

ANÁLISIS DE LA INTERFERENCIA CO-CANAL EN REDES HETEROGÉNEAS PARA EL ENLACE DE SUBIDA



**JOAN SEBASTIAN OROZCO YANZA
JUAN DAVID BRAVO FLÓREZ**

Universidad del Cauca

Facultad De Ingeniería Electrónica Y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

Grupo de Radio e Inalámbricas - GRIAL

Línea de Investigación: Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Radio

Popayán, 2014.

ANÁLISIS DE LA INTERFERENCIA CO-CANAL EN REDES HETEROGÉNEAS PARA EL ENLACE DE SUBIDA



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

**JOAN SEBASTIAN OROZCO YANZA
JUAN DAVID BRAVO FLÓREZ**

Director: Víctor Fabián Miramá Pérez

Universidad del Cauca

Facultad De Ingeniería Electrónica Y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

Grupo de Radio e Inalámbricas - GRIAL

Línea de Investigación: Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Radio

Popayán, 2014



TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1 CONCEPTOS GENERALES.....	3
1.1 Sistema de Comunicación Inalámbrica	3
1.2 Pequeñas Celdas.....	3
1.2.1 Metroceldas y Microceldas	4
1.2.2 Picoceldas	4
1.2.3 Femtoceldas	4
1.3 Redes Homogéneas.....	9
1.4 Redes Heterogéneas	9
1.4.1 Espectro	11
1.4.2 Calidad de Servicio (QoS)	12
1.4.3 Capacidad	12
1.4.4 Cobertura.....	13
1.5 Interferencia Co-Canal (CCI).....	14
1.6 Transmisión y Recepción Multipunto Coordinada.	15
1.7 Reuso de Frecuencia Fraccional.....	16
1.8 Expansión de Rango.....	16
1.9 Redes Auto Organizadas	17
1.10 Radio Cognitivo.....	18
1.11 Mecanismos de Coordinación de Interferencia	19
1.11.1 Modelo de Control Ideal de Potencia.....	19
1.11.2 Modelo de Cambio de Frecuencia	22
1.11.3 Modelo de Control Híbrido	24
2 DISEÑO, IMPLEMENTACION Y PLAN DE PRUEBAS DEL SIMULADOR. ...	25
2.1 Metodología para el desarrollo.....	25
2.2 Análisis de requerimientos	26
2.2.1 Requerimientos.....	26
2.3 Diseño.....	27



2.3.1	Diseño del modelo del sistema	27
2.3.2	Diseño del simulador	28
2.3.3	Aspectos a tener en cuenta en el Simulador	33
2.3.4	Modelo de Propagación.....	35
2.3.5	Desvanecimiento	35
2.3.6	Interferencia Co-canal en el Sistema.....	36
2.3.7	Relación Señal a Interferencia más Ruido.....	36
2.3.8	Estado de degradación.....	37
2.4	Implementación.....	38
2.4.1	Selección de la Herramienta de Simulación	38
2.4.2	Parámetros del sistema	38
2.5	Pruebas.....	40
3	PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	43
3.1	Escenario 1	44
3.2	Escenario 2	52
3.3	Escenario 3	60
3.4	Resumen.....	66
4	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	69
4.1	Conclusiones.....	69
4.2	Trabajos Futuros.....	70



INDICE DE FIGURAS.

