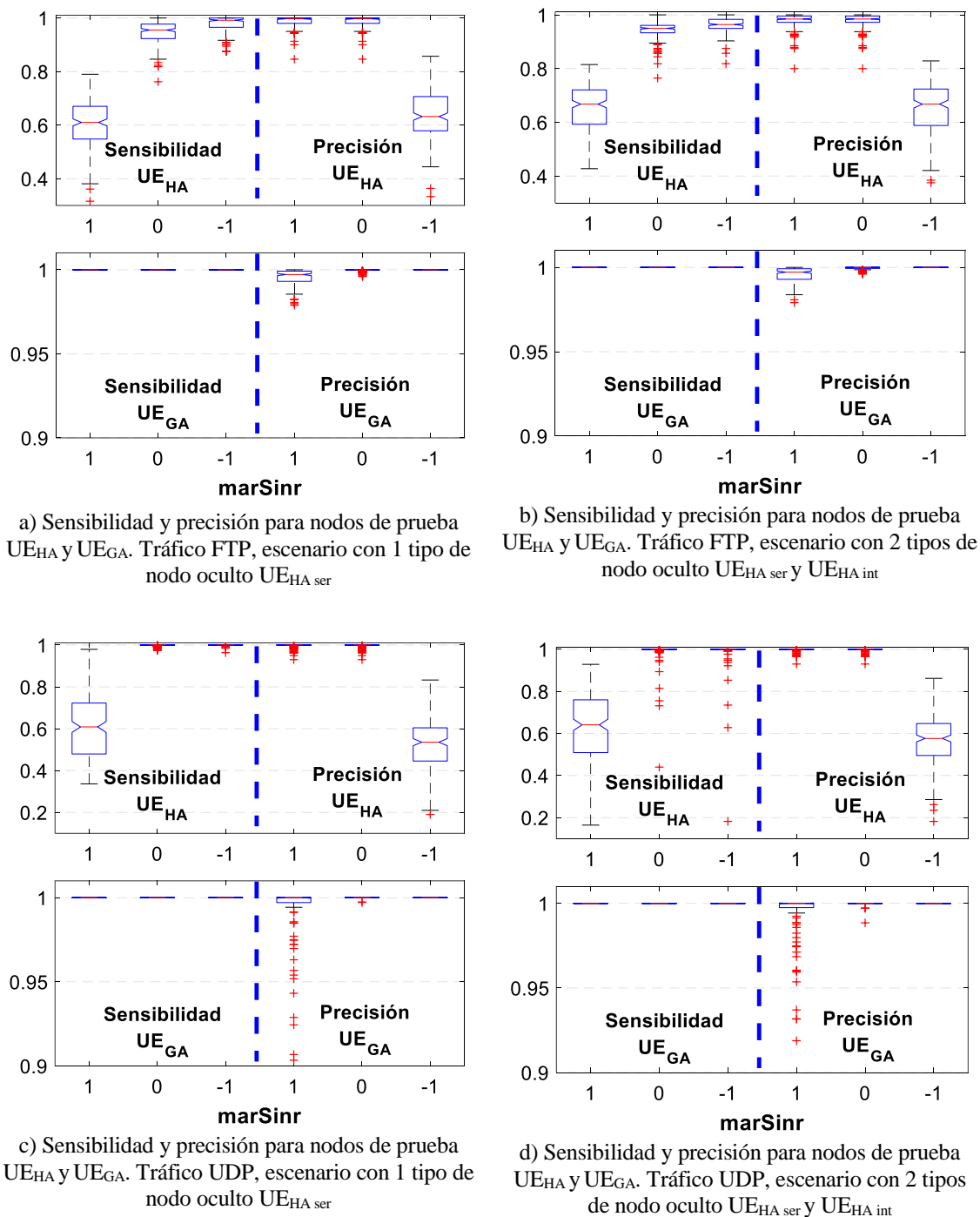
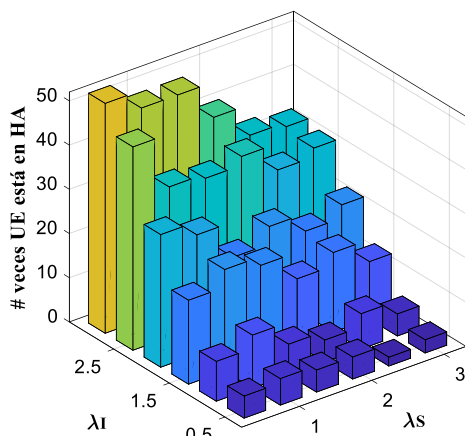


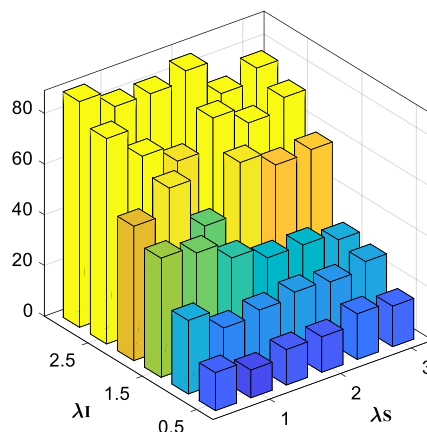
Figura 4.11: Sensibilidad y Precisión para nodos de prueba UE_{HA} y UE_{GA} . Para tráfico tipo ráfaga (FTP) y tráfico a tasa constante (UDP) para coexistencia LAA LAA con uno ($UE_{HA\ ser}$) y dos tipos de nodos ($UE_{HA\ ser}$ y $UE_{HA\ int}$) en zona oculta.

Finalmente, la Fig. 4.12 muestra el histograma del número de veces que un UE es juzgado como que está ubicado dentro de zona oculta mediante la variable ($NumUE_{HA}$) de acuerdo a los valores obtenidos por la bandera $UeHA$. Las Fig. 4.12 a), c) y e) muestran los resultados para la variable $NumUE_{HA}$ en los escenarios que corresponden a un solo tipo de nodo oculto ($UE_{HA\ ser}$) para las posiciones A, B y C. En forma similar las Fig. 4.12 b), d) y f) muestran los resultados para la misma variable, con condiciones similares de simulación que su contraparte de las Fig. 4.12 a), c) y e), con la diferencia de que existen dos tipos de nodos

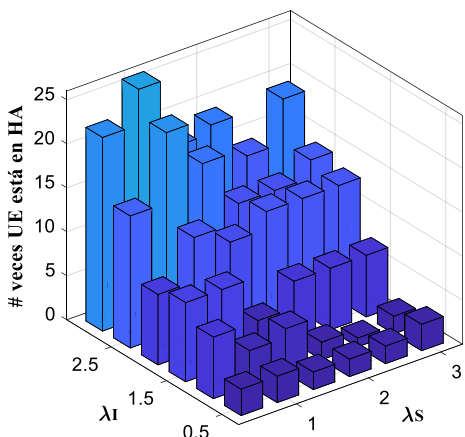
4.2 Algoritmo de Detección de Nodo Oculto Basado en Método Heurístico



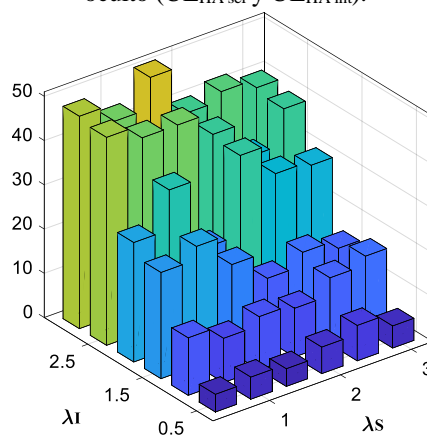
a) Veces que $UE_{HA\ ser}$ es evaluado en zona oculta. Pos. C (Mala cobertura y fuerte interferencia). Escenario un solo nodo oculto ($UE_{HA\ ser}$).



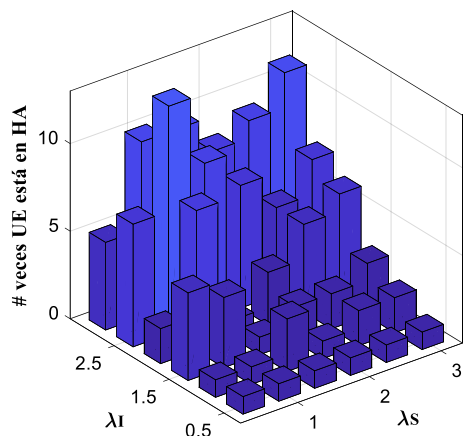
b) Veces que $UE_{HA\ ser}$ es evaluado en zona oculta. Pos. C (Mala cobertura y fuerte interferencia). Escenario dos tipos nodos oculto ($UE_{HA\ ser}$ y $UE_{HA\ int}$).



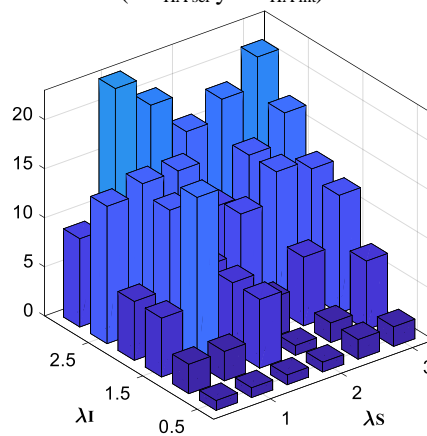
c) Veces que $UE_{HA\ ser}$ es evaluado en la zona oculta. Pos. B (Cobertura e interferencia media). Escenario un solo nodo oculto ($UE_{HA\ ser}$).



d) Veces que $UE_{HA\ ser}$ es evaluado en zona oculta. Pos. B (Cobertura e interferencia media). Escenario dos tipos nodos oculto ($UE_{HA\ ser}$ y $UE_{HA\ int}$).



e) Veces que $UE_{HA\ ser}$ es evaluado en zona oculta. Pos. A (Buena cobertura y baja interferencia). Escenario un solo nodo oculto ($UE_{HA\ ser}$).



f) Veces que $UE_{HA\ ser}$ es evaluado en zona oculta. Pos. A (Buena cobertura y baja interferencia). Escenario dos tipos nodos oculto ($UE_{HA\ ser}$ y $UE_{HA\ int}$).

Figura 4.12: Número de veces que el algoritmo DCD determina que el UE_{HA} está localizado en el interior de una zona oculta. Escenario de coexistencia LAA LAA, tráfico tipo ráfaga FTP.

ocultos ($UE_{HA_{ser}}$ y $UE_{HA_{int}}$). Estos resultados corresponden a un modelo de tráfico tipo ráfaga (FTP). Como se esperaba, el número de veces que el algoritmo determina que un UE está en zona oculta ($NumUE_{HA}$) se incrementa cada vez que el tráfico λ_I aumenta para el tráfico FTP. Además, el $NumUE_{HA}$ para el caso de dos tipos de UE_{HA} es mayor en comparación a cuando solo se tiene UE en zona oculta que pertenecen solamente al nodo servidor. Esto se debe a una mayor COT de ambos eNB, que provoca un mayor número de colisiones sobre las celdas servidora e interferente cuando cada celda tiene sus propios UE ubicados en zona oculta. No se ha considerado mostrar las gráficas correspondientes a los nodos UE_{GA} , ya que el número de veces que el algoritmo DCD evalúa que estos nodos enfrentan colisiones es prácticamente cero.

4.3 Algoritmo de Detección de Nodo Oculto Basado en Métodos de Aprendizaje Automático

A continuación, se analiza el uso de técnicas basadas en algoritmos de aprendizaje automático, también conocidos como ML (*Machine Learning*), como alternativa al uso de métodos heurísticos para identificar a UE en redes LAA que están siendo afectados por colisiones provenientes de terminales ocultos. Se estudiarán diferentes modelos de ML basados en aprendizaje supervisado para clasificar a los UE en dos categorías: UE afectados por colisiones y UE libres de colisiones. Para su implementación, se usan las mismas métricas definidas y estudiadas para el caso del método heurístico y que están definidas en el estándar de LTE, tales como: CQI, RSRP, RSRQ y número de PRB. Estos parámetros alimentan a diferentes modelos de aprendizaje automático, los cuales, una vez optimizados, proporcionan los mejores modelos para predecir cuándo un UE en movimiento está afectado por interferencias sobre un canal que considera los desvanecimientos lentos y rápidos. Posteriormente, se realizará una comparación en el desempeño de los algoritmos de ML con el algoritmo heurístico.

Los avances significativos que las técnicas de ML han alcanzado en los últimos años, en conjunto con las técnicas asociadas a redes neuronales (NN), han atraído la atención de los investigadores en las áreas de las comunicaciones inalámbricas y *networking*, ya que, con el desarrollo de los dispositivos inteligentes y aplicaciones móviles, estos han permitido el incremento de la autonomía de la red inalámbrica, así como el del nivel de interacción de los humanos con los sistemas de comunicaciones inalámbricas. Además, el desarrollo de tecnologías *edge computing* y *caching* sobre la infraestructura celular ha permitido almacenar y analizar los comportamientos generados por sus usuarios en el interior de sus celdas a nivel de cada estación base. Adicionalmente, el surgimiento del

4.3 Algoritmo de Detección de Nodo Oculto Basado en Métodos de Aprendizaje Automático

Internet de las cosas ha motivado el uso de las NN para mejorar el modo en que los datos inalámbricos son procesados, almacenados y usados para varios propósitos.

Las técnicas ML y NN en el ámbito de las redes de comunicaciones inalámbricas tienen una amplia variedad de aplicaciones para la detección, identificación y clasificación de eventos de muy diverso tipo. En este caso en particular se evalúa la probabilidad de detectar que un dispositivo móvil está siendo afectado por colisiones provenientes de terminales ocultos. Además, se evalúan factores como la fiabilidad de la detección, la complejidad de la implementación de la solución y los tiempos de retardo para que el algoritmo genere una respuesta. Este último es un parámetro útil para aplicaciones sensibles al retardo, tanto para los algoritmos heurísticos como aquellos basados en técnicas de aprendizaje automático.

En resumen, el estudio realizado en este apartado tiene como objetivo evaluar la precisión de diferentes algoritmos de ML y NN para detectar a UE afectados por interferencias que provienen de nodos ocultos en un contexto de redes LAA, trabajando en el canal no licenciado en la banda de 5 GHz. Los algoritmos de ML y redes neuronales son entrenados con las métricas RSRQ, CQI y nivel de ocupación PRB, bajos las mismas condiciones de simulación aplicadas al algoritmo heurístico DCD en la sección anterior. De este modo, es posible realizar la comparación entre las diferentes soluciones, detallando sus debilidades y fortalezas.

4.3.1 Análisis del conjunto de datos

Para llevar a cabo la comparación entre los métodos de detección de colisiones DCD y los desarrollados usando técnicas de ML, se procede a usar los mismos escenarios de simulación con idénticas condiciones de simulación que las que fueron detalladas en el capítulo 3 y aplicadas para el desarrollo del algoritmo heurístico DCD. De este modo, se prueba la exactitud de la clasificación para un amplio espectro de valores de SINR en conjunto con diferentes niveles de carga de tráfico que afectan a los nodos de prueba tanto en la celda servidora como en la celda interferente. La manipulación de una amplia variedad de parámetros críticos en cada una de las realizaciones ha permitido generar un conjunto de datos de buena calidad necesarios en el desarrollo de técnicas de ML.

Estos datos sintéticos son extraídos de cada una de las realizaciones aplicadas a los diferentes escenarios mediante extensivas campañas de simulación, en donde el registro de cada parámetro asociado a cada UE en el interior de la celda y su respectivo eNB se realizan en intervalos de 200 ms. Además, los campos de los registros son aquellos definidos en el estándar LTE, lo que permite garantizar la disponibilidad y generalidad de los mismos, así como la aplicabilidad de las conclusiones obtenidas en esta tesis sobre cualquier red LAA. El conjunto de datos generados por las diferentes campañas de simulación corresponde a los datos provenientes de los UE y eNB pertenecientes a la celda servidora que pertenecen a la red LAA y que opera en la banda compartida en el segmento de DL del espectro.

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

El conjunto de datos o *dataset* que se analiza corresponde a los datos recolectados de los nodos de prueba UE_{HA} y UE_{GA} para los escenarios LAA LAA y LAA Wi-Fi. El *dataset* se origina de la unión de varias realizaciones individuales, en donde cada realización modifica individualmente cada uno de los elementos de un conjunto de parámetros tales como: diferentes valores de carga de tráfico para la celda servidora e interferente, lo que permite generar un amplio espectro de valores de SINR, en ambientes con LOS y NLOS, con diferentes ubicaciones para los UE_{HA} y UE_{GA} al borde de la celda; dos tipos de tráfico (ráfaga, CBR); la presencia de un tipo ($UE_{HA\ ser}$) o varios tipos de nodos en la zona oculta ($UE_{HA\ ser}$, $UE_{HA\ int}$, $STA_{HA\ int}$) asociados a la celda servidora o interferente; etc.

Para cada uno de los nodos de prueba (UE_{HA} y UE_{GA}), las muestras individuales que pertenecen a cada campo del registro son generadas durante cada ventana de muestreo de 200 ms durante todo el tiempo de simulación para cada realización, usando todas las combinaciones posibles de parámetros, como se detalló en la sección de modelamiento de la red del apartado 3.2.1. Las muestras están compuestas de cuatro campos correspondientes a las métricas RSRP, RSRQ, TCQI (que provienen de los UE) y PRBr (que proviene del eNB servidor).

El tamaño de la ventana de muestreo ha sido seleccionado para que sea igual al intervalo de tiempo empleado para los reportes de las medidas de RSRP y RSRQ generados por los UE, de tal modo que se respalda a otros procedimientos de radio tal como reelección de celda o *handovers*. Cabe recordar que RSRP y RSRQ son medidas de capa física definidas en el estándar, donde, como se indicó anteriormente, no se aplica el filtro de capa 3. El cociente PRBr corresponde a la medida de nivel de uso de PRB definida en la Sección 4.1.1 de la especificación [112]. Así también, TCQI(L) es obtenido del procesamiento de los CQI recibidos en el eNB y reportados por los UE asociados a la celda, de acuerdo con la definición establecida en la ecuación (4.1). El alto número de muestras provenientes de una diversidad de escenarios, junto con la alta flexibilidad para la configuración de los parámetros de simulación en cada realización, permite obtener un *dataset* de alta calidad y con un elevado número de registros que serán muy útiles para el entrenamiento de los algoritmos de ML, lo cual permite alcanzar un alto rendimiento en los clasificadores analizados.

Los datos recolectados por cada UE tienen asociados una etiqueta que identifica la condición de colisión o libre de colisión durante la ventana temporal de 200 ms. Por ejemplo, la etiqueta para los datos provenientes del UE en zona libre de colisión solo puede tener la etiqueta de libre de colisión, mientras que los datos provenientes del UE en zona oculta cambian su etiqueta dependiendo de si es o no afectado por alguna interferencia durante la ventana temporal de 200 ms. Una vez que el conjunto de métricas relacionadas con la detección de colisiones ha sido identificado, se estudia cómo estas se relacionan estadísticamente con el problema del nodo oculto.

4.3.1.1 Análisis estadístico asociado al problema de nodo oculto

A continuación, se evalúa cómo las variables RSRP y RSRQ se asocian estadísticamente con el problema del nodo oculto, con el fin de determinar las variables más útiles en la detección de la ocurrencia de colisiones. Las siguientes figuras presentan los resultados obtenidos para los escenarios LAA LAA, siendo estas conclusiones aplicables para el escenario LAA Wi-Fi.

La Fig. 4.13 muestra las funciones de probabilidad (PDF) de la métrica RSRP para los nodos UE_{HA} (Fig. 4.13 a)) y UE_{GA} (Fig. 4.13 b)) respectivamente, para todas las realizaciones asociadas al escenario LAA LAA. El *dataset* para UE_{HA} obtenido mediante simulación ha sido clasificado en dos clases: valores de RSRP cuando el UE es afectado por colisiones (línea naranja) y valores de RSRP asociados a no colisiones (línea azul). En estas figuras se incluye el RSRP total referido como UE_{HA} agregado (combinación del RSRP de colisión y no colisión de los UE ubicados en zona oculta), el cual está representado con un color negro. Se considera que existe una colisión cuando los nodos eNB servidor e interferente transmiten simultáneamente y el receptor es afectado por una interferencia severa, definida aquí como un SINR menor que 2 dB. De este modo, las distribuciones de colisión y libre de colisión son calculadas independientemente.

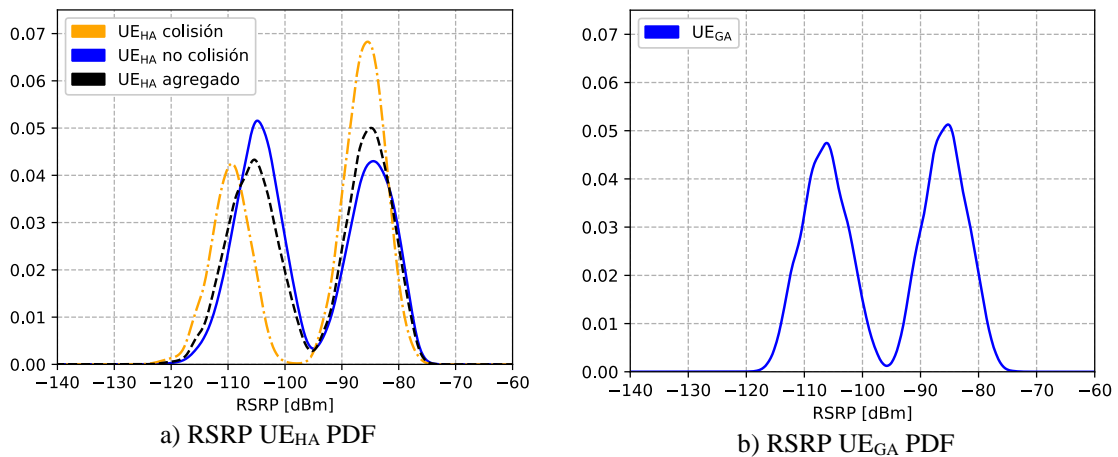


Figura 4.13: Función de densidad de probabilidad (PDF) para las medidas RSRP para los UE_{HA} y UE_{GA} . Escenario LAA LAA.

Como se esperaba para este caso, las estadísticas presentan una distribución bimodal que concuerda con la suma de los datos provenientes de escenarios con LOS y NLOS. Así también, cuando las muestras de colisión y no colisión son agregadas (línea negra), esta PDF agregada se asemeja a la PDF de los UE_{GA} que se muestra en la Fig. 4.13 b). Las PDF de UE_{HA} agregados y UE_{GA} tienen una distribución similar con máximos alrededor de -88 dBm y -108 dBm. Las PDF que se asocian con colisiones están ligeramente desviadas hacia su izquierda, esto se debe a que para ambas condiciones LOS y NLOS un valor bajo de RSRP tiene una mayor probabilidad de alcanzar el valor umbral de SINR para ser clasificado como colisión. En cualquier caso, la distribución de RSRP no permite discernir en gran medida el problema de terminal oculto, ya que las distribuciones RSRP colisión y

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

no colisión están prácticamente solapadas. Por este motivo, solo podemos establecer un valor umbral RSRP sobre el cual se analiza el problema.

Para el mismo escenario LAA LAA, la Fig. 4.14 muestra las PDF del RSRQ obtenido de los UE_{HA} (Fig. 4.14 a)) y de los UE_{GA} (Fig. 4.14 b)), respectivamente. En ambos casos la PDF asociada con los UE_{HA} agregado (línea color negro) y la PDF asociada con no colisiones (UE_{GA} y UE_{HA} no colisión, línea color azul) tienen una distribución bimodal, la cual corresponde al efecto que la carga de tráfico (con o sin carga) inherente a un tráfico tipo ráfaga genera. Las distribuciones para el caso de no colisión de los UE_{GA} y UE_{HA} son similares, pero la desviación estándar del UE_{GA} es menor. Esto se debe a que en promedio los UE_{HA} transmitirán más datos que su contraparte UE_{GA}, debido a un mayor número de retransmisiones de los UE ubicados en la zona oculta. Enfocando la atención en la PDF asociada con colisiones (línea naranja) en el UE_{HA}, se aprecia la existencia de una frontera de decisión, la cual divide la PDF de los RSRQ pertenecientes a UE_{HA} colisión de la PDF de los RSRQ pertenecientes a UE_{HA} no colisión.

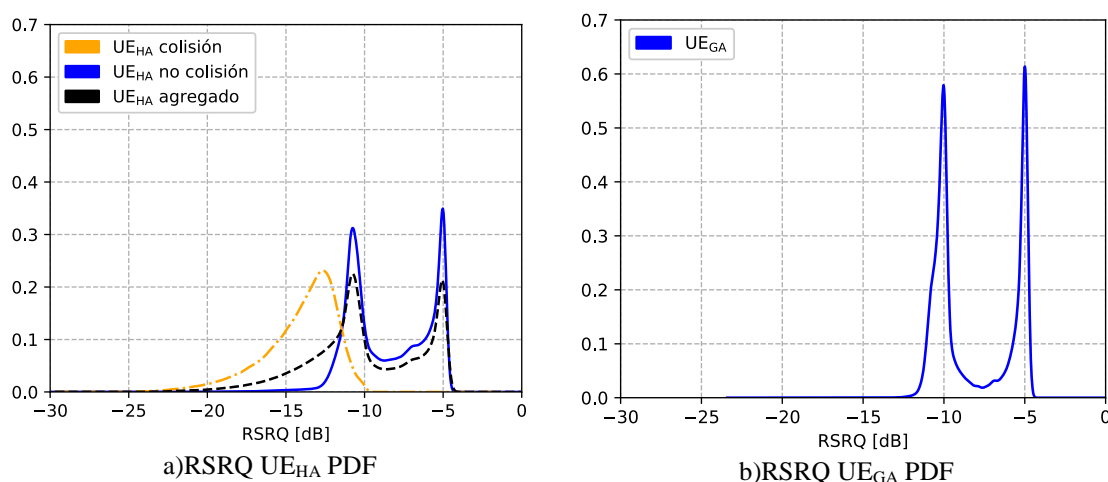


Figura 4.14: Función de densidad de probabilidad (PDF) para las medidas RSRQ tomadas desde UE_{HA} y UE_{GA}. Escenario LAA LAA.

Continuando con el análisis del escenario LAA LAA, la Fig. 4.15 muestra la PDF y la función de distribución acumulativa (CDF) de la variable TCQI. Así pues, la Fig. 4.15 a) muestra la PDF de la métrica TCQI(L) con $L=5$ para los nodos UE_{HA} y UE_{GA}, mientras que la Fig. 4.15 b) ilustra la CDF para los mismos nodos de prueba clasificados en las clases colisión y no colisión.

La Fig. 4.15 a) ilustra que la PDF asociada a colisiones (línea color naranja) crece continuamente conforme el porcentaje TCQI también se incrementa. Este comportamiento se refleja mejor con la CDF (Fig. 4.15 b)), aquí se aprecia cómo la CDF crece conforme el porcentaje TCQI se incrementa siguiendo aproximadamente una tendencia exponencial para los terminales UE_{HA} durante las colisiones. La CDF tiene una probabilidad cercana al 0% para $TCQI(5)=0$ y se incrementa hasta alcanzar 1 cuando la $TCQI(5)=100\%$. Por el contrario, la CDF para UE_{HA} no colisión y UE_{GA} muestra que para todas las realizaciones en el escenario LAA LAA existe una probabilidad mayor que 0,6. Es decir, el 60% de las

4.3 Algoritmo de Detección de Nodo Oculto Basado en Métodos de Aprendizaje Automático

veces estos terminales no tendrán ningún CQI en el rango $0 \leq \text{CQI} \leq 5$. A partir de este valor de probabilidad (mayor que 0,6) su CDF crece, mostrando que estos UE pueden registrar valores de CQI en el rango $[0, 5]$ que corresponde a malas condiciones de canal y llegan a alcanzar una probabilidad cercana a 1 en torno a un $\text{TCQI}(5)=90\%$. Los terminales UE_{GA} solo pueden alcanzar un $\text{TCQI}(5) \geq 80\%$ cuando están ubicados en el borde de las celdas, ingresando prácticamente en la zona de *handover*, en donde enfrentan un pésimo canal.

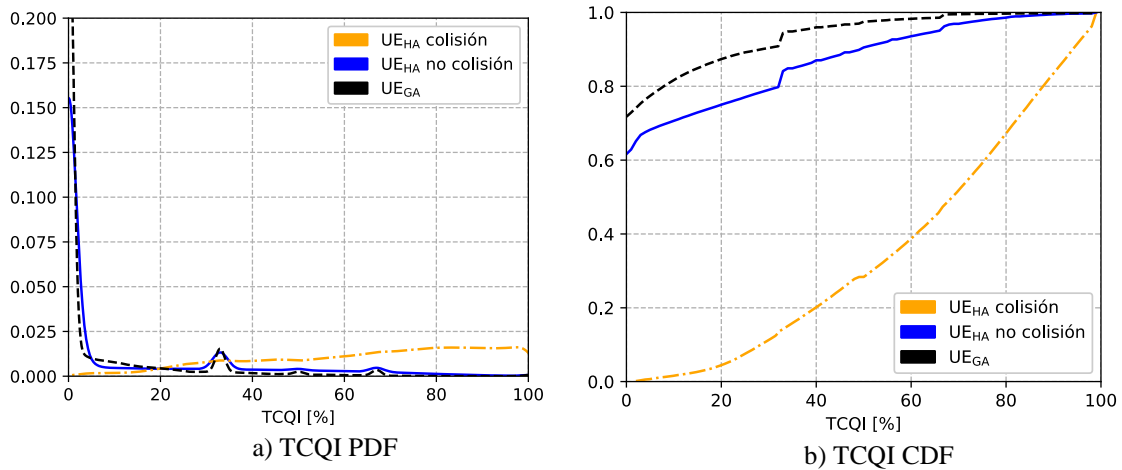


Figura 4.15: PDF y CDF de la métrica TCQI para datos que provienen desde UE_{HA} y UE_{GA} , escenario LAA LAA.

En forma similar que la figura anterior, la Fig. 4.16 muestra las PDF de la métrica PRBr (Fig. 4.16 a)) y su correspondiente CDF (Fig. 4.16 b)) para los nodos de prueba UE_{HA} y UE_{GA} empleando la clasificación de colisión y no colisión.

La PDF para los UE_{HA} no colisión y la PDF para los UE_{GA} mostrados en la Fig. 4.16 a) presentan distribuciones similares. En el caso de la PDF de UE_{GA} tiene una probabilidad en torno del 8 % cuando la métrica $\text{PRBr}=0\%$. Esto implica que al menos para un 8% de las muestras del total de las realizaciones los PRB transmitidos no tenían datos de usuario, mientras que para los UE_{HA} colisión, su PDF muestra que esta probabilidad está en torno al 10%. Por otro lado, la métrica PRBr se incrementa debido a las retransmisiones; es decir, los UE_{HA} colisión usarán más PRB que los UE_{HA} no colisión o que los UE_{GA} . Por este motivo, se aprecia que la PDF asociada a colisiones (UE_{HA} colisión) se incrementa significativamente cuando el PRBr es mayor que el 17% en comparación con la PDF de los UE_{HA} no colisión o UE_{GA} , después permanece casi constante hasta alrededor de un $\text{PRBr}=60\%$ y declina para valores mayores de PRBr.

Este comportamiento se ve mejor representado en la CDF de la Fig. 4.16 b). Esta figura muestra que la CDF para UE_{HA} colisión crece linealmente en torno al rango dado por $\text{PRBr}=[17, 60]\%$; después, la CDF cambia su comportamiento y crece con una menor pendiente. La razón principal de este comportamiento es que al mismo tiempo que las colisiones aparecen, las retransmisiones también lo harán, y ambas crecerán linealmente conforme una mayor carga de tráfico es demandada por los UE_{HA} cuando enfrentan colisiones. Las retransmisiones compiten con el tráfico nuevo y ambos son atendidos por

el *scheduler* de una manera regular para el rango PRBr igual a [17, 60]%, ya que los recursos disponibles son suficientes como para compartir entre todos los UE asociados al eNB. Posteriormente, al sobrepasar el umbral de PRBr=60%, se comienza a sentir la presión sobre los recursos radio disponibles, de tal modo que el *scheduler* no puede proveer los suficientes PRB solicitados para retransmisiones, reduciendo el valor de PRB asignados. Esto se produce debido a que la implementación del algoritmo de *scheduling* usado en el simulador (*Proportional Fair*) gestiona las retransmisiones y tráfico nuevo de la siguiente manera: todo tráfico nuevo puede ser asignado a cualquier PRB disponible, pero las retransmisiones usarán el mismo grupo de PRB (igual frecuencia, diferente tiempo) con igual MCS que fue empleado durante el primer intento infructuoso de transmisión de datos. Por este motivo, muchas retransmisiones serán incapaces de alcanzar la capa física, ya que sus *timers* expirarán esperando la asignación de recursos por parte del *scheduler* y por ende el sistema los eliminará. Este fenómeno sucede con mayor frecuencia para valores de $PRBr \geq 60\%$. Por este motivo, los UE_{HA} colisión, UE_{HA} no colisión y UE_{GA} tienen un incremento de sus CDF muy similares al sobrepasar este límite.

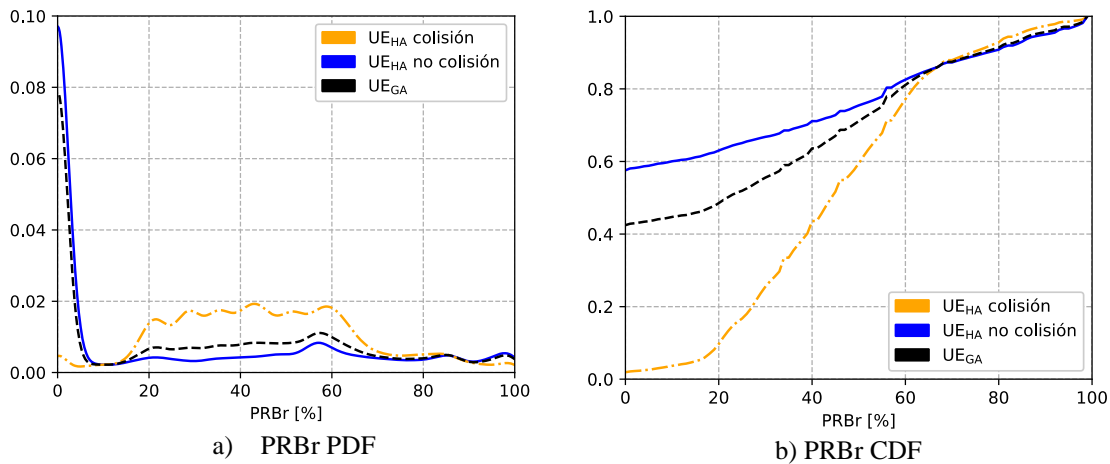


Figura 4.16: PDF y CDF de la métrica PRBr para datos que provienen desde UE_{HA} y UE_{GA}, escenario LAA LAA.

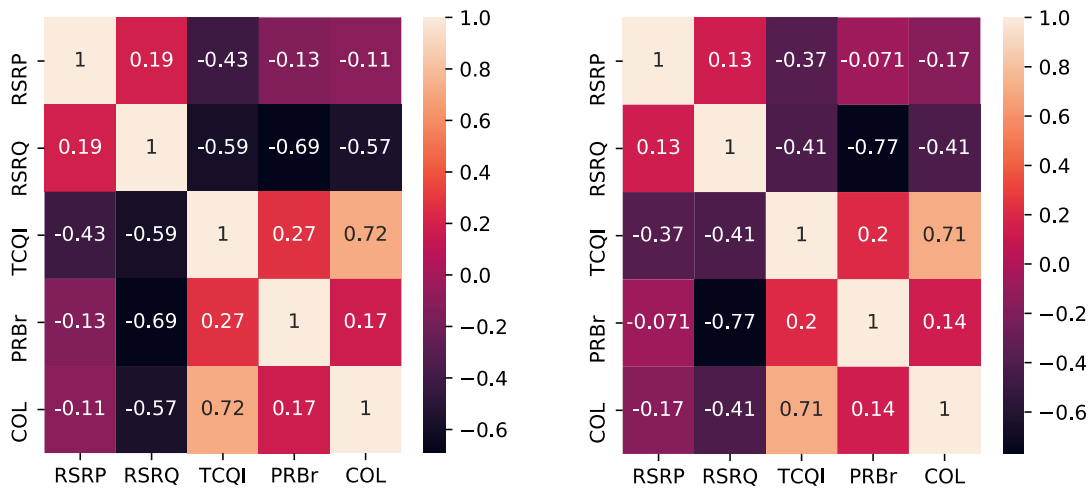
En resumen, aunque existan diferencias en la ocupación de PRB en términos de valores absolutos entre los UE_{HA} y UE_{GA}, estos no son necesariamente muy significativos como para discernir la existencia del problema de terminal oculto. Sin embargo, la correlación que la variable PRBr pueda tener con otras métricas es un factor que aún debe ser analizado.

4.3.1.2 Correlaciones y distribuciones conjuntas

En esta sección se evalúan las correlaciones y distribuciones de probabilidad conjunta que emergen de las variables seleccionadas. La Fig. 4.17 representa la matriz de correlación entre las métricas y la probabilidad de colisión (COL), que se obtiene del conjunto de datos que vienen de dos escenarios: LAA LAA (Fig. 4.17 a)) y LAA Wi-Fi (Fig. 4.17 b)). Ambos *dataset* tienen igual número de registros, ya que las condiciones de simulación aplicadas a las pruebas individuales para cada realización fueron las mismas, siendo la tecnología de la fuente interferente la principal diferencia. Se puede apreciar que las correlaciones para

4.3 Algoritmo de Detección de Nodo Oculto Basado en Métodos de Aprendizaje Automático

cada escenario son estadísticamente similares entre sí, lo cual permite decir que los resultados obtenidos para el escenario LAA LAA son aplicables al escenario LAA Wi-Fi. Los coeficientes de correlación muestran que las correlaciones más altas con respecto a COL se obtienen para las variables RSRQ y TCQI, mientras que los coeficientes de correlación con menor valor corresponden a las variables RSRP y PBRr. Esto sugiere que RSRQ y TCQI son predictores que están fuertemente relacionados con las colisiones. Adicionalmente, una alta correlación aparece entre las siguientes parejas de métricas: PRBr y RSRQ, entre RSRP y TCQI y entre RSRQ y TCQI.



a) Matriz de correlación LAA LAA

b) Matriz de correlación LAA Wi-Fi

Figura 4.17: Matriz de correlación para escenarios LAA LAA y LAA Wi-Fi.

En resumen, es aconsejable el uso de las variables RSRQ y TCQI, que por su naturaleza muestran una clara frontera de decisión para las clases colisión y no colisión en el análisis de sus PDF. Las variables PBRr y RSRP no muestran una clara frontera de decisión, aunque las correlaciones con RSRQ y TCQI sugieren continuar el análisis usando estas variables. El análisis de RSRP vs RSRQ en la Sección 4.1.3 muestra que para un $RSRP \geq -110$ dBm, el RSRQ no depende de valor de RSRP en ausencia de interferencia. Por este motivo, es posible considerar no usar a la variable RSRP para alimentar a los algoritmos de ML, al menos para valores de RSRP mayores que -110 dBm, porque su presencia no aporta información vital sobre la existencia de colisiones.

La Fig. 4.18 representa el gráfico tridimensional que se obtiene para las distribuciones conjuntas formadas por las variables aleatorias RSRQ, TCQI y PBRr para los escenarios LAA LAA (Fig. 4.18 a)) y LAA Wi-Fi (Fig. 4.18 b)). Ambos grupos de datos comparten condiciones similares para las pruebas individuales (número de UE o STA, posiciones iniciales en las subáreas A, B y C, LOS, NLOS, iguales cargas de tráfico servidora o interferente, etc.) con la única diferencia en la tecnología interferente. La variable RSRP no es considerada para facilitar la visualización de las fronteras de decisión en este subespacio tridimensional. Estas tres variables han mostrado un conjunto de características que tienen una alta correlación con las colisiones, como se demostró en el análisis de las distribuciones marginales.