	Pág.
Figura 1.1 Tipos de celdas según cobertura. Por los autores	4
Figura 1.2 Esquema de una femtocelda doméstica.	7
Figura 1.3 Tipos de Acceso a una Femtocelda.	8
Figura 1.4 Predicciones de puntos de acceso globales de Small Cells 2011-2016, por tipo de celdas.	8
Figura 1.5 Niveles de Red en HetNet. Por los autores.....	10
Figura 1.6 Arquitectura de una Red Heterogéneas	11
Figura 1.7 Cobertura de red con y sin la implementación de pequeñas celdas. ...	13
Figura 1.8 Cobertura en sistemas Celulares	14
Figura 1.9 Interferencia Co-Canal	14
Figura 1.10 Concepto Coordinación Multipunto.	15
Figura 1.11 Sectorización para el modelo de cambio de frecuencia	23
Figura 2.1 Fases del Modelo Lineal Secuencial	25
Figura 2.2 Escenario de Análisis	27
Figura 2.3 Escenario de Análisis	28
Figura 2.4 Diagrama de Flujo General del Sistema.....	29
Figura 2.5 Diagrama de Flujo de Control Ideal de Potencia.....	30
Figura 2.6 Diagrama de Flujo de Cambio de Frecuencia	31
Figura 2.7 Diagrama de Flujo de Control Hibrido	32
Figura 3.1 Escenario con 100 Femto Usuarios (FU)	44
Figura 3.2 Interferencia Co-Canal (CCI) para 100 Femto Usuarios	45
Figura 3.3 Función de Distribución Acumulativa (CDF) de la CCI para 100 FU	47
Figura 3.4 Relación Señal a Interferencia Más Ruido (SINR) para 100 FU	49
Figura 3.5 Función de Distribución Acumulativa (CDF) de la SINR para 100 FU..	50
Figura 3.6 Escenario con 300 Femto Usuarios	52
Figura 3.7 Interferencia Co-Canal (CCI) para 300 Femto Usuarios	53
Figura 3.8 Función de Distribución Acumulativa (CDF) de la CCI para 300 FU	55
Figura 3.9 Relación Señal a Interferencia Más Ruido (SINR) para 300 FU	57
Figura 3.10 Función de Distribución Acumulativa (CDF) de la SINR para 300 FU	58
Figura 3.11 Escenario con 500 Femto Usuarios	60
Figura 3.12 Interferencia Co-Canal (CCI) para 500 Femto Usuarios	61
Figura 3.13 Función de Distribución Acumulativa (CDF) de la CCI para 500 FU..	62
Figura 3.14 Relación Señal a Interferencia Más Ruido (SINR) para 500 FU	64
Figura 3.15 Función de Distribución Acumulativa (CDF) de la SINR de 500 FU... 65	



INDICE DE TABLAS.

	Pág.
Tabla 2.1 Parámetros del Equipo de usuario	39
Tabla 2.2 Parámetros femto estación base y macro estación base	39
Tabla 2.3 Parámetros del Sistema	39
Tabla 2.4 Plan de Pruebas	41
Tabla 3.1 Promedio de CCI y Moda para 100 Femto Usuarios (FU)	46
Tabla 3.2 Función de Distribución Acumulativa (CDF) para CCI con 100 FU	48
Tabla 3.3 Promedio de SINR y Moda para 100 Femto Usuarios	49
Tabla 3.4 Función de Distribución Acumulativa (CDF) para SINR con 100 FU	51
Tabla 3.5 Promedio de CCI y Moda para 300 Femto Usuarios.....	54
Tabla 3.6 Función de Distribución Acumulativa (CDF) para CCI con 300 FU	56
Tabla 3.7 Promedio de SINR y Moda para 300 Femto Usuarios	57
Tabla 3.8 Función de Distribución Acumulativa (CDF) para SINR con 300 FU	59
Tabla 3.9 Promedio de CCI y Moda para 500 Femto Usuarios	62
Tabla 3.10 Función de Distribución Acumulativa (CDF) para CCI con 300 FU	63
Tabla 3.11 Promedio de SINR y Moda para 500 Femto Usuarios.....	64
Tabla 3.12 Función de Distribución Acumulativa (CDF) para SINR con 500 FU... 65	65
Tabla 3.13 Resumen de Resultados para la Interferencia Co-Canal (CCI).....	66
Tabla 3.14 Resumen de Resultados de la SINR	67