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

Las Fig. 4.18 a.1) y Fig. 4.18 b.1) representan las colisiones (puntos rojos) percibidos por los UE_{HA} y las no colisiones (puntos azules) percibidas por los nodos de pruebas UE_{HA} y UE_{GA} para los escenarios LAA LAA y LAA Wi-Fi, respectivamente. Estas figuras ilustran la existencia de una frontera de decisión entre estas variables. Por tal motivo es posible indicar que las colisiones y no colisiones desarrollan un hiperplano que limitan la presencia de cada una. Las Fig. 4.18 a.2) y 4.18 b.2) representan los puntos pertenecientes a la clase no colisión para los escenarios descritos anteriormente. Esto permite una mejor visualización del límite que la clase no colisión alcanza para cada sub-espacio. Ambos escenarios despliegan un comportamiento estadístico similar. Por tanto, las características principales de un escenario son aplicables al otro. Debido a la existencia de las fronteras de decisión, es posible anticipar buenos resultados cuando los algoritmos de clasificación de ML sean empleados para predecir la existencia de colisiones generadas por la presencia de nodos ocultos.

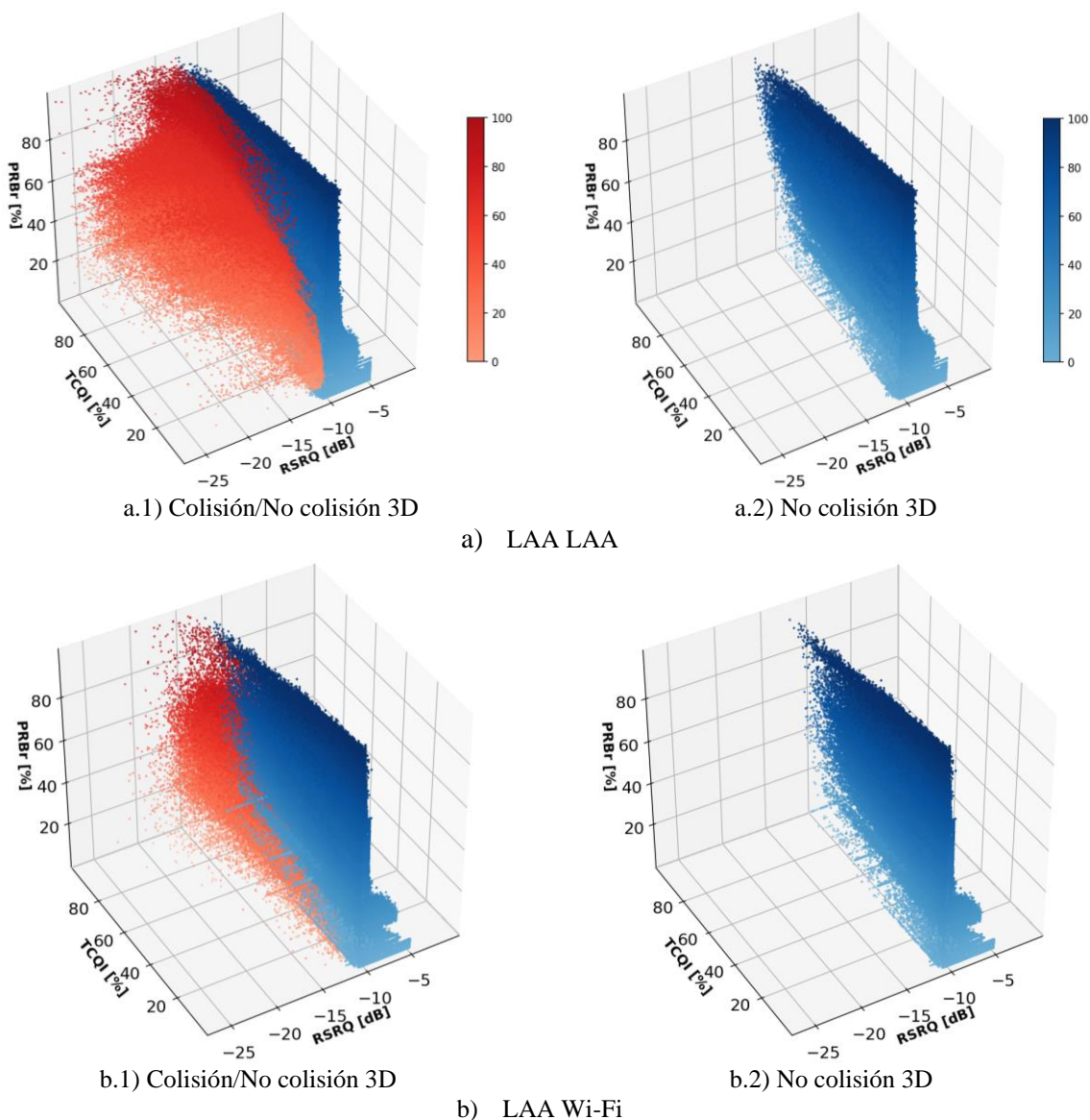


Figura 4.18: Gráficas de puntos dispersos para las clases colisión y no colisión en el sub-espacio 3D, para los escenarios LAA LAA y LAA Wi-Fi. $RSRP \geq -110$ dBm.

4.3.2 Métodos de aprendizaje automático y redes neuronales para la identificación de colisiones

El término aprendizaje automático en sentido amplio se refiere al uso de algoritmos capaces de realizar una tarea dada procesando los datos disponibles y progresivamente aprendiendo de los mismos. Los modelos de ML permiten el reemplazo de métodos heurísticos por unas alternativas más generales. En el contexto de nuestro problema, se usarán técnicas de aprendizaje automático y redes neuronales para evaluar cuál es la mejor opción para identificar las colisiones que ocurren sobre los UE ubicados en una zona oculta debido a la presencia de nodos ocultos. Este problema encaja en las tareas de clasificación con dos clases (colisión y no colisión) en la categoría de aprendizaje supervisado [113], [114].

Los parámetros a emplear para detectar si el UE está enfrentando colisiones (es decir si el UE está en zona oculta) son: TCQI como se definió anteriormente junto con la métrica PRBr y la medida reportada RSRQ, en una ventana de muestreo de 200 milisegundos. Se debe notar que finalmente la variable RSRP no ha sido considerada, ya que este parámetro no contribuye en el proceso de clasificación para los algoritmos de ML evaluados. Como se ilustró en la Fig. 4.13 a), para esta variable no existe una frontera de decisión que separe las clases colisión y no colisión. Por el contrario, RSRQ, TCQI y en menor grado PRBr tienen fronteras de decisión que son muy útiles en las tareas de detección.

4.3.2.1 Procesamiento de los datos

El *dataset* final es el resultado de la concatenación de los registros que vienen desde los nodos de prueba UE_{HA} y UE_{GA} obtenidos por medio de múltiples realizaciones para los escenarios LAA LAA y LAA Wi-Fi. Estos fueron obtenidos por medio de simulaciones con la herramienta NS-3 [115] siguiendo las características descritas en el apartado 3.2.1. Las siguientes líneas resumen el procesamiento realizado a los datos previo a su uso en los algoritmos de clasificación.

- Una vez establecido el uso de algoritmos de aprendizaje supervisado; el primer paso es la etiquetación de la salida. Existen dos posibles salidas para este problema de clasificación binaria: colisión (es decir el UE está ubicado en un área oculta) y no colisión. Es importante recordar que hemos definido que una colisión ocurre cuando un nodo servidor y un nodo interferente transmiten simultáneamente y que la diferencia logarítmica de las potencias útil e interferente percibida por el UE es menor a 2 dB. De este modo, se procede a definir a la variable y_i como la variable de salida.

$$y_i = \begin{cases} 1 & i \text{ésima observación es una colisión} \\ 0 & i \text{ésima observación no es una colisión} \end{cases} \quad (4.16)$$

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

- Es importante analizar el *dataset*, sus distribuciones y patrones para limpiar/ reparar los datos corruptos, poniendo atención a posibles valores atípicos que pueden estar asociados a errores en el conjunto de datos. Esta estrategia ha sido aplicada en la sección anterior, permitiendo seleccionar las variables más relevantes asociadas con colisiones. Esto permite tener una mejor idea de los rangos de operación, detectar la presencia de datos desbalanceados y, de este modo, escoger las mejores estrategias y algoritmos de ML para nuestro problema en particular.
- Otra consideración es la existencia de un *dataset* desbalanceado, esto implica que las clases no están igualmente representadas en el conjunto de datos, siendo este el caso de nuestro *dataset*, donde la razón del número de registros de colisiones/no-colisiones es alrededor del 10%. El mayor problema debido a los datos desbalanceados es que si estos datos son usados para entrenar a los algoritmos de ML, la clase sobrerrepresentada (clase mayor) hace más difícil para el modelo aprender las características de la clase subrepresentada (clase menor). Existen algunas técnicas para lidiar con los datos desbalanceados, tales como: peso ponderado de las clases, sobremuestreo de la clase menor, submuestreo de la clase mayor, generación de datos sintéticos para la clase subrepresentada, etc. Las siguientes publicaciones presentan con mayor detalle las posibles soluciones al problema de desbalanceo de muestras [116], [117].
- Los modelos lineales trabajan mejor cuando las entradas y salidas son estandarizadas. Por tal motivo, se recomienda normalizar los parámetros que son empleados para entrenar el clasificador, dado que estos usan diferentes escalas. Sea $\tilde{\mathbf{x}}_i$ el *i*-ésimo registro, compuesto por las tres métricas seleccionadas después de la exclusión de RSRP, $\tilde{\mathbf{x}}_i = (\tilde{x}_i^{RSRQ}, \tilde{x}_i^{TCQI}, \tilde{x}_i^{PRBr})$; este procedimiento es representado para cada parámetro por la ecuación (4.17).

$$x_i^j = \frac{\tilde{x}_i^j - \bar{x}^j}{\sigma^j} \quad \forall j \in \{RSRQ, TCQI, PRBr\} \quad (4.17)$$

donde x_i^j es el valor normalizado del *j*-ésimo parámetro del *i*-ésimo registro. Los valores \bar{x}^j y σ^j representan la media y la desviación estándar del *j*-ésimo parámetro, respectivamente.

- Finalmente, el *dataset* debe ser mezclado de forma aleatoria para romper cualquier secuencia pre-existente y reorganizar las muestras de tal modo que los datos de entrenamiento y prueba tendrán un comportamiento estadístico similar. Sea \mathbf{X} la entrada y \mathbf{y} la salida del dataset reordenado, este dataset es dividido en 3 grupos: el primero corresponde al entrenamiento $\{\mathbf{X}_E, \mathbf{y}_E\}$, el segundo son los datos de validación cruzada $\{\mathbf{X}_{CV}, \mathbf{y}_{CV}\}$, y el último grupo son los datos de prueba $\{\mathbf{X}_T, \mathbf{y}_T\}$ que serán usados para evaluar el rendimiento de los clasificadores. El primer grupo representa el 60% del dataset, mientras que los otros dos grupos contienen el 20% cada uno del *dataset*.

4.3.2.2 Algoritmos de clasificación

En ML existen dos tipos de algoritmos claramente definidos: el primero denominado supervisado, donde las entradas y sus respectivas salidas están bien definidas (etiquetadas) y el otro llamado no supervisado. Para el método no supervisado, los algoritmos usan los datos para asignar sus elementos con grupos específicos en función de características o patrones comunes [118]. Por este motivo, la detección de un nodo ubicado en zona oculta que tiene etiquetada su salida corresponde con el problema de clasificación con método supervisado. A continuación, se evaluarán los siguientes algoritmos en el contexto del problema planteado: Regresión logística, k vecinos más cercanos (kNN), máquinas de vectores de soporte (SVM).

4.3.2.2.1 Regresión logística

Se emplearán las librerías de Scikit-learn y Keras desarrolladas en Python para realizar el análisis [119], [120]. La primera alternativa para abordar el problema es el uso del algoritmo de regresión logística multivariable, multivariable porque las variables de entrada se componen de 3 elementos y regresión logística porque la salida tiene dos clases (colisión y no colisión).

Sea y_i la variable de salida definida anteriormente. Se define a la probabilidad de colisión como $P(y_i = 1 | x_i; \omega) = \sigma_\omega(x_i)$, y la probabilidad de no colisión como su complemento $P(y_i = 0 | x_i; \omega) = 1 - \sigma_\omega(x_i)$, lo cual es equivalente a la ecuación (4.18):

$$P(y_i | x_i; \omega) = \sigma_\omega(x_i)^{y_i} [1 - \sigma_\omega(x_i)]^{1-y_i} \quad (4.18)$$

donde, como se definió anteriormente, x_i es el vector de entrada que viene del i -ésimo registro del *dataset* $x_i = (x_i^{RSRQ}, x_i^{TCQI}, x_i^{PRBr})$, $\omega = (\omega^{RSRQ}, \omega^{TCQI}, \omega^{PRBr})$ son los pesos usados por la función de activación $\sigma_\omega(\cdot)$, en conjunto con el valor de sesgo (bias en inglés) ω_0 (que constituye un coeficiente lineal obtenido durante la fase de entrenamiento). Los valores de ω y ω_0 deben ser encontrados para minimizar el error de clasificación con respecto a y_i . La función de activación es $\sigma_\omega(x_i) = \sigma(\omega^T x_i + \omega_0)$, donde $\sigma(z)$ es la función sigmoide [114].

$$\sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (4.19)$$

Los vectores ω y ω_0 son desconocidos y serán estimados en base a los datos de entrenamiento disponible. Para obtener ω y ω_0 el método preferido en regresión logística es la función de log-verosimilitud. Por tanto, la función de costo ($J(\omega')$), siendo $\omega' = (\omega_0, \omega^{RSRQ}, \omega^{TCQI}, \omega^{PRBr})$ y $x'_i = (1, x_i^{RSRQ}, x_i^{TCQI}, x_i^{PRBr})$ asumiendo m muestras independientes [121] es igual a:

$$J(\omega') = \sum_{i=1}^m \{y_i \ln(\sigma(\omega'^T x'_i)) + (1 - y_i) \ln(1 - \sigma(\omega'^T x'_i))\} \quad (4.20)$$

El objetivo es seleccionar los parámetros (ω') que maximizan la probabilidad. Por ende, el proceso de optimización consiste en maximizar la probabilidad de obtener los valores estimados \hat{y}_i lo más cercanos a la salida verdadera y_i , este proceso se conoce como estimación de probabilidad máxima (MLE) por sus siglas en inglés. Entonces, usando el método de optimización de gradiente descendente:

$$MLE(\omega') = \frac{\partial J(\omega')}{\partial \omega'} = \sum_{i=1}^m \{y_i - \sigma(\omega'^T x'_i)\} x'_i \quad (4.21)$$

4.3.2.2.2 *k Vecinos más cercanos (kNN)*

El algoritmo kNN es uno de los más simples e intuitivos, típicamente es un método aplicado como algoritmo de clasificación. Cada instancia (registro x_k) de los datos de entrenamiento está asociado con una clase (UE colisión o UE no colisión). En kNN cuando un registro de prueba (x_i) necesita ser clasificado, dado un número entero k , el clasificador kNN identifica primero los k puntos (registros) en los datos de entrenamiento que se encuentran más cercanos a x_i . Entonces, el algoritmo asigna una clase a x_i basándose en la clase a la que pertenezcan la mayoría de los k vecinos más cercanos. Scikit-learn usa la distancia de Minkowski para evaluar los k puntos más cercanos como se muestra en la ecuación (4.22) [122], que particularizado a nuestro problema es:

$$d_{minkowski} = \left\{ \sum_{j=RSRQ,TCQI,PRBr} |x_k^j - x_i^j|^a \right\}^{1/a} \quad (4.22)$$

donde, x_k y x_i representan dos puntos en el subespacio (en nuestro caso, x_i es un punto/registro a ser clasificado y x_k uno de los registros etiquetados de los datos de entrenamiento), la variable a es un valor entero (si $a=2$ la distancia usada es la euclidiana).

El algoritmo kNN es alimentado con los datos de entrenamiento $\{X_E, y_E\}$. No existe una expresión matemática como salida del algoritmo que defina un hiperplano. Todos los datos de entrenamiento son mantenidos en memoria de tal modo que clasificará al registro ingresado x_i en función de los k puntos de entrenamiento más cercanos.

4.3.2.2.3 *Máquinas de vectores de soporte (SVM)*

El algoritmo SVM construye un hiperplano en un espacio multidimensional para separar las diferentes clases. Cabe recordar que para un espacio de q dimensiones, un hiperplano es un subespacio de $q-1$ dimensiones. Por ejemplo, si $q=3$ (espacio tridimensional) entonces el hiperplano tiene una dimensión igual a $q-1=2$, el cual es un plano en el espacio 3D. Para nuestro caso, dado que hemos seleccionado tres parámetros

4.3 Algoritmo de Detección de Nodo Oculto Basado en Métodos de Aprendizaje Automático

(RSRQ, TCQI y PRBr), este modelo intentará definir un hiperplano bidimensional en un espacio tridimensional para separar las diferentes clases.

El algoritmo SVM usa los conceptos del clasificador de vectores de soporte (SVC) por sus siglas en inglés. Considérese la Fig. 4.19, la cual representa un ejemplo de dos clases sobrepuestas en un espacio 2D. La frontera de decisión (línea color azul) está representada por la expresión $x^T \omega + \omega_0 = 0$, mientras que las líneas entrecortadas delimitan el margen máximo con un ancho igual a $M = 1/\|\omega\|$. Los datos de entrenamiento se componen de m pares $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)$, siendo x_k el vector de entrada que viene del k -ésimo registro del *dataset* y $y_k \in \{-1, 1\}$ la variable de salida etiquetada como (colisión, no colisión). Para SVM es mejor considerar la salida del clasificador como $y_i \in \{-1, 1\}$ en lugar de $y_i \in \{1, 0\}$. Es decir, para cualquier x_i tal que $\omega^T x_i + \omega_0 > M$ es clasificado como $y_i = 1$ y x_i tal que $\omega^T x_i + \omega_0 < -M$ corresponde a $y_i = -1$ [113], debido a que las clases son separables, esto con el objetivo de encontrar el hiperplano que crea el mayor margen M entre los datos de entrenamiento para las clases 1 y -1.

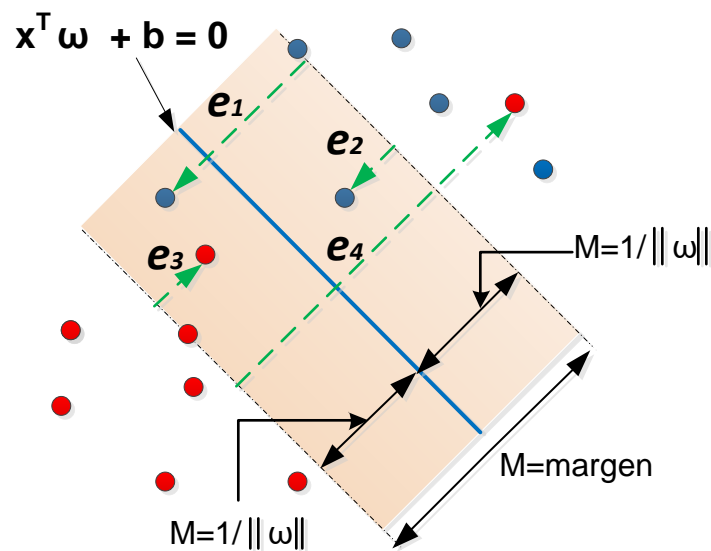


Figura 4.19: Clasificador de vectores de soporte. Ejemplo en 2D.

Sin embargo, asumiendo que las clases se pueden solapar en el espacio del margen, el objetivo se puede redefinir para maximizar el margen M , pero permitiendo a algunos puntos ubicarse en el lado incorrecto del margen. En la Fig. 4.19, los puntos conocidos como “*slack variable*” están etiquetados como e_i y están ubicados en el lado incorrecto del margen. El sumatorio $\sum e_i$ es la distancia total que forman todos los puntos ubicados en el lado incorrecto del margen [113]. El objetivo del SVC es encontrar el hiperplano tal que maximice el margen M dada la restricción que la suma de los errores sean menor que una constante ($\sum e_i \leq constante$). Debido a la relación inversa entre M y el vector ω , la maximización de M es equivalente a la minimización de ω . Matemáticamente se puede representar como se indica en la ecuación (4.23).

$$\min \|\omega\| \text{ s. t. } \begin{cases} y_i(\omega^T x_i + \omega_0) \geq 1 - e_i, \forall i \\ e_i \geq 0, \sum e_i \leq \text{constante} \end{cases} \quad (4.23)$$

Para la resolución de la ecuación (4.23) se aplican los multiplicadores de Lagrange y la condición de Karush-Kuhn-Tucker como se indica en [113]. Además, es posible reformular esta ecuación en una forma equivalente tal como se muestra en (4.24), donde el parámetro C reemplaza al valor *constante*.

$$\begin{aligned} & \min_{\omega, \omega_0} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^m e_i \\ & \text{s. t. } \quad e_i \geq 0, \quad y_i(\omega^T x_i + \omega_0) \geq 1 - e_i, \forall i \end{aligned} \quad (4.24)$$

Entonces, la salida pronosticada (\hat{y}_i) para el registro de entrada x_i es definida por la ecuación (4.25), donde los valores constantes α_k son los multiplicadores de Lagrange y ω_0 se obtiene por medio de cualquier vector de soporte (sobre o cercano al margen M). El margen es mayor para valores pequeños de C (por ejemplo 0,01) que para valores altos de C (como 1000). Un valor alto de C se enfoca en puntos correctamente clasificados cerca de la frontera de decisión, mientras que valores pequeños de C consideran a puntos que se encuentran lejanos de la frontera de decisión. El parámetro C establece un compromiso entre el error durante el entrenamiento y la complejidad del modelo. Valores pequeños de C proveen un modelo simple, con un elevado error durante el entrenamiento, pero con una frontera de decisión lisa. Por el contrario, valores altos de C producen una frontera de decisión ondulante, con una mayor probabilidad de *overfitting*. Un valor adecuado de C se puede obtener mediante el procedimiento de validación cruzada.

$$\begin{aligned} \hat{y}_i &= y_i(\omega^T x_i + \omega_0) \\ \omega_0 &= \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \left\{ \frac{1}{y_k} - \omega^T x_k \right\}, \forall e_k = 0 \\ \omega &= \sum_{k=1}^m \alpha_k y_k x_k \end{aligned} \quad (4.25)$$

Los hiperplanos lineales son buenos clasificadores cuando las clases son perfectamente o cuasi- perfectamente separables. Pero, cuando no (este puede ser nuestro caso), una posible solución es incrementar la dimensionalidad de los datos, por ejemplo, usando la función *Kernel*. La formulación del problema es tal como se muestra líneas arriba pero con todas las x_i reemplazadas por $\Phi(x_i)$, donde Φ provee un mapeo con una mayor dimensionalidad para las entradas que disponen una menor dimensionalidad. El espacio transformado es considerado linealmente separable. De este modo, la salida pronosticada (\hat{y}_i) para el registro de entrada x_i es definida mediante la ecuación (4.26) donde $K(x_i, x_k)$ es la función *Kernel*.

4.3 Algoritmo de Detección de Nodo Oculto Basado en Métodos de Aprendizaje Automático

$$\hat{y}_i = \sum_{k=1}^m \alpha_k y_k \Phi(x_k)^T \Phi(x_i) + \omega_0$$

$$\hat{y}_i = \sum_{k=1}^m \alpha_k y_k K(x_k, x_i) + \omega_0$$
(4.26)

El algoritmo SVM considera diferentes tipos de fronteras de decisión, tales como: lineal, polinomial, radial. En nuestro caso, el modelo que mejor resultados obtuvo es el kernel radial $K(x_k, x_i) = \exp(-\gamma \|x_k - x_i\|^2)$. El parámetro γ es un parámetro de sintonización que representa el nivel de rugosidad de la frontera de decisión. Si γ es elevada (por ejemplo 100), se obtiene una frontera de decisión ondulante, la cual puede generar *overfitting*. Por el contrario, si γ es pequeña (alrededor de 0,01), la frontera será lisa.

Entonces, para una clasificación binaria el uso del signo de la salida pronosticada \hat{y}_i será suficiente para determinar la clase. Por tanto, si $\hat{y}_i > 0$ $x \in$ clase 1, caso contrario $x \in$ clase 0. Finalmente, se debe notar que no estamos considerando ninguna clase de regularización como L1 (Regresión de Lasso) o L2 (Regresión de cresta) para los tres métodos de clasificación analizados hasta el momento. La razón principal es el bajo número de variables de nuestro *dataset*, que es igual a tres (RSRQ, TCQI y PRBr); por este motivo el riesgo de generar *overfitting* es bajo.

4.3.2.2.4 Redes neuronales totalmente conectadas (FCNN)

Las redes neuronales profundas DNN (*Deep Neural Networks*) son útiles en los problemas de clasificación. Existen básicamente 4 tipos de DNN: convolucionales, *pooling*, recurrentes y redes neuronales completamente conectadas (FCNN). En particular, las redes convolucionales y *pooling* son utilizadas para análisis de imágenes, mientras que las redes neuronales recurrentes son utilizadas típicamente para el procesamiento de datos secuenciales que tienen memoria en el dominio del tiempo. Por otro lado, una FCNN no asume características especiales de los datos de entrada, así que este tipo de red es el seleccionado para procesar nuestro *dataset*.

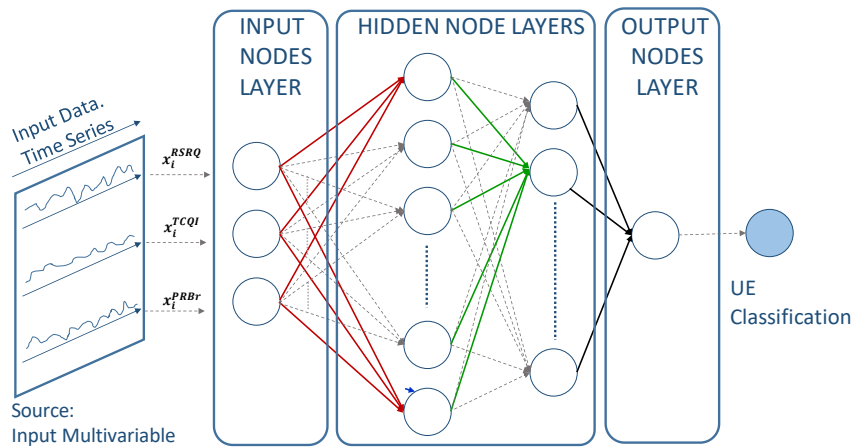
Se realizarán las pruebas de las redes FCNN usando una estructura de 1 y 2 capas ocultas (CO) con una salida. La Fig. 4.20 a) muestra el esquema general, mientras que la Fig. 4.20 b) ilustra los detalles de la red neuronal a analizar. Las capas internas ocultas usan la función de activación no lineal ReLU, dejando la función sigmoide (σ) como la función de activación para la salida final de la red neuronal. Se ha realizado una búsqueda en cuadrícula (*grid search*) para seleccionar el mejor valor de neuronas para las capas ocultas. La función ReLU se define en (4.27).

$$ReLU = \beta(x) = \max(0, x)$$
(4.27)

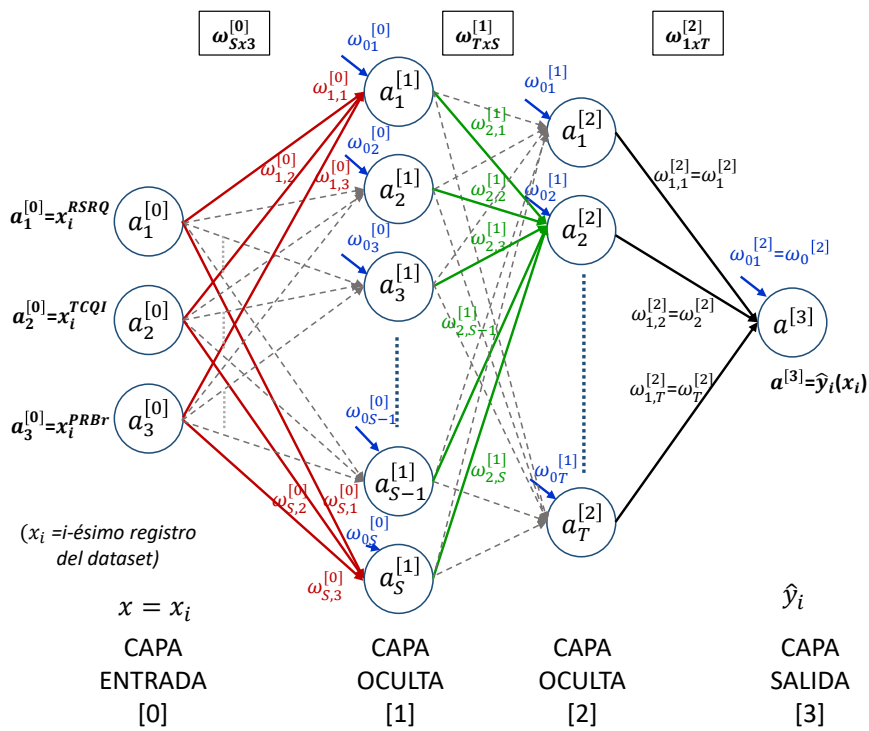
La Fig. 4.20 b) tiene 2 capas ocultas y una salida, las capas ocultas y la neurona de salida se representan como se muestra en las ecuaciones (4.28) [114], donde S y T

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

representan el número de neuronas en las capas ocultas 1 y 2, respectivamente. Los índices ubicados en la parte superior dentro de corchetes representan el índice de la capa de la red FCNN ($l=0,1,2,3$), $\omega^{[l]}$ representa la matriz de pesos entre la capa l y la capa $l+1$ y el vector $\omega_0^{[l]}$ es el sesgo aplicado a cada capa oculta. El parámetro x_i es el i -ésimo registro de entrada, mientras que \hat{y}_i es la i -ésima salida pronosticada, la cual depende de x_i , de la matriz de pesos ($\omega^{[l]}, l = 0,1,2$) y del sesgo ($\omega_0^{[l]}, l = 0,1,2$).



a) Esquema General



b) Esquema detallado de la FCNN

Figura 4.20: Diagrama de la red neuronal para 2 capas ocultas (2 CO) y 1 salida.

4.3 Algoritmo de Detección de Nodo Oculto Basado en Métodos de Aprendizaje Automático

$$\begin{aligned}
 a_s^{[1]} &= \beta \left(\omega_{0_s}^{[0]} + \sum_{\substack{j=RSRQ,TCQI, \\ PRBr}} \omega_{s,j}^{[0]} x_i^j \right) \quad 1 \leq s \leq S \\
 a_t^{[2]} &= \beta \left(\omega_{0_t}^{[1]} + \sum_{s=1}^S \omega_{t,s}^{[1]} a_s^{[1]} \right) \quad 1 \leq t \leq T \\
 \hat{y}_i &= \sigma \left(\omega_0^{[2]} + \sum_{t=1}^T \omega_t^{[2]} a_t^{[2]} \right)
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

En nuestro caso, donde el número de neuronas de salida es uno, la matriz $\omega^{[l]}$, y el vector $\omega_0^{[l]}$ de cada capa se obtienen a través del método de error cuadrático medio (MSE) como se indica en la ecuación (4.29), donde m es el número de muestras. El parámetro y_i representa la salida deseada de la red neuronal para el registro de entrada x_i y \hat{y}_i es la salida pronosticada.

$$J(\omega) = MSE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i(x_i, \omega))^2 \tag{4.29}$$

El objetivo es encontrar los valores óptimos de $\omega^{[l]}$ y $\omega_0^{[l]}$ para $l=0,1,2$ que minimiza el MSE. El valor de MSE optimizado debe ser evaluado para cada capa individual y para todas las capas que forman la red neuronal, lo que hace que el proceso de encontrar la derivada parcial (gradiente) sea más complejo. Por este motivo, se utiliza el algoritmo *backpropagation* para obtener la gradiente bajo estas condiciones. Este algoritmo tiene el nombre de *backpropagation* porque los pesos son actualizados a partir del valor conocido de salida retroalimentado hacia las entradas. El algoritmo de *backpropagation* se basa en la regla de la cadena y apunta a minimizar la función de costo a través del ajuste de la matriz de pesos y sesgo. El nivel de ajuste es determinado por el gradiente de la función de costo con respecto a estos parámetros (pesos y sesgo) [123]. Para este caso en particular, el costo J_0 para un registro de entrada es definido en la ecuación (4.30), siendo L el número de capas ocultas y $a^{[L+1]} = a^{[L+1]}(x_i) = \hat{y}_i$ es el vector formado por las funciones de activación de salida para la red neuronal cuando la entrada es $x_i = a^{[0]}$. Asumiendo que $z^{[L+1]} = \omega^{[L]} a^{[L]} + \omega_0^{[L]}$, se muestran sus derivadas en las ecuaciones (4.31) y (4.32).

$$\begin{aligned}
 J_0 &= (y_i - \hat{y}_i)^2 \\
 \hat{y}_i &= a^{[L+1]} = \sigma(\omega^{[L]} a^{[L]} + \omega_0^{[L]}) \\
 z^{[L+1]} &= \omega^{[L]} a^{[L]} + \omega_0^{[L]}
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial J_0}{\partial a^{[L+1]}} &= 2(y_i - a^{[L+1]}) \\
 \frac{\partial a^{[L+1]}}{\partial z^{[L+1]}} &= \sigma'(z^{[L+1]})
 \end{aligned} \tag{4.31}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial z^{[L+1]}}{\partial \omega^{[L]}} &= a^{[L]} \\
 \frac{\partial z^{[L+1]}}{\partial a^{[L]}} &= \omega^{[L]} \\
 \frac{\partial z^{[L+1]}}{\partial \omega_0^{[L]}} &= 1
 \end{aligned} \tag{4.32}$$

Para nuestro caso, siendo $L=2$, las derivadas parciales de cada componente de la función de costo usando la regla de la cadena se puede expresar como se indica en la ecuación (4.33).

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial J_0}{\partial \omega_t^{[2]}} &= \frac{\partial z^{[3]}}{\partial \omega_t^{[2]}} \frac{\partial a^{[3]}}{\partial z^{[3]}} \frac{\partial J_0}{\partial a^{[3]}} \\
 \frac{\partial J_0}{\partial a_t^{[2]}} &= \frac{\partial z^{[3]}}{\partial a_t^{[2]}} \frac{\partial a^{[3]}}{\partial z^{[3]}} \frac{\partial J_0}{\partial a^{[3]}} \\
 \frac{\partial J_0}{\partial \omega_{t,s}^{[1]}} &= \frac{\partial z_t^{[2]}}{\omega_{t,s}^{[1]}} \frac{\partial a_t^{[2]}}{\partial z_t^{[2]}} \frac{\partial J_0}{\partial a_t^{[2]}} \\
 \frac{\partial J_0}{\partial a_s^{[1]}} &= \sum_{t=1}^T \frac{\partial z_t^{[2]}}{\partial a_s^{[1]}} \frac{\partial a_t^{[2]}}{\partial z_t^{[2]}} \frac{\partial J_0}{\partial a_t^{[2]}} \\
 \frac{\partial J_0}{\partial \omega_{s,j}^{[0]}} &= \frac{\partial z_s^{[1]}}{\omega_{s,j}^{[0]}} \frac{\partial a_s^{[1]}}{\partial z_s^{[1]}} \frac{\partial J_0}{\partial a_s^{[1]}} \\
 \frac{\partial J_0}{\partial a_j^{[0]}} &= \sum_{s=1}^S \frac{\partial z_s^{[1]}}{\partial a_j^{[0]}} \frac{\partial a_s^{[1]}}{\partial z_s^{[1]}} \frac{\partial J_0}{\partial a_s^{[1]}}
 \end{aligned} \tag{4.33}$$

Nótese que las expresiones para $\frac{\partial J_0}{\partial \omega_0^{[0]}}$ y $\frac{\partial J_0}{\partial \omega_0^{[1]}}$ son similares, con la diferencia en el primer término de las derivadas parciales obtenidas a través de la regla de la cadena (es decir $\frac{\partial z_s^{[1]}}{\omega_0^{[0]}}$ es usado en vez de $\frac{\partial z_s^{[1]}}{\omega_{s,j}^{[0]}}$ para $\frac{\partial J_0}{\partial \omega_0^{[0]}}$). Reemplazando las ecuaciones en (4.33), obtenemos las ecuaciones (4.34).

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial J_0}{\partial \omega_{s,j}^{[0]}} &= \frac{\partial z_s^{[1]}}{\omega_{s,j}^{[0]}} \frac{\partial a_s^{[1]}}{\partial z_s^{[1]}} \sum_{t=1}^T \frac{\partial z_t^{[2]}}{\partial a_s^{[1]}} \frac{\partial a_t^{[2]}}{\partial z_t^{[2]}} \frac{\partial z^{[3]}}{\partial a_t^{[2]}} \frac{\partial a^{[3]}}{\partial z^{[3]}} \frac{\partial J_0}{\partial a^{[3]}} \\
 &= 2 \sum_{t=1}^T a_j^{[0]} a_s^{[1]} (z_s^{[1]}) \omega_{t,s}^{[1]} a_t^{[2]} (z_t^{[2]}) \omega_{1,t}^{t[2]} \omega_t^{[2]} \sigma'(z^{[3]}) (y_i - \hat{y}_i) \\
 &\quad a_s^{[1]} (z_s^{[1]}) = \beta' (z_s^{[1]}) \text{ and } a_t^{[2]} (z_t^{[2]}) = \beta' (z_t^{[2]})
 \end{aligned} \tag{4.34}$$

4.3 Algoritmo de Detección de Nodo Oculto Basado en Métodos de Aprendizaje Automático

Las gradientes de la matriz de peso ω y el sesgo ω_0 de la función de costo son iguales a las ecuaciones (4.35) y (4.36), respectivamente.

$$\nabla J(\omega) = \left[\frac{\partial J}{\partial \omega^{[0]}} \quad \frac{\partial J}{\partial \omega^{[1]}} \quad \frac{\partial J}{\partial \omega^{[2]}} \right] \quad (4.35)$$

$$\nabla J(\omega_0) = \left[\frac{\partial J}{\partial \omega_0^{[0]}} \quad \frac{\partial J}{\partial \omega_0^{[1]}} \quad \frac{\partial J}{\partial \omega_0^{[2]}} \right] \quad (4.36)$$

La matriz de peso es actualizada cada paso de optimización realizada hacia delante o hacia atrás de la red neuronal con una velocidad de aprendizaje η .

$$\omega(t+1) = \omega(t) - \eta \nabla J(\omega) \quad (4.37)$$

En particular, el algoritmo de actualización empleado para la optimización de gradiente se denomina Adam [124]. Este algoritmo de actualización de gradiente combina el momentum (incidencia de los resultados pasados en la decisión actual para obtener ω) y la velocidad de aprendizaje (incidencia de los resultados actuales para el valor actual de ω) para alcanzar una rápida y mejor convergencia. Todos los algoritmos de propagación hacia adelante, hacia atrás, gradiente descendente, etc., están incluidos en las librerías de Python.

La técnica de regularización empleada para FCNN se denomina “*dropout*”. El motivo para la selección de esta técnica es que, a diferencia de otros algoritmos de ML analizados hasta el momento, las redes neuronales tienden a incrementar las dimensiones de los subespacios analizados en función del número de neuronas y capas ocultas contenidas en la arquitectura. Por tal motivo, *overfitting* y el uso de técnicas de regularización son comunes en las redes neuronales.

Por otro lado, en redes neuronales una correcta inicialización de los pesos (ω) y sesgo (ω_0) permite una rápida convergencia de la red y evita los problemas de explosión o desvanecimiento del gradiente que pueden aparecer durante la propagación hacia adelante o hacia atrás durante la fase de entrenamiento del algoritmo de ML. Esto se puede alcanzar garantizando una media igual a cero para la matriz de los pesos e inicializando todos los sesgos a cero. El método de Xavier es uno de los métodos recomendados para la correcta inicialización en redes neuronales. Entonces, para cada capa l ($l=0, 1, 2, \dots$, siendo las capas ocultas numeradas desde 1) de la red neuronal, el peso del j -ésimo parámetro entre la capa l y la neurona s de $l+1$ ($\omega_{s,j}^{[l]}$) es obtenida a través de la ecuación (4.38).

$$\omega_{s,j}^{[l]} \sim \mathcal{N} \left(\mu = 0, \sigma^2 = \frac{1}{n^{[l]}} \right) \quad (4.38)$$

$$\omega_{0s}^{[l]} = 0$$

Donde todos los pesos entre l y $l+1$ son seleccionados aleatoriamente de una distribución normal con media $\mu = 0$, y varianza $\sigma^2 = \frac{1}{n^{[l]}}$, siendo $n^{[l]}$ el número de neuronas para la capa l . Los sesgos $\omega_0^{[l]}$ para cada neurona s en la capa $l+1$ son inicializados con ceros.