LISTA DE ACRÓNIMOS

3GPP	3 rd Generation Partnership Project 3, Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación.
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i> , Línea de Suscriptor Digital Asimétrica.
CCI	Co-Channel Interference, Interferencia Co-Canal.
CCU	<i>Cell Center User</i> , Usuario del Centro de la Celda.
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i> , Función de Distribución Acumulativa.
CEU	<i>Cell Edge User</i> , Usuario del Borde de la Celda.
CoMP	<i>Coordinated Multiple Point Transmission and Reception</i> , Transmisión y Recepción Multipunto Coordinada.
CR	<i>Cognitive Radio</i> , Radio Cognitivo.
CSG	<i>Closed Subscriber Group</i> , Grupo Cerrado de Suscriptores.
DL	<i>Down Link</i> , Enlace de Bajada.
FBS	<i>Femto Base Station</i> , Femto Estación Base.
FFR	<i>Fractional Frequency Reuse</i> , Reuso Fraccional de Frecuencia.
FU	<i>Femto User</i> , Femto Usuario.
FRF	<i>Frequency Reuse Factor</i> , Factor de Reuso de Frecuencia.
HETNET	<i>Heterogeneous Networks</i> , Redes Heterogéneas.
IPC	<i>Ideal Power Control</i> , Control Ideal de Potencia.
MU	<i>Macro User</i> , Macro Usuario.



MUE	<i>Macro User Equipment</i> , Equipo de Usuario Macro.
OS	<i>Outage State</i> , Estado de Degradación.
PUE	<i>Pico User Equipment</i> , Equipo de Usuario Pico.
QoS	<i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio.
QoE	<i>Quality of Experience</i> , Calidad de Experiencia.
RE	<i>Range Expansion</i> , Expansión de Rango.
RSRP	<i>Reference Signal Received Power</i> , Referencia de la señal de Potencia Recibida.
SC	<i>Small Cells</i> , Pequeñas Celdas.
SINR	<i>Signal to Interference Noise Ratio</i> , Relación señal a Interferencia más Ruido.
SON	Redes Auto Organizadas, <i>Self Organizing Network</i> .
UE	<i>User Equipment</i> , Equipo de Usuario.
UL	<i>Up Link</i> , Enlace de Subida.
WI-FI	<i>Wireless Fidelity</i> , Fidelidad Inalambrica.



INTRODUCCION.

La constante evolución presentada durante los últimos años por los sistemas de comunicación inalámbricos, el creciente número de dispositivos intentando acceder a las redes móviles y el mayor consumo de datos por dispositivo, han llevado a la generación de una nueva arquitectura de red que recibe el nombre de Redes Heterogéneas (HetNet, *Heterogeneous Networks*), la cual permite la integración e interacción de pequeñas estaciones base en la arquitectura de red ya existente. La pequeña estación base recibe el nombre de Femto Estación Base (FBS, *Femto Base Station*), la cual genera una femtocelda de baja potencia con un área de cobertura limitada, de bajo costo para el usuario y de muy fácil conexión con un proveedor de servicios de banda ancha. Estas aportan una gran cantidad de aplicaciones con muy buena Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*), debido al incremento en la capacidad, cobertura y calidad que proporciona el uso de las Redes Heterogéneas (HetNet) en el sistema.

Las Redes Heterogéneas (HetNet) deben enfrentarse a muchos problemas, uno de estos es la Interferencia Co-Canal (CCI, *Co-Channel Interference*), la cual es producida por equipos de usuario (UE, *User Equipment*) que se encuentran en celdas adyacentes usando la misma frecuencia, afectando así al desempeño de los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos. Por este motivo se hace necesario la utilización de mecanismos de coordinación que ayuden a controlar y gestionar la Interferencia Co-Canal (CCI).

En el presente trabajo de grado se realizó la implementación de un simulador software estático a nivel de sistema, por medio del cual se analizó la Interferencia Co-Canal en una Red Heterogénea (HetNet), haciendo énfasis especialmente en el enlace de subida (UL, *UpLink*), donde se tiene en cuenta la interacción de varias Femto Estaciones Base (FBS) y una Macro Estación Base (MBS, *Macro Base Station*) en un entorno semiurbano, en este trabajo de grado se evaluaron diferentes mecanismos de coordinación que buscan mitigar los niveles de Interferencia Co-Canal (CCI) en la Macro Estación Base (MBS).

Para abordar el desarrollo del proyecto y los temas requeridos, el documento se encuentra estructurado de la siguiente forma:

En el primer capítulo se exponen los conceptos generales del trabajo de grado, como lo son las pequeñas celdas, redes heterogéneas y diferentes técnicas que buscan la coordinación de la interferencia, destacando sus principales



características; en el segundo capítulo se muestra la metodología empleada para implementación del simulador, describiendo el diseño y los diferentes escenarios que se utilizarán en el desarrollo del trabajo; en el tercer capítulo se presentan y evalúan los resultados obtenidos en el simulador y por último en el cuarto capítulo se presentan las conclusiones del trabajo de grado y trabajos futuros a desarrollar en esta área de investigación.



1 CONCEPTOS GENERALES

1.1 Sistema de Comunicación Inalámbrica

Un sistema de comunicación inalámbrica es una infraestructura física denominada red a través de la cual se transporta información desde la fuente hasta el destino, ofreciendo a los usuarios diversos servicios de comunicaciones.

Unas de las características de la red es la Calidad de Servicio (QoS), capacidad y cobertura, ésta última dividida por celdas, las de mayor tamaño llamadas macro celdas son limitadas en cobertura en algunas zonas y no pueden ofrecer a los usuarios de redes móviles niveles óptimos en interiores de hogar u oficinas, por lo que la tendencia actual es la utilización de Pequeñas Celdas (SC, *Small Cells*) para garantizar una solución a dichas limitaciones.

1.2 Pequeñas Celdas

Hasta ahora las comunicaciones en los sistemas móviles han estado basadas en grandes Estaciones Base (BS) dedicadas a ofrecer servicios de voz y datos en una determinada zona. Sin embargo, debido al crecimiento exponencial en el tráfico de datos y el aumento en la demanda de servicios de alta velocidad han hecho que la capacidad y cobertura antes ofrecidas por estas estaciones base no sean suficientes. Una de las soluciones que proponen los operadores de redes móviles para poder mantener este crecimiento y lograr dar mayor cobertura, es utilizar celdas de menor tamaño, por lo cual se han inclinado por la implementación de nuevos e innovadores modelos de despliegue para redes de banda ancha móvil que empleen Pequeñas Celdas (SC), las cuales son puntos de acceso de baja potencia que operan en un espectro licenciado, son gestionados y operados para actuar de manera inteligente, además permitan mejorar la cobertura y capacidad en lugares tales como áreas públicas, residenciales o empresariales [1].

Las Pequeñas Celdas (SC) facilitan la conexión e interacción con redes ya existentes como las macroceldas¹ y son capaces de establecer los recursos de red que les proporciona mejores condiciones de conexión. Las pequeñas celdas (SC) redistribuyen a los usuarios y alivian la carga de tráfico que pasa por las

¹ Macrocelas: es aquella que proporciona la cobertura principal en una red móvil, sus antenas que tienen una longitud aproximada de 30 m, están montadas en mástiles situados en tierra, techos.



Macro Estaciones Base (MBS), para así mejorar el desempeño de la red y la Calidad del Servicio (QoS) experimentada por el usuario.

Dependiendo del radio de cobertura, potencia de transmisión, tipo de antena y finalidad, las pequeñas celdas se pueden clasificar en diferentes tipos como se muestra en la figura 1.1: Metroceldas, Microceldas, Picoceldas y Femtoceldas.