4.4 Resultados Numéricos y Discusión

En esta sección se evalúan los resultados obtenidos por los cuatro clasificadores: regresión logística, kNN, SVM y NN basadas en las métricas RSRQ, TCQI y PRBr. Los experimentos usarán las librerías de Python versión 3.7 tales como: Sklearn v. 0.22.1, Tensorflow v. 2.1.0 y Keras 2.2.4.

Para establecer qué modelo de ML o FCNN tiene el mejor desempeño, la evaluación considera 4 métricas comunes usadas en problemas de clasificación binaria: precisión, sensibilidad, curva de característica operativa del receptor (ROC por sus siglas en inglés) y el área bajo la curva ROC (AUC por sus siglas en inglés). Las medidas de sensibilidad y precisión ya fueron definidas anteriormente.

La curva ROC es una representación gráfica que muestra la tasa de verdaderos positivos (TPR por sus siglas en inglés), también conocido como sensibilidad, en contra de la tasa de falsos positivos (FPR por sus siglas en inglés), también conocida como probabilidad de falsa alarma. La FPR se define en la ecuación 4.39.

$$FPR = \frac{\text{Falsos Positivos}}{\text{Falsos Positivos} + \text{Verdaderos Negativos}} \quad (4.39)$$

La medida ROC indica la capacidad que tiene un modelo de distinguir entre clases. Asociada con la curva ROC, existe otra métrica denominada área bajo el ROC (AUC), la cual mide el área bidimensional bajo la totalidad de la curva ROC. En general, un AUC igual a 0,5 sugiere que el modelo no puede discriminar correctamente entre las clases, un valor entre 0,7 y 0,8 se considera aceptable, un valor entre 0,8 a 0,9 se considera excelente, y valores mayores a 0,9 son considerados excepcionales [125].

A continuación, se resumen los parámetros obtenidos para los métodos evaluados, de acuerdo con la sección anterior.

Regresión Logística. Una vez obtenida la función de costo optimizada $J(\omega)$ como se definió en la ecuación (4.20), usando los datos de entrenamiento $\{\mathbf{X}_E, \mathbf{y}_E\}$, los pesos optimizados $(\omega^{RSRQ}, \omega^{TCQI}, \omega^{PRBr})$ y sesgo ω_0 son:

$$\omega = (-2,236; 4,390; -3,574), \quad \omega_0 = -26,747$$

Entonces, la probabilidad de que la salida pronosticada \hat{y}_i para un registro de entrada x_i sea igual a 1 (colisión) para el modelo entrenado se define como:

$$P(\hat{y}_i = 1 | x_i) = \frac{1}{1 + e^{-(\omega^T x_i + \omega_0)}} \quad (4.40)$$

k Vecinos más Cercanos. Para este caso, el primer objetivo es encontrar un valor óptimo de vecinos (k) para ser considerado en el modelo kNN. En nuestros datos de entrenamiento, y usando la distancia euclidiana, hemos encontrado que el valor óptimo de vecinos es $k=5$, como se muestra en la Fig. 4.21, donde la precisión de la validación cruzada es obtenida para diferentes valores de k . A diferencia del algoritmo de regresión logística, kNN no provee una matriz de pesos como resultado del proceso de optimización, porque kNN mantiene en memoria todo del conjunto de datos de entrenamiento $\{X_E, y_E\}$ y la salida pronosticada depende de la pluralidad de los vecinos evaluados en el dataset de entrenamiento.

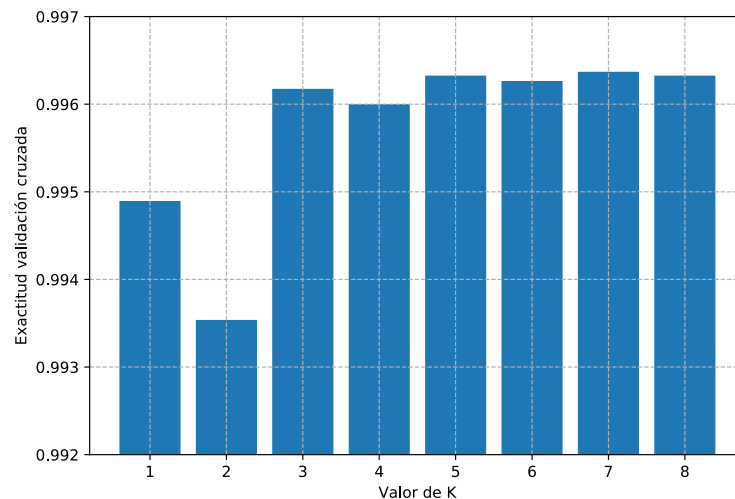


Figura 4.21: Valor óptimo de k para el modelo kNN.

Máquina de Vectores de Soporte. Se ha empleado una búsqueda en cuadrícula (*grid search*) para encontrar el valor óptimo de la función Kernel y los hiperparámetros para el conjunto de datos de entrenamiento $\{X_E, y_E\}$. Los valores óptimos del algoritmo SVM usan un kernel de base radial. Los hiperparámetros optimizados son igual a: $C = 10$ y $\gamma = 1,0$ con un sesgo $\omega_0 = -6,897$. Estos valores han sido seleccionados con el fin de obtener un compromiso entre error, complejidad del modelo y una frontera de decisión lisa.

Redes Neuronales Completamente Conectadas. A través del uso de la técnica de búsqueda en cuadrícula y el método de prueba y error, se han evaluado diferentes valores de hiperparámetros como: número de neuronas para 1 y 2 capas ocultas (CO), tasa de aprendizaje (η) y *dropout* que converjan y reflejen la mínima función de costo o equivalentemente la máxima exactitud, evitando los problemas de *overfitting* o mínimos locales. Se ha encontrado que la red neuronal con 1 capa oculta (1 CO) tiene el mejor valor

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

de exactitud de todos los modelos evaluados por medio de búsqueda en cuadrícula. El valor óptimo de 1 CO tiene los siguientes hiperparámetros: usa el método de optimización de gradiente Adam, con una tasa de aprendizaje $\eta=5e-2$, 12 neuronas, y un $dropout = 0,1$.

Adicionalmente, varios valores de Epoch y tamaños de lote (*batch size*) han sido evaluados. Un Epoch representa un ciclo en el cuál la red neuronal ha empleado la totalidad de los datos de entrenamiento. Existen múltiples Epochs debido a las propagaciones hacia adelante y hacia atrás para alcanzar las pérdidas mínimas (proceso de optimización). El valor del tamaño del lote controla el número de registros de los datos de entrenamiento que serán usados en cada ciclo Epoch. Por regla general, un epoch es igual a $\text{tamaño_datos_entrenamiento}/\text{tamaño_del_lote} = 2409400/32768 = 73,5$ que puede ser redondeado a 100, el tamaño del lote es un número múltiplo de 2^n .

Para determinar los valores óptimos de los hiperparámetros asociados a nuestro modelo de red neuronal se emplea la clase *gridsearchcv* (búsqueda en cuadrícula) perteneciente a las librerías de Python. Además, considerando el tamaño de nuestro *dataset* de entrenamiento, se ha decidido obtener una muestra del 30%, la cual es estadísticamente similar a los datos de entrenamiento. Esta muestra es usada por la clase *gridsearchcv* para evaluar los mejores parámetros para nuestros modelos de red neuronal. La Tabla 4.5 muestra los valores evaluados por el procedimiento búsqueda en cuadrícula.

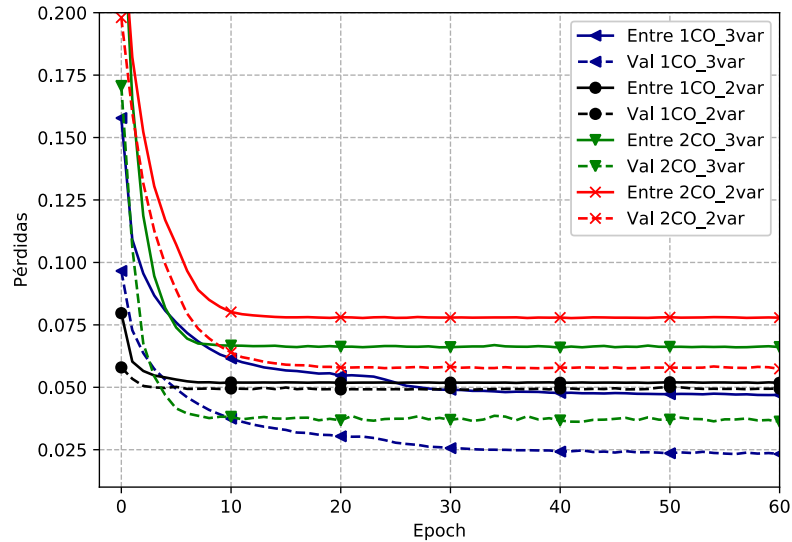
Tabla 4.5: Valores de los parámetros aplicados a la clase búsqueda en cuadrícula.

1 CO	
Tasa aprendizaje	[0,001; 0,005; 0,01; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3]
Neuronas 1 CO	[4; 8; 12; 16; 20]
Dropout	[0,0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9]
2 CO	
Tasa aprendizaje	[0,001; 0,005; 0,01; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3]
Neuronas 1 CO	[4; 8; 12]
Neuronas 2 CO	[2; 4; 6]
Dropout	[0,0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9]

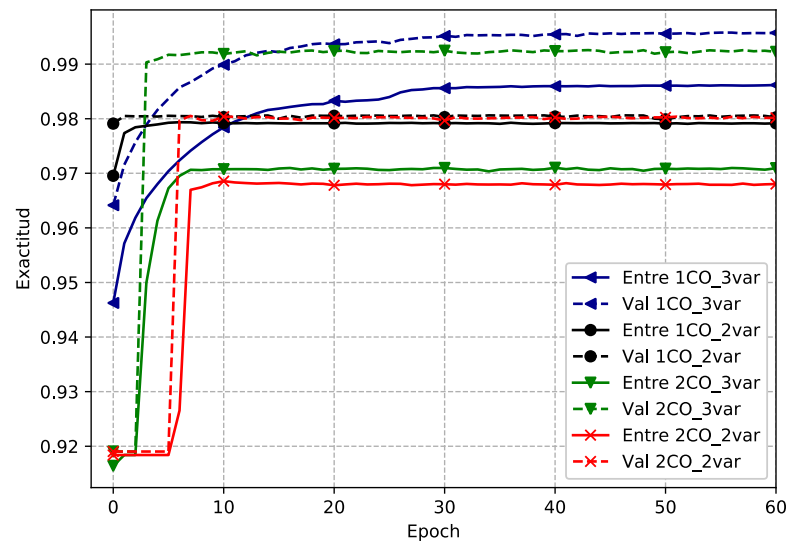
La clase *gridsearchcv* considera los valores de hiperparámetros descritos en la Tabla 4.5 y escogerá aquellos que retornan la mejor exactitud, para garantizar que los resultados de exactitud son independientes entre los datos usados para los entrenamientos y los datos usados para las pruebas se usa una validación cruzada igual a 3. Las métricas consideradas para la optimización son el *dropout*, la tasa de aprendizaje y el número de neuronas, siendo la exactitud definida como:

$$Exactitud(y, \hat{y}) = \frac{1}{n_{muestras}} \sum_{i=0}^{n_{muestras}-1} 1(\hat{y}_i = y_i) \quad (4.41)$$

La Fig. 4.22 muestra los valores de pérdida y exactitud que los datos de entrenamiento y validación alcanzan para cada ciclo Epoch conforme el algoritmo *backpropagation* avanza en el proceso de optimización de la función de costo (también conocido como función de pérdida).



a) Pérdidas vs Epoch



b) Exactitud vs Epoch

Figura 4.22: Pérdidas y Exactitud vs Epoch para valores de pesos (ω) optimizados, para 1 y 2 CO, con dos y tres variables de entrada.

La Fig. 4.22 a) representa las pérdidas para el conjunto de datos de entrenamiento $\{X_E, y_E\}$ y validación $\{X_{CV}, y_{CV}\}$ en función de los ciclos epoch para los modelos de redes neuronales analizados de 1 y 2 capas ocultas (1 CO, 2 CO) cuando se considera el caso de dos (x^{RSRQ}, x^{TCQI}) y tres ($x^{RSRQ}, x^{TCQI}, x^{PRBr}$) variables de entrada para los valores de pesos optimizados que son obtenidos por medio de la clase *gridsearchcv*. Esta figura muestra cómo las pérdidas se reducen para cada iteración del ciclo epoch. Adicionalmente, se aprecia cómo las pérdidas de 1 CO con tres variables de entrada tienen el mejor resultado

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

en comparación con las otras alternativas aquí evaluadas, alcanzando la convergencia alrededor de epoch=40 y un valor de pérdida igual a 0,045. Por otro lado, la Fig. 4.22 b) muestra la evolución de la exactitud en función de los ciclos epoch para el mismo conjunto de datos de entrenamiento $\{\mathbf{X}_E, \mathbf{y}_E\}$ y validación $\{\mathbf{X}_{CV}, \mathbf{y}_{CV}\}$. La exactitud es determinada después que los parámetros del modelo son aprendidos y representa el porcentaje de clasificación errónea. La Fig. 4.22 b) muestra que el mejor valor de exactitud es obtenido para el modelo de una capa oculta 1 CO, el cual alcanza su convergencia en torno a los 40 epochs con un valor de exactitud alrededor de 0,989.

Así también, se aprecia que para las Fig. 4.22 a) y b) las curvas de validación tienen un mejor rendimiento que las curvas de entrenamiento, esto se debe principalmente al hecho de que Tensorflow realiza el proceso de *dropout* solo para los datos de entrenamiento, mientras que para los datos de validación este proceso se omite. El motivo de este procedimiento es porque durante la fase de entrenamiento se emplea el *dropout* para agregar algún nivel de ruido y así evitar el *overfitting*, mientras que, durante la fase de validación, Tensorflow actualiza los pesos (ω) obtenidos durante el ciclo previo del entrenamiento y usa los pesos actualizados para la fase actual de validación.

Los resultados ilustrados en las Fig. 4.22 muestran que el modelo óptimo se obtiene para el caso de 1 CO con 3 variables de entrada y 12 neuronas. Para esta configuración existen 2 valores de pesos optimizados, $\omega^{[0]}$, que interactúan con la entrada $x_i = (x^{RSRQ}, x^{TCQI}, x^{PRBr})$ y $\omega^{[1]}$, que conecta las 12 neuronas en la capa 1 con la salida final. Cada capa tiene su respectivo sesgo ($\omega_0^{[l]}$). Los pesos y sesgos optimizados para 1 CO para los datos de entrenamiento $\{\mathbf{X}_E, \mathbf{y}_E\}$ se muestran en la ecuación (4.42).

$$\omega^{[0]} = \begin{bmatrix} [4,32; -0,66; -0,91; 3,76; -0,63; -0,80; 0,03; -0,19; -1,15; 0,08; 3,17; -0,02], \\ [0,00; 0,05; 0,07; 0,00; 0,04; 0,05; -3,19; 0,06; 0,09; 0,00; -0,75; -3,41], \\ [1,05; -0,05; -0,06; 0,91; -0,05; -0,06; 0,31; -3,85; -0,08; 0,51; 0,77; 0,15] \end{bmatrix}^T$$

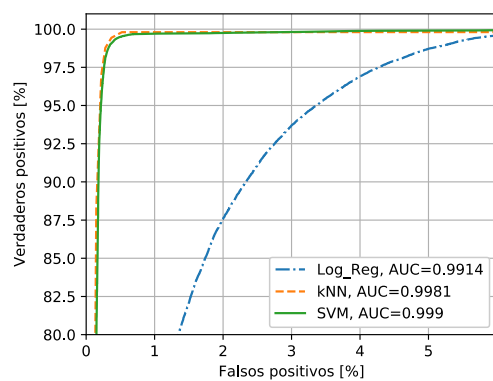
$$\omega_0^{[0]} = [3,51; -0,438; -0,59; 3,04; -0,40; -0,51; 1,08; -2,28; -0,74; 0,94; 2,58; 1,09]$$

$$\omega^{[1]} = [-7,87; 0,69; 0,51; -9,51; 0,73; 0,57; -0,99; -4,55; 0,39; -1,25; -11,01; -0,92]$$

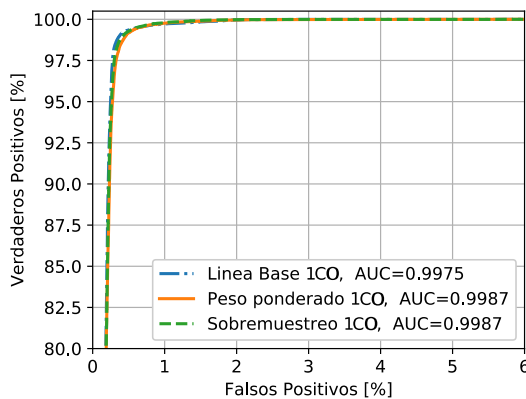
$$\omega_0^{[1]} = [-0,51]$$
(4.42)

La Figura 4.23) representa la curva ROC y el AUC para diferentes algoritmos de clasificación empleados en esta sección. La Fig. 4.23 a) compara los resultados del ROC y AUC de los algoritmos de regresión logístico, kNN y SVM. El método de regresión logística tiene la menor efectividad en la clasificación, esto se debe en mayor medida a que este algoritmo es más indicado para clasificaciones lineales. Por el contrario, kNN y SVM muestran un buen desempeño en la clasificación del conjunto de datos de entrenamiento $\{\mathbf{X}_E, \mathbf{y}_E\}$, en donde el valor de AUC está sobre el 99,8 por ciento.

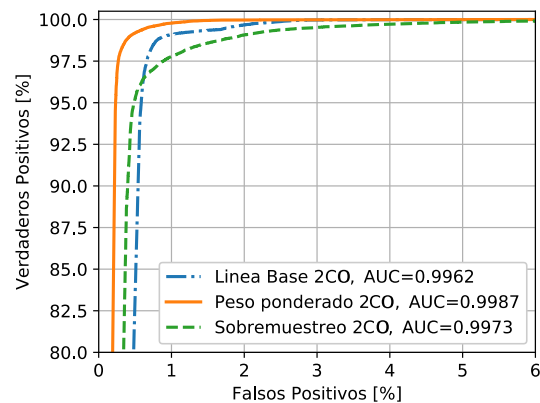
La Fig. 4.23 b) representa el ROC y AUC para el modelo optimizado de 1 CO. La línea azul corresponde al modelo de línea base (este modelo no tiene habilitado ningún método de corrección debido al desbalance de datos), la línea naranja corresponde a los resultados obtenidos aplicando el método de peso ponderado de clases, mientras que la línea verde corresponde con el método de sobremuestreo. Ambos métodos de balanceo de muestras buscan reducir el efecto negativo que aparece cuando los datos son desbalanceados. Se dice que los datos son desbalanceados porque la proporción del número de no colisiones es mucho mayor que el número de colisiones en el *dataset*. Las curvas ROC así como los resultados de AUC tienen un excelente desempeño para diferenciar las clases colisión y libre de colisión. Adicionalmente, esta figura permite apreciar que a pesar de la existencia de datos desbalanceados no existe una ventaja real al usar alguno de los métodos de corrección de desbalance de datos durante la fase de entrenamiento.



a) ROC y AUC para LogReg, KNN y SVM



b) ROC y AUC para 1 CO



c) ROC y AUC para 2 CO

Figura 4.23: ROC y AUC para diferentes algoritmos de clasificación para 3 variables de entrada.

La Fig. 4.23 c) es similar a su contraparte b). Esta figura muestra la curva ROC y el valor de AUC para el modelo optimizado de red neuronal con 2 CO. En general, la Fig. 4.23 muestra que los modelos de red neuronal con 1 CO, kNN y SVM tienen un mejor rendimiento en relación a los otros modelos evaluados al comparar las métricas de ROC y AUC. Por este motivo, solo los valores de pesos y sesgo correspondientes al modelo de 1 CO son ilustrados en la ecuación (4.42).

En resumen, las técnicas de corrección para datos desbalanceados no son muy útiles con el *dataset* usado para el análisis de colisiones. Esto se debe en mayor medida a que las variables seleccionadas $x_i = (x^{RSRQ}, x^{TCQI}, x^{PRBr})$ tienen una frontera de decisión por defecto entre las dos clases (colisión y libre de colisión), lo que permite mitigar el efecto negativo que podría originar la presencia de un *dataset* desbalanceado.