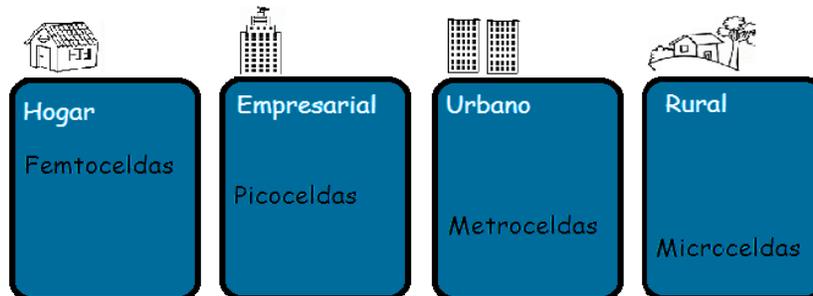


Figura 1.1 Tipos de celdas según cobertura. Por los autores

1.2.1 Metroceldas y Microceldas

Estos tipos de celdas son desplegados en exteriores como en ambientes rurales, suburbanos y metropolitanos, su potencia de transmisión se encuentra en un rango de trabajo de 2 W hasta 20 W, con un valor típico de 5 W (37 dBm), su configuración puede ser manual o automática, además alcanzan un área de cobertura entre 250 m y 1 Km [1] y son diseñadas a menudo para áreas públicas donde pueden soportar aproximadamente desde 64 hasta 128 usuarios [2]-[5].

1.2.2 Picoceldas

Este tipo de celdas son instaladas por los operadores y su configuración puede ser automática o manual según lo requiera el tipo de escenario, pueden ser implementadas en interiores o exteriores, dentro de una gran área pública, centros comerciales, edificios empresariales, entre otros [6]. Dentro de sus parámetros se conoce que trabaja con una potencia de transmisión de 250 mW hasta 2 W (33,1 dBm), su alcance de cobertura está entre los 100 m - 300 m [1] y puede brindar servicio a entre 32 y 64 usuarios [2], [7].

1.2.3 Femtoceldas

Las femtoceldas son pequeñas Estaciones Base (BS) de baja potencia que son desplegadas especialmente en interiores como edificios u hogares, donde la recepción de la señal que proviene de una Macro Estación Base (MBS) es de baja



intensidad, su rango de cobertura se encuentra entre 10 m y 50 m [2] y opera con una potencia de transmisión del orden de los 10 mW a 200 mW (-6,98 dBm) [1].

Las femtoceldas ofrecen ventajas tanto a los operadores móviles como a los usuarios, por un lado al operador le permite mejorar su cobertura en interiores, así como la liberación de parte del tráfico que circula por las Macro Estaciones Base (MBS) disminuyendo el número futuro de implementaciones [8] lo que significa una reducción en los costos de infraestructura [9], al igual que soporta un mayor número de usuarios con dispositivos móviles conectados para utilizar los servicios. Por el lado de los usuarios, consiguen solucionar los problemas de cobertura en los lugares donde la señal es limitada de una manera rápida y efectiva.

Según el escenario donde vayan a ser empleadas las femtoceldas pueden dividirse en dos tipos [10].

- Residencial: este tipo de femtocelda es utilizada comúnmente en hogares, donde llega a soportar de 4 a 8 usuarios conectados.
- Comercial: usado en interiores de edificios u oficinas, que ofrece servicio alrededor de 16 a 32 usuarios [2].

1.2.3.1 Ventajas de las Femtoceldas

En cuanto a las ventajas que ofrecen, está el aumento en la capacidad que resulta inmediato al emplear femtocelda, sin embargo desde el punto de vista global de la red móvil ofrece otros beneficios. El primero de ellos es el aumento en la eficiencia espectral, ya que al utilizar celdas cubriendo superficies muy pequeñas el usuario accede a un ancho de banda mayor [11], además se tienen otros beneficios presentados a continuación.

- Por su baja potencia, el efecto del Equipo de Usuario (UE) móvil sobre la salud, es menor que cuando utiliza los recursos de una macrocelda.
- Aumentan la cobertura y capacidad de las redes y la eficacia del uso del espectro.
- Permite la liberación de los recursos de red.