4.4.1 Resultados de precisión y sensibilidad

La Tabla 4.6 muestra los resultados para las métricas de precisión y sensibilidad aplicadas para el conjunto de datos de prueba $\{X_T, y_T\}$ para diferentes algoritmos de ML y para el algoritmo DCD como se describe en [109]. Existen dos clases, colisión y no colisión, las cuales han sido evaluadas simultáneamente para determinar la efectividad con que cada algoritmo diferencia entre estas dos clases. Por ejemplo, un UE_{GA} solo puede tener un estado, el cual es no colisión. Entonces, si se selecciona la clase “No colisión” para un algoritmo de clasificación en concreto, se obtienen los valores de precisión y sensibilidad para el UE que está ubicado en la zona libre de contienda. Por otro lado, si se selecciona un UE_{HA}, este puede tener los dos estados. Por tal motivo, si ocurre una colisión, la clase “Colisión” indica los resultados de las métricas precisión y sensibilidad de cada algoritmo para detectar que efectivamente ocurrió una colisión. Por el contrario, si una colisión no ocurre en el UE_{HA}, la clase “No colisión” indica los resultados de precisión y sensibilidad de los algoritmos de clasificación para detectar que una colisión no sucedió sobre el equipo de usuario de prueba en particular.

Tabla 4.6: Precisión y sensibilidad para diferentes algoritmos de clasificación.

Algoritmo	Clase	Precisión	Sensibilidad
Regresión Logística	No colisión	1	1
	Colisión	0,81	0,81
kNN	No colisión	1	1
	Colisión	0,94	0,96
SVM	No colisión	1	1
	Colisión	0,93	0,96
Red neuronal 1 CO 3var	No colisión	1	1
	Colisión	0,94	0,96
Red neuronal 2 CO 3var	No colisión	1	1
	Colisión	0,88	0,95
DCD	No colisión	1	0,99
	Colisión	0,94	0,99

Como se describe en la Tabla 4.6, a excepción del algoritmo de regresión logística el resto de algoritmos de aprendizaje automático tales como (kNN, SVM, Red neuronal con 1CO para 3 variables de entrada) y DCD proveen resultados similares. Estos algoritmos han alcanzado una precisión sobre el 93 % y una sensibilidad mayor al 96 % para las dos clases analizadas. Y como se mencionó anteriormente, este buen desempeño se debe principalmente a la frontera de decisión natural que las variables seleccionadas despliegan para las clases analizadas.

Cada algoritmo de aprendizaje automático tiene sus características distintivas. Así, kNN guarda el conjunto de datos de entrenamiento en memoria, mientras que SVM y la red neuronal 1 CO obtienen un conjunto de matrices durante el proceso de optimización que son útiles para definir hiperplanos o subespacios que separan las dos clases. Por otro lado, el algoritmo DCD es un algoritmo basado en operaciones matemáticas básicas que emplea umbrales y comparaciones, cuya carga computacional es baja.

4.4.2 Tiempos de procesamiento

La etapa de entrenamiento fue desarrollada en una computadora con las siguientes características de hardware: 16 GB de RAM, 64 bits del sistema operativo, procesador basado en x64 con soporte de 12 CPU, Intel® Core i7 con una velocidad de reloj de la CPU igual a 2.20 GHz. Para determinar y comparar los tiempos de decisión de cada método de clasificación se empleó el comando mágico de Python (`%%time`). Este comando permite obtener el tiempo de CPU empleado en la ejecución de los códigos fuente desarrollados para las fases de entrenamiento y decisión de cada algoritmo.

El tiempo CPU de la fase de entrenamiento es el tiempo empleado por los algoritmos de aprendizaje automático para alcanzar la convergencia de la función de costo durante la etapa de entrenamiento. Se debe notar que para disminuir este tiempo se utilizó procesamiento paralelo, de tal modo que los algoritmos de ML emplearon múltiples procesadores en esta fase. Este tiempo es determinado por el tamaño de los datos de entrenamiento y la complejidad del algoritmo de ML empleados durante la fase de desarrollo. En cambio, el tiempo CPU de decisión depende de la complejidad de la fórmula que define el hiperplano que separa las clases o del método de clasificación optimizado; es decir, el tiempo de decisión es el tiempo empleado desde que se alimenta al algoritmo optimizado con las variables de entrada hasta que se genera una decisión.

Tabla 4.7: Tiempo de procesamiento para diferentes algoritmos de clasificación

Modelo	Tiempo CPU de entrenamiento	Tiempo de decisión (1 registro)
Red neuronal 1 CO	10 min 12 s	242 μ s
Red neuronal 2 CO	4 min 16 s	295 μ s
Regresión Logística	16.8 s	175 μ s
KNN	7 min 2 s	1,07 ms
SVM	32 min 55 s	915 μ s
DCD	NA	9 μ s

La Tabla 4.7 muestra los tiempos de CPU promedios de las fases de entrenamiento y decisión para los algoritmos de aprendizaje automático y DCD. Durante la fase de entrenamiento los algoritmos de clasificación usan el conjunto de datos de entrenamiento $\{\mathbf{X}_E, \mathbf{y}_E\}$, mientras que para la decisión los algoritmos usan un solo registro de entrada $x_i = (x^{RSRQ}, x^{TCQI}, x^{PRBr})$. Los algoritmos basados en redes neuronales (1CO, 2 CO Línea base), kNN y SVM tienen valores elevados de tiempo de entrenamiento en torno a minutos, mientras que el menor valor de tiempo de entrenamiento fue desarrollado por el

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

algoritmo de regresión logística. El algoritmo DCD tiene el menor valor de tiempo de decisión, debido a su baja complejidad y a que se basa en valores de umbral y comparaciones, lo cual lo hace útil en aplicaciones sensibles al retardo.

Operativamente, cada vez que una ventana de muestreo finaliza (200 ms), un vector de entrada ($x^{RSRQ}, x^{TCQI}, x^{PRBr}$) es generado por la mediciones realizadas en capa física. Este vector alimenta al algoritmo de aprendizaje automático seleccionado (por ejemplo red neuronal con 1 CO), el cual es configurado usando los valores optimizados de pesos y sesgo, y después de un tiempo de decisión (242 μ s para el caso red neuronal 1CO), se obtiene una salida \hat{y}_i . De este modo, es posible estimar la probabilidad de que un UE concreto esté afectado por interferencias provenientes de cualquier fuente en una ventana de 200 ms. Este proceso es repetido indefinidamente en los periodos definidos por la ventana de muestreo de los reportes de medidas del UE.

Sin embargo, ningún algoritmo de clasificación está libre de predicciones erróneas. Por este motivo, las decisiones acerca de si un UE debería ser clasificado como afectado por nodos ocultos no puede basarse solo en un periodo de reporte de medidas. Por medio del análisis de los datos provenientes de varios periodos consecutivos de medición de 200 ms (hasta un número máximo M_A) se ha encontrado que la probabilidad de que un UE obtenga una segunda decisión de colisión dado que una primera colisión ocurrió para un UE ubicado efectivamente en zona oculta, es mayor que la probabilidad de que un UE sea evaluado como afectado por una segunda falsa colisión dado que una primera falsa colisión sucedió con el UE ubicado en zona libre de colisión. Las colisiones se concentran en torno al tiempo que los datos recibidos son afectados por las interferencias (colisiones). La duración de la colisión depende de la duración del tráfico generado desde la fuente de interferencia, la cual, generalmente, durará varias subtramas. En cambio, las falsas colisiones se relacionan con eventos de desvanecimientos o malas condiciones de canal, los cuales ocurren aleatoriamente y son cortas de duración. Con esto en mente, para reducir la probabilidad de detección de una falsa colisión para los algoritmos de clasificación, estos algoritmos deben evaluar el número de colisiones que ocurren dentro del intervalo de tiempo dado por M_A * tiempo de la ventana de muestreo. En nuestro caso para el valor de $M_A=4$, si el número de colisiones previstas son mayores o iguales que 2, se puede establecer que el UE está afectado por colisiones y por tal motivo se encuentra en el interior de la zona oculta. De esta manera, es posible eliminar casi por completo los errores debido a falsas predicciones.

4.5 Conclusiones

En capítulo ha considerado el uso de varios algoritmos de clasificación basados en aprendizaje automático, redes neuronales y método de clasificación heurístico, los cuales clasifican a los UE en dos posibles clases: UE afectados por colisión y UE libres de colisión, con la finalidad de encontrar una solución para detectar cuándo un UE está siendo afectado

por nodos ocultos en despliegues LTE LAA. La detección es aplicada y ejecutada en el eNB, de manera independiente para cada UE asociado a su LAA eNB, donde el número de UE evaluados simultáneamente no está limitado. Esto significa que el porcentaje de UE afectados por las transmisiones de nodos ocultos que son detectados es igual a la probabilidad de clasificación exitosa de un UE como afectado por colisiones. Con esto en mente, se han analizado parámetros como RSRP, RSRQ reportados por los UE, la distribución CQI y la carga de tráfico en el eNB servidor como función del número de PRB. El análisis se ha desarrollado sobre un canal dinámico, con condiciones de carga de tráfico servidor e interferente variable para comprender cómo estos parámetros se ven afectados cuando sobre ellos inciden diferentes niveles de interferencia.

Se ha estudiado la dependencia entre el RSRP, RSRQ y el SINR en escenarios que enfrentan diferentes niveles de interferencia, lo que ha permitido obtener una expresión analítica que define un valor de umbral de RSRQ, y por medio de este umbral es posible desarrollar un clasificador heurístico que detecta si un nodo es afectado por colisiones. Así también, se estudia la métrica CQI, demostrando mediante simulaciones que existe una correlación entre el porcentaje de la variable TCQI con el COT de la celda interferente, el cual es útil cuando se desea tener una idea del estado del canal sobre el UE ubicado en los límites de cobertura de la celda. Los resultados muestran que la combinación de valores umbral $TCQI_{Min}$ y $RSRQ_{avTh}$ pueden ser empleados para su uso en métodos predictivos para detectar si un UE ha ingresado en zona oculta y por consiguiente si este UE está siendo afectado por las interferencias que provienen desde nodos ocultos.

Se ha desarrollado un algoritmo heurístico que emplea las métricas aquí estudiadas basado en valores umbrales y comparaciones simples. Este algoritmo ha sido sometido a una evaluación de su rendimiento en donde condiciones tales como pérdidas de propagación lognormal y multirayectoria, movilidad del UE y diferentes tipos de tráfico son considerados. Los resultados muestran que el algoritmo detecta correctamente cuando el nodo es afectado por colisiones el 95% de las veces cuando el $marSinr=0$. Así también, el algoritmo alcanza un porcentaje cercano al 100% en la exactitud de la decisión cuando el UE se encuentra en zona libre de colisión de forma independiente de las condiciones del canal.

Se ha encontrado que los algoritmos de aprendizaje automático, así como las redes neuronales, realizan un buen trabajo en la detección de cuándo ocurre una colisión, gracias a la correcta selección de variables, lo cual facilita la obtención del hiperplano que separa las dos clases analizadas (colisión y libre de colisión). En general, los algoritmos kNN, SVM y red neuronal con 1 CO realizan un buen trabajo de clasificación para nuestro conjunto de datos, que tiene registros que provienen de escenarios LAA LAA, así como LAA Wi-Fi, obteniendo resultados superiores al 93% para las métricas de precisión y sensibilidad. Estos resultados son similares a los que se obtienen con el uso del algoritmo heurístico DCD, el cual está sobre el 94%. En referencia al tiempo de decisión de estos algoritmos para un registro $(x^{RSRQ}, x^{TCQI}, x^{PRBr})$, el algoritmo DCD tiene la menor latencia, mientras que kNN tiene una latencia mayor a 1 ms.

CAPÍTULO 4: DETECCIÓN DE TERMINALES AFECTADOS POR NODOS OCULTOS EN REDES LAA

A pesar de la alta popularidad de las técnicas de aprendizaje automático para rutinas de clasificación, existen otras consideraciones a realizar para evaluar la conveniencia y el costo de su uso. Así, se tiene que factores como la facilidad para la adquisición de datos confiables para la ejecución de la fase de entrenamiento, el costo computacional asociado al uso del algoritmo y los tiempos de decisión, son variables que también deberían ser considerados en la selección del método adecuado de clasificación y no solo la precisión de la clasificación. Tal como se muestra en nuestro caso, la precisión de la clasificación para DCD y las técnicas de aprendizaje automático son prácticamente las mismas. Sin embargo, existe una notable diferencia en los parámetros de costo computacional y tiempo de decisión, los cuales son considerados en nuestro análisis. La decisión de qué método de clasificación usar depende de las características particulares del problema. Para nuestro caso la selección adecuada es el algoritmo DCD, el cual tiene un buen desempeño en la precisión y sensibilidad de la detección, así como un bajo costo computacional y el menor tiempo de decisión.

Capítulo 5

Conclusiones y Líneas Futuras de Investigación

5.1 Conclusiones

El trabajo presentado en esta tesis se enfoca en la detección de UE afectados por la presencia de nodos ocultos en el contexto de despliegues de LTE en bandas sin licencia. En concreto, LAA. La detección, efectuada en escenarios *indoor/hotspot* donde coexisten nodos LTE de distintos operadores o nodos LTE y Wi-Fi, se hace forma independiente a la tecnología de la fuente interferente, empleando un conjunto de métricas actualmente definidas en el estándar LTE, sin considerar el posible intercambio de información entre nodos de distintos operadores. Con estas consideraciones, el estudio realizado permite obtener las siguientes conclusiones.

5.1.1 Impacto de la presencia de nodos ocultos

En primera instancia se evalúa cómo la presencia de nodos ocultos afecta la tasa de satisfacción de los UE pertenecientes a la celda LAA, para lo cual se evalúan dos escenarios de coexistencia: LAA LAA y LAA Wi-Fi. Los resultados de cada escenario son comparados entre sí para determinar cómo las particularidades de cada tecnología afectan

a su propia tecnología y a la otra, facilitando la tarea de obtener conclusiones generales que en nuestro caso particular están centradas en las redes LAA.

El estudio realizado muestra que la tasa de satisfacción de los UE_{HA} varía en función de la potencia de la señal interferente y de la intensidad de la carga de tráfico del nodo interferente, la cual está relacionada con el tiempo de ocupación del canal (COT) del nodo interferente. La potencia de la señal interferente varía dependiendo de las condiciones del canal, y la posición relativa del UE_{HA} en relación al nodo interferente. Gracias a los reportes de CQI por parte del UE, y a la adaptación dinámica del enlace el *scheduler* puede asignar una mayor cantidad de recursos PRB con menor eficiencia espectral cada vez que una colisión afecta al UE_{HA}. Cuanto mayor es la señal interferente menor es el valor de índice CQI reportado y menor es el MCS seleccionado por el *scheduler*, lo que implica menos bits por PRB. Sin embargo, el problema del nodo oculto no es en sí la colisión que, en caso de poder ser predicha con antelación, puede ser manejada por los mecanismos de adaptación dinámica del enlace de LTE mencionados. El problema es que el carácter on-off de las transmisiones efectuadas por los nodos ocultos provoca que en condiciones de bajo COT los errores en la estimación del canal sean frecuentes y la elección de la MCS errónea. Por otra parte, un elevado COT interferente provoca en el UE_{HA} una demanda constante de PRB con una baja eficiencia espectral para cubrir constantes retransmisiones, a tal punto que la demanda puede ser mayor que la oferta de PRB lo que provoca una caída de la tasa de satisfacción incluso de los UE que se encuentran en zona libre de colisión.

En escenarios LAA LAA, las características propias de LTE como son reportes del CSI basados en CQI, adaptación dinámica del enlace, selección del *scheduler* de MCS en función del CQI, y características del procedimiento LBT como detección de colisiones basadas en señales NACK que deben superar un valor umbral ($Z > 80\%$) que conducen a un procedimiento de *backoff* poco sensible a la presencia de colisiones, hacen que las redes LAA tiendan a contrarrestar los efectos de las colisiones con una mayor cantidad de PRB asignados a los UE_{HA} afectados por la interferencia. En definitiva, a una mayor COT por parte del eNB servidor. El incremento en el COT del eNB servidor que tiene asociado una UE_{HA ser} puede empeorar en el escenario que el eNB interferente tenga un UE_{HA int}, ya que cada celda incrementará su COT por cada colisión que suceda en su respectiva celda provocando un efecto en cascada que no beneficia a ninguna de las celdas.

LAA y Wi-Fi comparten similares consideraciones de diseño en los protocolos de acceso al medio, LBT y CSMA/CA. Sin embargo, debido a las particularidades de cada método no es posible alcanzar una coexistencia justa y amigable entre estas dos tecnologías en un contexto de nodos ocultos, ya que las diferencias entre ambos métodos generan un comportamiento injusto de LAA en contra de Wi-Fi. En específico, en un ambiente con constantes colisiones debido a la presencia de nodos ocultos, LAA es capaz de mantener en mayor medida su tasa de satisfacción en sus UE. Esto se debe a las características propias del acceso centralizado de LTE y a la aplicación de un procedimiento de *backoff* que, como se ha dicho, es poco propenso a la activación, mientras que Wi-Fi, con las limitaciones propias de su tecnología, tiene que lidiar con un procedimiento de *backoff* muy sensible a

las colisiones. Adicionalmente, la detección de colisiones a través de NACK o la ausencia de ACK es más temprana en el caso de Wi-Fi, (9 μ s frente a los 4ms de LTE) lo que permite a LTE tener un monopolio del canal por un tiempo de 4 ms independiente de la existencia o no de colisiones, mientras que Wi-Fi suspende su transmisión a los pocos microsegundos de no recibir el ACK. Todas estas diferencias permiten que LAA ocupe mayor tiempo el canal a pesar de que existan interferencias que afectan a sus UE_{HA}. Por otro lado, si existen interferencias afectando a las STA_{HA} de una red Wi-Fi, el procedimiento de *backoff*, debido a su mayor sensibilidad a colisiones, se ejecutará constantemente incrementando su CW y permaneciendo el AP en silencio en una proporción mucho mayor que un eNB afectado por similares condiciones de interferencia lo que favorece significativamente a LAA en detrimento de Wi-Fi en un escenario de coexistencia LAA Wi-Fi. Por este motivo, para mejorar la coexistencia de redes LAA Wi-Fi, no es suficiente con la unificación de parámetros en torno al acceso al medio, sino una reestructuración de la capa MAC por parte de Wi-Fi que mejore sus prestaciones, a la vez que LAA debe considerar el ajuste de sus parámetros a unos que reduzcan su predisposición a estar siempre transmitiendo.

En cualquier caso, está clara la importancia de la identificación de los UE que están siendo afectados por la presencia de nodos ocultos, ya que su detección permite la aplicación de métodos focalizados para evitar el uso ineficiente de recursos radio por parte de estos dispositivos. En este sentido, y con el objetivo de proveer cierto nivel de QoS en la banda no licenciada, se requiere establecer alguna estrategia para detectar la presencia de nodos ocultos (o sus efectos tan pronto son percibidos por los dispositivos móviles) y evaluar si los UE que están enfrentando el problema de terminal oculto deben permanecer en la banda no licenciada o deben ser cambiados a otra banda no licenciada con mejores condiciones de canal o a la banda licenciada cuando su presencia tiene un efecto perjudicial sobre las prestaciones de la red LAA.

5.1.2 Análisis de la variable CQI para la detección de nodos ocultos

En primera instancia, se consideró que el patrón de distribución en el tiempo de los valores de CQI podría ser un buen indicador de la localización de un UE en zona afectada por un nodo oculto. Para ello, en una primera fase de la tesis se procede a configurar un escenario de simulación simple pero que permite tener un máximo control sobre los parámetros que están presentes en los escenarios de coexistencia (LAA LAA y LAA Wi-Fi) con la presencia de nodos ocultos. Es así que en primera instancia se habilita un escenario con un canal ideal (considera las pérdidas de propagación debido a la distancia y desvanecimientos lognormales), sin movilidad de UE con una sola fuente de interferencia que varía su carga de tráfico en forma aleatoria, controlada y progresiva. De acuerdo a los resultados obtenidos en esta etapa, en un canal ideal sin movilidad de los UE, la distribución de CQI reportada por un UE_{HA} presenta una distribución bimodal, lo que corresponde con los dos estados que un UE en zona oculta puede presentar: libre de colisión o afectado por colisión. Cuando el UE_{HA} no esté siendo afectado por colisiones sus valores

reportados de CQI serán iguales a los valores reportados por UE ubicados en zona libre de colisión (UE_{GA}), cuyo valor depende exclusivamente de las condiciones del canal. En cambio, cuando el UE_{HA} está siendo afectado por colisiones los valores de CQI reportados se ubicarán en la parte baja de la distribución, con índices contenidos en el rango $[0, 5]$, y su valor depende de la potencia de la señal interferente. Se logra confirmar la bimodalidad en la distribución de CQI para diferentes posiciones de los UE al interior de la zona oculta de la celda. Este carácter bimodal de la distribución de CQI se vislumbraba como un buen indicador de la localización de un UE en una zona afectada por la presencia de nodos ocultos.

Sin embargo, cuando se considera un canal más realista, con desvanecimientos rápidos y movilidad de UE, los CQI reportados por los UE_{HA} pierden la bimodalidad y sus índices se distribuyen sobre todo el rango de índices CQI, algo similar ocurre con los CQI reportados por los UE_{GA} en donde los valores bajos de MCS pueden dar la idea de una falsa colisión. Cabe notar que en el caso de los índices reportados por el UE_{HA} se identifica que las colisiones en su gran mayoría continuarán concentrándose sobre los índices $[0, 5]$, mientras que para los índices CQI reportados por el UE_{GA} , salvo en el caso de que se encuentren en los límites de cobertura, la mayor proporción de su distribución se concentran en los índices $[6, 15]$. Pese a las diferencias en las señales CQI y la distribución entre UE_{HA} y UE_{GA} estas no son suficientes para la detección de UE afectados por interferencias provenientes de terminales ocultos frente a UE_{GA} situados en los límites de la celda. Estos resultados obligan a replantear el uso de la distribución CQI en conjunto con otras variables cuyo comportamiento sea más estable dentro de rangos definidos y así superar los problemas asociados al nuevo canal y a la movilidad.

5.1.3 Desarrollo de soluciones para la detección de UE afectados por la presencia de nodos ocultos.

De los resultados obtenidos para la distribución CQI para las nuevas condiciones de canal, es posible identificar que las colisiones se concentran en la parte baja de la distribución CQI, índices $[0, 5]$, lo que permite definir nueva variable denominada TCQI que está en función del valor de las frecuencias de la distribución CQI sobre los índices 0 a 5. Esta variable presenta un valor constante en función de la ubicación de los UE_{GA} en el límite de la celda y que depende exclusivamente de las características del canal de comunicaciones. De tal modo que es posible determinar un umbral $TCQIMin$ en donde valores de TCQI menores que $TCQIMin$ se deben a interferencias leves o un UE que está comenzando a sentir los efectos de un mal canal. Por otro lado, valores de TCQI mayores que $TCQIMin$ se deben a un mayor efecto de un mal canal de comunicaciones en conjunto con colisiones de nivel moderado a fuerte. Este constituye un primer acercamiento en la definición de un umbral para detección de colisiones. Sin embargo, la métrica TCQI no es suficiente para distinguir con una alta precisión cuando un UE se ve afectado exclusivamente por colisiones.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Continuando con el análisis de otras métricas útiles en la detección de UE afectados por nodos ocultos, se considera la variable RSRQ. Esta métrica describe la relación entre el RSRP, el RSSI y el número de PRB usados para medir el RSSI. Tanto el RSSI como el RSRQ son influenciados por los siguientes factores de conectividad: la posición del UE, el nivel de interferencia y la cantidad de tráfico producido por los usuarios pertenecientes a la celda. Además, el RSRQ es reportado en forma periódica por parte del UE hacia su eNB, lo que es aprovechado por el algoritmo de detección de colisiones y de este modo se define una ventana de toma de medidas común para ambos procedimientos. De este modo es posible que el algoritmo de detección de colisiones tenga compatibilidad con otros procedimientos radio como *handover* o reelección de celdas.

El valor de la métrica RSRQ varía en función de la carga del tráfico de la celda y de la interferencia. En ausencia de interferencia su valor varía en un rango definido entre -10,8 a -3 dB. En cambio, conforme el ruido y la interferencia comienzan a incidir sobre la métrica RSRQ, ésta incrementa su rango, sobrepasando el valor mínimo, siendo los valores de RSRQ que se ubican por debajo del valor mínimo aquellos que están relacionados con colisiones. Por tal motivo, se aprovecha estas características del RSRQ para definir un valor umbral dinámico (*RSRQ threshold*) el cual depende de la potencia de la señal interferente y de la carga de tráfico mapeado en el número de PRB usados por el eNB servidor en *downlink*, el cual permite identificar valores de RSRQ asociados con transmisiones afectadas por interferencias y valores de RSRQ asociados con transmisiones libres de interferencias.

La información complementaria reportada por las métricas CQI y RSRQ permite el desarrollo de un algoritmo heurístico robusto y dinámico, denominado DCD (*Dynamic Collision Detector*), basado en comparaciones simples y valores umbrales que permite identificar cuándo un UE en una red LAA está siendo afectado por colisiones, que en nuestro caso en particular provienen de transmisiones de nodos ocultos. El algoritmo emplea la distribución CQI mapeada en los valores de la variable TCQI en conjunto con las métricas RSRP y RSRQ. El algoritmo se adapta automáticamente, de tal modo que permite detectar colisiones en cualquier momento que el RSRQ cae por debajo de un valor umbral y el valor de TCQI supera un valor mínimo, permitiendo generar una respuesta en intervalos de tiempo igual a la duración de la ventana temporal usada para el reporte de medidas RSRP y RSRQ desde el UE al eNB. La detección de colisiones se realiza para valores superiores a un RSRP umbral, si la señal RSRP medida por el UE cae por debajo de RSRP umbral se considera que el UE entra en zona de *handover* y le urge asociarse a otra celda caso contrario perderá la conexión. El algoritmo heurístico ha sido evaluado para diferentes tipos de escenarios de coexistencia, diferentes tipos y cargas de tráfico variable en forma independiente para la celda servidora e interferente. Los análisis se desarrollaron sobre un canal problemático el cual considera escenarios con: LOS, NLOS, pérdidas lognormales, multitrayectoria, movilidad de los UE tanto en zona oculta como en zona libre de colisiones en la banda de 5 GHz mediante extensivas campañas de simulación alcanzando excelentes resultados para las métricas de precisión y sensibilidad en la detección de colisiones.

Alternativamente al algoritmo heurístico, se considera el uso de clasificadores basados en técnicas de aprendizaje automático que aprovechan el volumen, la disponibilidad y calidad de los datos generados por la herramienta de simulación. Esto es posible debido a que el simulador dispone de toda la pila de protocolos asociados a LTE y LAA que junto a extensas campañas de simulación lograron generar un *dataset* útil para el entrenamiento y pruebas de diferentes algoritmos de aprendizaje automático y redes neuronales que permitieron la clasificación de los UE en dos clases: afectados por colisión y libres de colisión, obteniendo una respuesta en intervalos de tiempo igual a los empleados por el algoritmo heurístico. Las variables empleadas para alimentar a los algoritmos de ML son RSRQ, TCQI y PRBr. Del análisis de los datos se puede apreciar que las dos métricas principales empleadas en los diferentes algoritmos, RSRQ y TCQI, presentan fronteras de decisión claras entre las clases colisión y no colisión, lo que facilita la diferenciación entre estas clases a la vez que permite superar el problema asociado a datos desbalanceados, ya que la clase colisión se encuentra sub-representada, sin la necesidad de aplicar algún método de corrección para este problema.

Finalmente, se comparan los resultados de precisión y sensibilidad de los algoritmos basados en técnicas de ML con el algoritmo basado en el método heurístico. El análisis de precisión y sensibilidad permite determinar la existencia o ausencia de colisiones sobre los UE_{HA} y sobre cualquier UE_{GA} en forma independiente de las características del canal de comunicaciones. Del análisis de precisión y sensibilidad se establece que algunos algoritmos basados en ML (red neuronal con 1 capa oculta, SVN y kNN) y el algoritmo heurístico presentan un buen desempeño en las tareas de clasificación, obteniendo resultados superiores al 93% para las métricas de precisión y sensibilidad. Sin embargo, las diferencias en el desempeño aparecen al evaluar parámetros como el tiempo de decisión, el costo computacional o la facilidad para la obtención de datos para la fase de entrenamiento. Es en la evaluación de estos parámetros donde el algoritmo heurístico presenta una ventaja, ya que su tiempo de decisión está en el orden de decenas de microsegundos en comparación a los algoritmos de ML que tienen tiempos en el orden de cientos de microsegundos, llegando a alcanzar latencias próximas a 1 milisegundo, no requiere de datos para su entrenamiento y su implementación es simple.

5.2 Líneas Futuras de Investigación

Las contribuciones realizadas en esta tesis, dejan abiertas las siguientes líneas de investigación:

Los resultados obtenidos en esta tesis muestran el impacto que la presencia de nodos ocultos de diferente tecnología puede tener sobre los recursos radio disponibles en el eNB y en general sobre las prestaciones de la red. Así también se han desarrollado algoritmos que permiten la identificación de los UE que están siendo afectados por diferentes niveles de interferencia cuyo origen está determinado por la presencia de terminales ocultos.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Entonces, una línea de investigación es el diseño y evaluación de algoritmos que permitan la gestión del *offloading* de los UE afectados por los nodos ocultos a otras bandas licenciadas o no licenciadas cuando estos UE realmente representan un problema en la banda no licenciada. Con esta finalidad es necesaria la definición y priorización de parámetros que serán empleados para la elaboración de estos algoritmos que deben considerar esquemas dinámicos de carga de tráfico, parámetros de QoS, nivel de ocupación de la radio base servidora, estado del canal de comunicaciones, nivel de interferencia, etc. tanto para la banda no licenciada donde actualmente reside el UE afectado por colisiones como de las bandas no licenciada o licenciada que podrían ser empleados para el traspaso. Estos algoritmos deberían permitir cuantificar la relación costo-beneficio del traspaso de dispositivos móviles de la banda no licenciada a la licenciada y viceversa ya que a diferencia de la banda licenciada en donde existe parámetros de QoS que deben ser garantizados, la banda libre no tiene esta restricción y el algoritmo debería tender a usar esta banda para el tráfico no prioritario.

Otra línea de investigación en relación a la coexistencia de LAA con otras redes LAA u otra tecnología en la banda no licenciada se refieren al estudio, diseño y evaluación de procedimientos de monitorización y selección eficiente del canal no licenciado. Como se ha demostrado en la tesis, las métricas generadas por los UE permiten discriminar entre malas condiciones del canal, diferentes niveles de ocupación del canal e interferencias tanto para la celda servidora como para la celda interferente en caso de que existiese en el espectro no licenciado. Esta información permite tener una idea del nivel de la calidad del canal, así como de la intensidad del tráfico interferente en torno a cada dispositivo móvil y no solo en torno a la radio base la cual puede presentar una información incompleta. Las métricas estudiadas en esta tesis y que provienen del UE pueden ser útiles en el desarrollo de algoritmos de monitorización y selección dinámica del canal no licenciado para celdas basadas en LTE en banda no licenciada, ya que las mismas permiten obtener información asociada a las celdas vecinas (nivel de la interferencia y COT de la celda interferente) lo que incide directamente sobre el estado del canal compartido, permitiendo planificar la conveniencia del uso de un canal en específico o su cambio para cada celda LAA, lo que al final contribuye a una mejor coexistencia entre operadores.

Una vez determinada la incidencia que la interferencia puede ejercer sobre los UE y su eNB en una red LAA y lograr la identificación del UE al interior de la zona oculta, sería de especial interés la aplicación de estrategias para el control del acceso de usuarios a la celda LAA y el reparto eficiente de tráfico entre portadoras licenciada y no licenciada. La red LAA está sometida a un canal muy dinámico en donde las interferencias son una constante en especial en el contexto de despliegues densos que es donde se espera su principal aplicación. Como se ha mostrado en esta tesis, es la ubicación del UE en relación con su radio base servidora e interferente y el COT de la señal interferente los parámetros que tienen mayor incidencia sobre el consumo de recursos por parte del UE. LAA debe aprender a convivir con las interferencias y cuando estas sean leves, focalizadas y exista disponibilidad de recursos gestionar el acceso de nuevos usuarios a la celda. Por lo tanto, parámetros como estimación de demanda, estimación de las condiciones del canal,

ubicación del UE dentro o fuera de la zona oculta, estimación del nivel de interferencia son variables que pueden ser estimados directa o indirectamente en la radio base, las cuales permiten el desarrollo de esquemas para una mejor gestión de acceso en los usuarios evitando el desperdicio o la saturación en el uso los recursos radio en el eNB. Adicionalmente, se espera que LAA opere junto a otras celdas de pequeña cobertura y reducida potencia las cuales serán la principal fuente de interferencia en la banda libre. En este sentido el estudio de estrategias para la gestión del tráfico entre portadoras licenciadas y no licenciadas entre celdas que pueden pertenecer al mismo operador y, por consiguiente, que permiten la coordinación de las mismas o celdas de operadores independientes en función del contexto de tráfico e interferencias es un tema complejo que necesita ser abordado considerando el auge que el uso de banda no licenciada va a tener con el advenimiento de 5G.

En el contexto de algoritmos de aprendizaje automático profundo (*deep learning*), una línea de investigación puede considerar el uso de algoritmos que permitan la predicción del comportamiento de tráfico de tal modo que permita el empleo de una acción proactiva, antes que reactiva para la asignación de recursos dentro de una ventana de tiempo en el futuro. Este enfoque permitiría a múltiples celdas LAA desarrollar proactivamente tareas de selección dinámica del canal, asignación dinámica de recursos frecuenciales, *carrier aggregation*, etc. mientras se garantiza un cierto nivel de equidad con las redes de otros operadores. La adopción de métodos proactivos de coexistencia entre LAA con Wi-Fi y otras redes tiene como objetivo evitar la sub-utilización del espectro no licenciado, en este sentido el esquema proactivo de asignación de recursos será capaz de explotar la inherente predictibilidad de la disponibilidad futura del canal, atendiendo una fracción de la demanda de tráfico tolerante al retardo manejado por el eNB LAA al momento que es solicitada y trasladando otra parte de este tráfico al futuro sobre una ventana predicción determinada, logrando balancear la demanda de tráfico en el tiempo y reduciendo la diferencia entre las cargas de tráfico máxima y promedio. Con este fin se puede considerar el empleo de algoritmos de *reinforcement learning* basados en *long short term memory* (RL-LSTM) los cuales son capaces de almacenar información por largos periodos de tiempo para aprender la dependencia en el largo plazo dentro de una secuencia de datos. De este modo las redes LSTM son capaces de predecir una secuencia de acciones futuras, lo que aplicado en la banda no licenciada permitiría al eNB LAA aprender una secuencia de acciones futuras basada en secuencias de datos de tráfico históricos y así maximizar el tráfico total servido por la celda LAA.

Anexo - Contribuciones Científicas

Publicaciones en Revistas Internacionales (JCR)

- P. Campos, Á. Hernández-Solana, and A. Valdovinos-Bardají, “Analysis of Hidden Node Problem in LTE Networks Deployed in Unlicensed Spectrum,” *Computer Networks*, vol. 177, p. 107280, Aug. 2020, ISSN 1389-1286.
<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107280>
- P. Campos, Á. Hernández-Solana, and A. Valdovinos-Bardají, “Machine Learning for Hidden Nodes Detection in Unlicensed LTE Networks,” *Computer Networks*, vol. 208, p. 108862, May 2022, ISSN 1389-1286.
<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.108862>

Publicaciones en Conferencias Internacionales

- P. Campos, A. Hernández-Solana, and A. Valdovinos-Bardaji, “Detection and Impact of the Hidden Node Problem in LAA-WiFi Coexistence Scenarios,” *2018 14th Int. Wirel. Commun. Mob. Comput. Conf. IWCMC 2018*, pp. 1391–1397, 2018, doi:10.1109/IWCMC.2018.8450486
- P. Campos, A. Hernández-Solana, and A. Valdovinos-Bardají, “Dealing with the Hidden Node Problem in Multioperator LAA-LTE Scenarios,” *2018 IFIP/IEEE Int. Conf. Perform. Eval. Model. Wired Wirel. Networks*, pp. 1–7, 2018, doi:10.23919/PEMWN.2018.8548936

Bibliografía

- [1] Ericsson, “Ericsson Mobility Report,” no. June, p. 36, 2021.
- [2] Huawei Xlabs Wireless, “The Future of Mobile Broadband,” pp. 1–28, 2017.
- [3] 3GPP-TR36.889, “Study on Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum,” 2015.
- [4] H. Disclains *et al.*, “Coexistence Guidelines for LTE in Unlicensed Spectrum Studies v2.0,” *WiFi Alliance*, no. November, pp. 1–40, 2015.
- [5] R. Zhang, M. Wang, L. X. Cai, Z. Zheng, X. S. Shen, and L. L. Xie, “LTE-unlicensed: The future of spectrum aggregation for cellular networks,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 22, no. 3, pp. 150–159, 2015.
- [6] A. S. Mubarak, H. Esmail, and E. M. Mohamed, “LTE/Wi-Fi/mmWave RAN-Level interworking using 2C/U plane splitting for future 5G Networks,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 53473–53488, 2018.
- [7] G. Naik, J. Liu, and J. M. J. Park, “Coexistence of wireless technologies in the 5GHz bands: A survey of existing solutions and a roadmap for future research,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 1777–1798, 2018.
- [8] 3GPP TS 36.214, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements (3GPP TS 36.214 version 14.2.0 Release 14),” vol. 0, pp. 0–24, 2017.
- [9] 3GPP TS 36.213, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (3GPP TS 36.213 version 15.2.0 Release 15),” 2018.
- [10] Q. Technologies, “Qualcomm Research LTE in Unlicensed Spectrum: Harmonious Coexistence with Wi-Fi,” 2014.
- [11] CBRSA-TS-1002, “CBRS Network Services Stage 2 and 3 Specification, V3.0.0, 18 Feb 2020.”
- [12] 3GPP TR 38.889, “Study on NR-based access to unlicensed spectrum (Release 15), v16.0.0.”
- [13] M. Hirzallah, M. Krunz, B. Kecicioglu, and B. Hamzeh, “5G New Radio Unlicensed: Challenges and Evaluation,” *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, pp. 1–13, 2020.