- Mejora la calidad de servicio (QoS) percibida por el usuario.
- Redirige servicios móviles a través de una red fija de banda ancha.
- Despliegue sencillo y autónomo [12].

Otra de las ventajas que proporciona las femtoceldas es la de hacer uso de las redes de banda ancha ya existentes, puesto que se conectan las Femto Estaciones Base (FBS) a estas redes y el operador realiza su cobro por un sólo servicio como por ejemplo el de conexión a internet.

El principal problema de las femtoceldas es la gestión de interferencias, debido a que se trabaja con diferentes niveles de red², las pequeñas estaciones base encargadas de ofrecer cobertura en cada hogar, deben convivir con las Macro Estaciones Base (MBS) y sus usuarios. Por ejemplo, en el caso que un Macro Usuario (MU, *Macro User*) utilice la misma frecuencia que el Femto Usuario (FU, *Femto User*) surge una interferencia para ambos niveles, reduciendo la calidad de servicio (QoS), capacidad y cobertura ofrecidos.

1.2.3.2 Funcionamiento de una Femtocelda.

El modo de funcionamiento de una femtocelda es muy semejante a uno ya conocido como lo es un router (*Wi-Fi*, *Wireless Fidelity*) tradicional, de manera que implica cuestiones de privacidad, autenticación, acceso restringido, dichas cuestiones se han convertido en una de las principales preocupaciones de los usuarios, ya que se necesita tener un control sobre quienes pueden y quienes no acceder a una determinada red y hacer uso de sus servicios. El Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (3GPP, *3rd Generation Partnership Project*) ha definido una serie de configuraciones en las que se puede definir el tipo de grupo, el tipo de canal utilizado o la configuración de la potencia transmitida.

La figura 1.2 muestra un esquema de una femtocelda doméstica, a fin de enlazar a las femtoceldas con la red central principal, la infraestructura de transporte backhaul³ móvil utiliza la conexión de Línea de Suscriptor Digital (ADSL,

² Niveles de red: término referente al número de tipo de celdas (macro, micro, pico y femto) desplegadas en un determinado escenario, por ejemplo, en una red puede haber 3 niveles: macro, micro y femto, cada uno independiente.

³ Backhaul: enlace de interconexión entre el núcleo de red (*Backbone*) y las sub redes de datos de comunicación móvil celular.

Asymmetric Digital Subscriber Line) del usuario u otro enlace de internet [13], donde se conecta la Femto Estación Base (FBS) a un router de conexión banda ancha con el objeto de ofrecer cobertura a todos los dispositivos celulares que se encuentren alrededor.

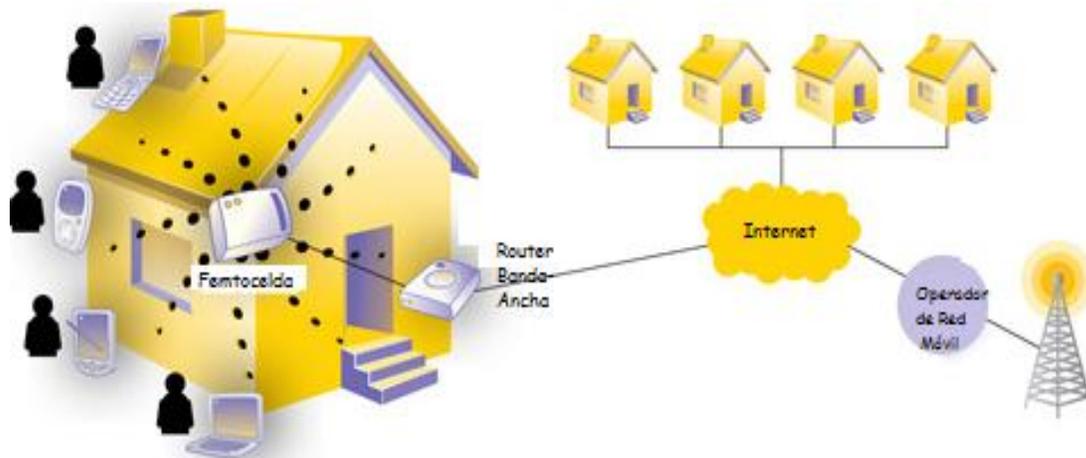


Figura 1.2 Esquema de una femtocelda doméstica. Adaptado de [13]