- [14] E. Baena, S. Fortes, and R. Barco, “KQI Performance Evaluation of 3gpp LBT Priorities for Indoor Unlicensed Coexistence Scenarios,” *Electron.*, vol. 9, no. 10, pp. 1–16, 2020.
- [15] A. Babaei, J. Andreoli-Fang, Y. Pang, and B. Hamzeh, “On the Impact of LTE-U on Wi-Fi Performance,” *Int. J. Wirel. Inf. Networks*, vol. 22, no. 4, pp. 336–344, 2015.
- [16] TSGR, “TR 136 932 - V16.0.0 - LTE; Scenarios and requirements for small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN (3GPP TR 36.932 version 16.0.0 Release 16),” 2020.
- [17] D. Morley, “5G Small Cells and Cable Realizing the Opportunity,” *Expo Cable Tec*, pp. 1–20, 2018.
- [18] R. K. Saha, “Coexistence of Cellular and IEEE 802.11 Technologies in Unlicensed Spectrum Bands -A Survey,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 2, no. August, pp. 1996–2028, 2021.
- [19] N. Patriciello, S. Lagen, B. Bojovic, and L. Giupponi, “NR-U and IEEE 802.11 technologies coexistence in unlicensed mmWave spectrum: Models and evaluation,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 71254–71271, 2020.
- [20] J. Oh, Y. Kim, Y. Li, J. Bang, and J. Lee, “Expanding 5G new radio technology to unlicensed spectrum,” *2019 IEEE Globecom Work. GC Wkshps 2019 - Proc.*, 2019.
- [21] L. Giupponi, T. Henderson, B. Bojovic, and M. Miozzo, “Simulating LTE and Wi-Fi Coexistence in Unlicensed Spectrum with ns-3,” *arXiv Prepr. arXiv1604.06826*, 2016.
- [22] E. Pateromichelakis, O. Bulakci, C. Peng, J. Zhang, and Y. Xia, “LAA as a Key Enabler in Slice-Aware 5G RAN: Challenges and Opportunities,” *IEEE Commun. Stand. Mag.*, vol. 2, no. 1, pp. 29–35, 2018.
- [23] IEEE, “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” *IEEE Std 802.11-2016 (Revision IEEE Std 802.11-2012)*, pp. 1–3534, 2016.
- [24] H. Zhai, Y. Kwon, and Y. Fang, “Performance analysis of IEEE 802.11 MAC protocols in wireless LANs,” *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 4, no. 8, pp. 917–931, 2004.
- [25] S. Ray, J. B. Carruthers, and D. Starobinski, “RTS/CTS-Induced Congestion in Ad Hoc Wireless LANs.”
- [26] J. L. Sobrinho, R. De Haan, and J. M. Brázio, “Why RTS-CTS is not your ideal wireless LAN multiple access protocol,” *IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. WCNC*, vol. 1, pp. 81–87, 2005.
- [27] I. Koukoutsidis and V. A. Siris, “802.11e EDCA protocol parameterization: A modeling and optimization study,” *2007 IEEE Int. Symp. a World Wireless, Mob. Multimed. Networks, WOWMOM*, 2007.
- [28] S. Szott, M. Natkaniec, and A. R. Pach, “An IEEE 802.11 EDCA model with support for analysing networks with misbehaving nodes,” *Eurasip J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2010, 2010.
- [29] ETSI, “TR 25.892 V6.0.0; 3GPP; Technical Specification Group Radio Access Network; Feasibility Study for Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) for UTRAN enhancement,” 2006.
- [30] B. Chen, J. Chen, Y. Gao, and J. Zhang, “Coexistence of LTE-LAA and Wi-Fi on 5 GHz with Corresponding Deployment Scenarios: A Survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 7–32, 2017.
- [31] “LTE-U Forum: Alcatel-Lucent, Ericsson, Qualcomm Technologies Inc., Samsung Electronics & Verizon,” in *Technical Report Coexistence, Study for LTE-U SDL*

- VI.0, 2015.
- [32] A. Sadek, "Carrier sense adaptive transmission (CSAT) in unlicensed spectrum," 2014.
 - [33] M. Labib, V. Marojevic, J. H. Reed, and A. I. Zaghloul, "Extending LTE into the Unlicensed Spectrum: Technical Analysis of the Proposed Variants."
 - [34] Y. Pang, A. Babaei, J. Andreoli-Fang, and B. Hamzeh, "Wi-Fi coexistence with duty cycled LTE-U," *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2017, 2017.
 - [35] B. Bojovic, L. Giupponi, Z. Ali, and M. Miozzo, "Evaluating Unlicensed LTE Technologies: LAA vs LTE-U," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 89714–89751, 2019.
 - [36] H. J. Kwon *et al.*, "Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum in LTE Release 13," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 2, pp. 201–207, Feb. 2017.
 - [37] S. Han, Y. C. Liang, Q. Chen, and B. H. Soong, "Licensed-Assisted Access for LTE in Unlicensed Spectrum: A MAC Protocol Design," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 10, pp. 2550–2561, 2016.
 - [38] 3GPP, "TS 36 300 - V10.11.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (3GPP TS 36.300 version 10.11.0 Release 10)," vol. 10.11.0, pp. 1–210, 2013.
 - [39] A. Abdelfattah, "Fair coexistence between LTE and Wi-Fi in unlicensed spectrum," Sorbonne Université, 2018.
 - [40] H. Lee, H. Kim, H. J. Yang, J. T. Kim, and S. Baek, "Performance Analysis of License Assisted Access LTE with Asymmetric Hidden Terminals," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 17, no. 9, pp. 2141–2154, 2018.
 - [41] M. I. C. Rochman, V. Sathya, and M. Ghosh, "Impact of changing energy detection thresholds on fair coexistence of Wi-Fi and LTE in the unlicensed spectrum," *Wirel. Telecommun. Symp.*, vol. 60637, 2017.
 - [42] Z. Ali, L. Giupponi, J. Mangues-Bafalluy, and B. Bojovic, "Machine learning based scheme for contention window size adaptation in LTE-LAA," *IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mob. Radio Commun. PIMRC*, vol. 2017-Octob, pp. 1–7, 2018.
 - [43] P. Sotenga, P. Chuku, and T. Olwal, "Analysis of IEEE 802.11n network Access Categories in EDCA non-saturated networks," pp. 1–6, 2016.
 - [44] A. M. Cavalcante *et al.*, "Performance Evaluation of LTE and Wi-Fi Coexistence in Unlicensed Bands," in *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2013, pp. 1–6.
 - [45] M. Paolini and S. Fili, "LTE unlicensed and Wi-Fi: Moving beyond coexistence," 2015.
 - [46] R. Ratasuk, N. Mangalvedhe, and A. Ghosh, "LTE in unlicensed spectrum using licensed-assisted access," *2014 IEEE Globecom Work. GC Wkshps 2014*, pp. 746–751, 2014.
 - [47] Y. Gao, X. Chu, and J. Zhang, "Performance analysis of LAA and WiFi coexistence in unlicensed spectrum based on Markov chain," *2016 IEEE Glob. Commun. Conf. GLOBECOM 2016 - Proc.*, 2016.
 - [48] C. Chen, R. Ratasuk, and A. Ghosh, "Downlink performance analysis of LTE and WiFi coexistence in unlicensed bands with a simple listen-before-talk scheme," *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2015, pp. 0–4, 2015.
 - [49] A. M. Voicu, L. Simić, and M. Petrova, "Inter-Technology Coexistence in a Spectrum Commons: A Case Study of Wi-Fi and LTE in the 5-GHz Unlicensed Band," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 11, pp. 3062–3077, 2016.
 - [50] J. Zheng, J. Xiao, Q. Ren, and Y. Zhang, "Performance Modeling of an LTE LAA and WiFi Coexistence System Using the LAA Category-4 LBT Procedure and

- 802.11e EDCA Mechanism,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 6, pp. 6603–6618, 2020.
- [51] M. O. Al Kalaa and S. J. Seidman, “Wireless Coexistence Testing in the 5 GHz Band with LTE-LAA Signals,” *2019 IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat. Signal Power Integrity, EMC+SIPI 2019*, pp. 437–442, 2019.
- [52] M. Hirzallah, M. Krunz, and Y. Xiao, “Harmonious Cross-Technology Coexistence With Heterogeneous Traffic in Unlicensed Bands: Analysis and Approximations,” *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 3, pp. 690–701, 2019.
- [53] R. Saleem, G. S. Member, and S. A. Alvi, “Performance-Fairness Trade-off for Wi-Fi and LTE-LAA Coexistence,” *IEEE Access*, vol. 9, 2021.
- [54] 3GPP RAN1, “Meeting Standardization NR-Unlicensed, document 802.11-20/0195r0, 3GPP, Jan. 2020.,” 2020.
- [55] I. Latif, “Efficient and Fair Medium Sharing Enabled by a Common Preamble.”
- [56] V. Sathya, M. I. Rochman, and M. Ghosh, “Measurement-Based Coexistence Studies of LAA Wi-Fi Deployments in Chicago,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 28, no. 1, pp. 136–143, 2021.
- [57] E. Chai, K. Sundaresan, M. A. Khojastepour, and S. Rangarajan, “LTE in unlicensed spectrum: Are we there yet?,” *Proc. Annu. Int. Conf. Mob. Comput. Networking, MOBICOM*, vol. 0, no. 1, pp. 135–148, 2016.
- [58] P. Campos, A. Hernandez-Solana, and A. Valdovinos-Bardaji, “Detection and Impact of the Hidden Node Problem in LAA-WiFi Coexistence Scenarios,” in *2018 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2018, pp. 1391–1397.
- [59] P. Campos, A. Hernandez-Solana, and A. Valdovinos-Bardaji, “Dealing with the Hidden Node Problem in Multioperator LAA-LTE Scenarios,” in *2018 IFIP/IEEE International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wired and Wireless Networks (PEMWN)*, 2018, pp. 1–7.
- [60] L. Li, J. P. Seymour, L. J. Cimini, and C. C. Shen, “Coexistence of Wi-Fi and LAA networks with adaptive energy detection,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 11, pp. 10384–10393, 2017.
- [61] H. Lee and H. J. Yang, “Downlink Interference Control of LAA-LTE for Coexistence with Asymmetric Hidden Wi-Fi APs,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 11, pp. 10909–10925, 2019.
- [62] H. Lee and H. J. Yang, “Downlink MU-MIMO LTE-LAA for Coexistence with Asymmetric Hidden Wi-Fi APs,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 1233, no. c, pp. 1–1, 2020.
- [63] V. Sathya, M. I. Rochman, and M. Ghosh, “Hidden-nodes in coexisting LAA Wi-Fi: A measurement study of real deployments,” *2021 IEEE Int. Conf. Commun. Work. ICC Work. 2021 - Proc.*, pp. 1–7, 2021.
- [64] 3GPP R1-145128, “Avoiding hidden node problem by full-duplex radio from UE perspective,” *Inst. Inf. Ind. RAN1#79*, p. 3, 2014.
- [65] H. Liang, T. Chiang, W. Kuo, C. Huang, and C. Huang, “Hidden Node Avoidance in LTE Licensed Assisted Access (LAA) Networks Using Full Duplex Radio (FDR) Technology,” *Int’l Conf. Wirel. Networks ICWN’18*, pp. 42–47, 2018.
- [66] A. M. Baswade, T. A. Atif, B. R. Tamma, and A. A. Franklin, “LTE-U and Wi-Fi hidden terminal problem: How serious is it for deployment consideration?,” *2018 10th Int. Conf. Commun. Syst. Networks, COMSNETS 2018*, vol. 2018-Janua, pp. 33–40, 2018.
- [67] A. M. Baswade, T. A. Atif, B. R. Tamma, and A. Franklin, “LAW: A Novel Mechanism for Addressing Hidden Terminal Problem in LTE-U and Wi-Fi

- Networks,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 6, pp. 1280–1283, 2018.
- [68] T. A. Atif *et al.*, “A Complete Solution to LTE-U and Wi-Fi Hidden Terminal Problem,” *arXiv*, vol. 21, no. 4, pp. 2141–2154, 2019.
- [69] M. Abusubaih, B. Rathke, and A. Wolisz, “A framework for interference mitigation in multi-BSS 802.11 wireless LANs,” in *2009 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks & Workshops*, 2009, pp. 1–11.
- [70] S. Ray and D. Starobinski, “On false blocking in RTS/CTS-based multihop wireless networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 56, no. 2, pp. 849–862, 2007.
- [71] 3GPP TSG-RAN1 R1-151047, “Discussion on hidden node issue for LAA,” *Ad-hoc Meet. Samsung, March*, 2015.
- [72] 3GPP R2-154303, “RSSI measurement for hidden node detection,” *TSG RAN WG2 #91bis*, p. 5, 2015.
- [73] 3GPP TSG-RAN WG1 R1-150420, “Solutions to DL LAA Hidden Node and Channel Reuse,” *TSG-RAN1 WG1 Meet. #80, Inst. Inf. Ind. (III), Athens, Greece, 9th – 13th Febr.*, p. 6, 2015.
- [74] 3GPP R1-151123, “Discussion on hidden node problem for LAA,” *Huawei, HiSilicon, RAN1 Ad-hoc Meet. March*, 2015.
- [75] A. M. Baswade, V. Sathya, B. R. Tamma, and A. A. Franklin, “Unlicensed Carrier Selection and User offloading in dense LTE-U networks,” *2016 IEEE Globecom Work.*, pp. 1–6, 2016.
- [76] T. Zhang, J. Zhao, and Y. Chen, “Hidden node aware resource allocation in licensed-assisted access systems,” *2017 IEEE Glob. Commun. Conf. GLOBECOM 2017 - Proc.*, vol. 2018-Janua, pp. 1–6, 2017.
- [77] C. Y. Huang *et al.*, “Listen before Receive (LBR) Assisted Network Access in LAA and WiFi Heterogeneous Networks,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 43845–43861, 2021.
- [78] R. K. Sheshadri, K. Sundaresan, E. Chai, S. Rangarajan, and D. Koutsonikolas, “ELI: Empowering LTE with Interference Awareness in Unlicensed Spectrum,” *Proc. - Int. Conf. Netw. Protoc. ICNP*, vol. 2018-Sept, no. i, pp. 280–290, 2018.
- [79] H. Liang *et al.*, “Sense-Bandits: AI-based Adaptation of Sensing Thresholds for Heterogeneous-technology Coexistence over Unlicensed Bands,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 19, no. 9, pp. 4141–4153, 2020.
- [80] L. Laiy, D. Fengy, and F. C. Zhengz, “Interference Detection and Resource Allocation in LTE Unlicensed Systems,” *IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. WCNC*, vol. 2020-May, 2020.
- [81] L. Lai, D. Feng, F.-C. Zheng, X. Wang, H. H. Yang, and T. Q. S. Quek, “CQI-Based Interference Detection and Resource Allocation With QoS Provision in LTE-U Systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 2, pp. 1421–1433, Feb. 2021.
- [82] C. Zhang, P. Patras, and H. Haddadi, “Deep Learning in Mobile and Wireless Networking: A Survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2224–2287, 2019.
- [83] M. Wang, Y. Cui, X. Wang, S. Xiao, and J. Jiang, “Machine learning for networking: Workflow, advances and opportunities,” *arXiv*, pp. 1–8, 2017.
- [84] P. V. Klaine, M. A. Imran, O. Onireti, and R. D. Souza, “A Survey of Machine Learning Techniques Applied to Self-Organizing Cellular Networks,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2392–2431, 2017.
- [85] S. Ayoubi *et al.*, “Machine Learning for Cognitive Network Management,” *IEEE Commun. Mag.*, no. January, pp. 158–165, 2018.
- [86] M. G. Kibria, K. Nguyen, G. P. Villardi, O. Zhao, K. Ishizu, and F. Kojima, “Big Data Analytics, Machine Learning, and Artificial Intelligence in Next-Generation Wireless Networks,” *IEEE Access*, vol. 6, no. c, pp. 32328–32338, 2018.

- [87] R. Ullah *et al.*, “A machine learning approach for 5G SINR prediction,” *Electron.*, vol. 9, no. 10, pp. 1–19, 2020.
- [88] M. Chen, U. Challita, W. Saad, C. Yin, and M. Debbah, “Artificial Neural Networks-Based Machine Learning for Wireless Networks: A Tutorial,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3039–3071, 2019.
- [89] V. Sathya, A. Dziedzic, M. Ghosh, and S. Krishnan, “Machine learning based detection of multiple Wi-Fi BSSs for LTE-U CSAT,” *arXiv*, pp. 596–601, 2019.
- [90] A. Dziedzic, V. Sathya, M. I. Rochman, M. Ghosh, and S. Krishnan, “Machine learning enabled spectrum sharing in dense LTE-U/Wi-Fi coexistence scenarios,” *arXiv*, vol. PP, p. 1, 2020.
- [91] J. Tan, L. Zhang, Y. C. Liang, and D. Niyato, “Intelligent Sharing for LTE and WiFi Systems in Unlicensed Bands: A Deep Reinforcement Learning Approach,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 5, pp. 2793–2808, 2020.
- [92] K. Wada and T. Ohtsuki, “Interference Control of LTE-LAA using Q-learning with HARQ,” *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2020-May, pp. 9–13, 2020.
- [93] M. Schmidt, D. Block, and U. Meier, “Wireless Interference Identification with Convolutional Neural Networks,” *IEEE 15th Int. Conf. Ind. Informatics*, 2017.
- [94] V. Maglogiannis, A. Shahid, D. Naudts, E. De Poorter, and I. Moerman, “Enhancing the coexistence of LTE and Wi-Fi in unlicensed spectrum through convolutional neural networks,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 28464–28477, 2019.
- [95] ITU-R, “Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced,” *Int. Telecommun. Union, Tech. Rep. ITU-R, M.2135-1*, p. 72, 2009.
- [96] ETSI, “TS 36.104 V12.6.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 36.104 version 12.6.0 Release 12),” 2015.
- [97] C. Wengertter, J. Ohlhorst, and A. Elbwart, “Fairness and throughput analysis for generalized proportional fair frequency scheduling in OFDMA,” *2005 IEEE 61st Veh. Technol. Conf.*, vol. 3, no. 2, pp. 0–4, 2005.
- [98] “The Vienna LTE Simulators.” [Online]. Available: <http://www.nt.tuwien.ac.at/about-us/staff/josep-colomikuno/%0Alte-simulators/>.
- [99] C. Mehlführer, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska, and M. Rupp, “Simulating the long term evolution physical layer,” *Eur. Signal Process. Conf.*, no. Eusipco, pp. 1471–1478, 2009.
- [100] 3GPP TR 36.814 V9.0.0, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9),” 2010.
- [101] ETSI, “TS 136 214 V10.1.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements (3GPP TS 36.214 version 10.1.0 Release 10),” *ETSI TS 136 214 V10.1.0 Tech. Specif.*, p. 15, 2011.
- [102] ETSI, “TS 136 331 - V14.2.2 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (3GPP TS 36.331 version 14.2.2 Release 14),” 2017.
- [103] M. Mezzavilla, M. Miozzo, M. Rossiy, N. Baldo, and M. Zorzi, “A lightweight and accurate link abstraction model for the simulation of LTE networks in ns-3,” *MSWiM’12 - Proc. 15th ACM Int. Conf. Model. Anal. Simul. Wirel. Mob. Syst.*, pp. 55–60, 2012.
- [104] Project NS-3, *ns-3 Model Library*. 2020.
- [105] G. Basilashvili, “Study of Spectral Efficiency for LTE Network,” *Am. Sci. Res. J. Eng. Technol. Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 21–32, 2017.
- [106] 3 GPP R1-152992, “‘CSI Measurement and Report for LAA’, TSG RAN WG1 Meeting #81, Fukuoka, Japan, 25th – 29th May.” p. 4, 2015.

- [107] 3 GPP R1-152868, “Discussion on CSI measurement and reporting for LAA’, TSG RAN WG1 Meeting #81 Fukuoka, Japan, 25th – 29th May.” 2015.
- [108] C. Ide *et al.*, “Empirical Analysis of the Impact of LTE Downlink Channel Indicators on the Uplink Connectivity,” *2016 IEEE 83rd Veh. Technol. Conf. (VTC Spring)*, 2016.
- [109] P. Campos, Á. Hernández-Solana, and A. Valdovinos-Bardají, “Analysis of hidden node problem in LTE networks deployed in unlicensed spectrum,” *Comput. Networks*, vol. 177, no. January, p. 107280, Aug. 2020.
- [110] P. Campos, Á. Hernández-Solana, and A. Valdovinos-Bardají, “Machine Learning for Hidden Nodes Detection in Unlicensed LTE Networks,” *Comput. Networks*, vol. 208, no. August 2021, p. 108862, May 2022.
- [111] ETSI, “TS 136 133 - V14.3.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management (3GPP TS 36.133 version 14.3.0 Release 14),” 2017.
- [112] TSGR, “TS 136 314 - V15.1.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Layer 2 - Measurements (3GPP TS 36.314 version 15.1.0 Release 15),” 2018.
- [113] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, *Elements of Statistical Learning 2nd ed.* 2009.
- [114] C. M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2006.
- [115] NS-3 Network simulator, “<https://www.nsnam.org/>(accessed April 13 2021).” .
- [116] A. Fernández, S. García, M. Galar, R. C. Prati, B. Krawczyk, and F. Herrera, *Learning from Imbalanced Data Sets*. 2018.
- [117] H. He and Y. Ma, *Imbalanced learning: Foundations, algorithms, and applications*. 2013.
- [118] G. Rebalá, A. Ravi, and S. Churiwala, “Machine Learning Definition and Basics,” in *An Introduction to Machine Learning*, Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 1–17.
- [119] F. et al. Pedregosa, “Scikit-learn: Machine Learning in Python,” *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 12, no. 85, pp. 2825–2830, 2011.
- [120] F. Chollet and others, “Keras.” GitHub, 2015.
- [121] D. G. Kleinbaum and M. Klein, *Logistic Regression, a Self-Learning Text*, 3rd ed. Springer International Publishing, 2010.
- [122] J. Han, M. Kamber, and J. Pei, *Data Mining. Concepts and Techniques*, 3rd Ed. 2012.
- [123] I. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville, *Deep Learning*. MIT Press, 2016.
- [124] D. P. Kingma and J. L. Ba, “Adam: A method for stochastic optimization,” *3rd Int. Conf. Learn. Represent. ICLR 2015 - Conf. Track Proc.*, pp. 1–15, 2015.
- [125] D. H. Jr, S. Lemeshow, and R. Sturdivant, *Applied logistic regression*, 3rd Editio. Wiley Series, 2013.