1.2.3.3 Método de acceso a las femtoceldas

Al momento de usar femtoceldas un aspecto muy importante es conocer quiénes pueden acceder a una determinada red móvil por lo cual el método de acceso es un factor importante que se relaciona con la interferencia que pueda presentar la red [14].

Existen diferentes métodos de acceso a la femtocelda como se muestra en la figura 1.3:

a. Acceso cerrado: conocido como Grupo Cerrado de Suscriptores (CSG, *Closed Subscribers Group*) es un conjunto en el cual sólo usuarios previamente registrados en la femtocelda tienen autorización para acceder a la red, lo que permite mejorar el desempeño de la red, ya que al ser restringido el acceso se presenta menor interferencia por parte de usuarios no registrados.

b. Acceso abierto: en este tipo de acceso todos los usuarios tienen autorización a acceder a la femtocelda siempre y cuando pertenezcan a la red de un operador determinado, lo que aumenta la capacidad de la red, en el caso en el que un usuario conectado a una Macro Estación Base (MBS) se encuentre con un bajo

nivel de señal, éste puede conectarse a cualquier femtocelda de acceso público cercana.

c. Acceso híbrido: en el tipo de acceso híbrido se combinan los dos tipos de accesos abierto y cerrado, con lo cual un número limitado de recursos de la femtocelda están disponibles para todos los usuarios y pueden acceder en cualquier momento, mientras que el resto de recursos son operados como tipo de acceso cerrado para usuarios previamente registrados [14].



Figura 1.3 Tipos de Acceso a una Femtocelda. Adaptado de [14]

En la figura 1.4 se muestra un estudio del número de pequeñas celdas a ser implementado a nivel global proyectado para el año 2016, donde se resalta que cada año aumentan de manera significativa cobrando mayor fuerza debido a los beneficios que traen consigo.

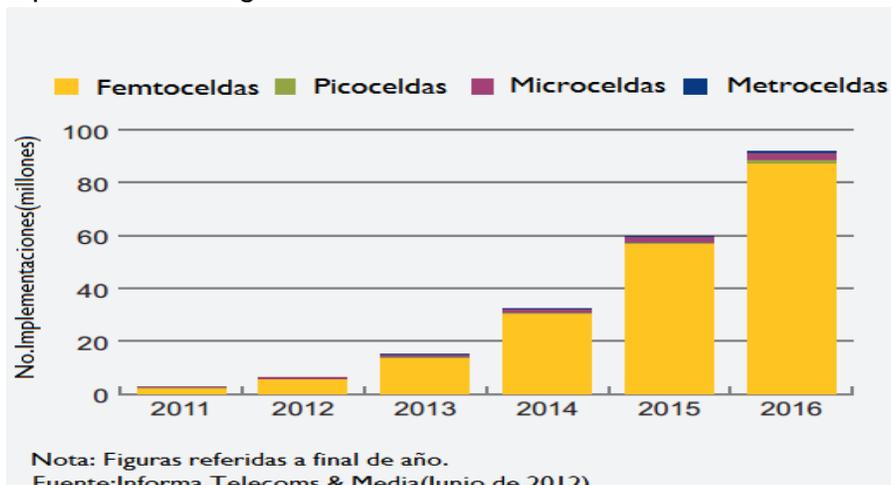


Figura 1.4 Predicciones de puntos de acceso globales de Small Cells 2011-2016, por tipo de celdas. Adaptada de [15]



1.3 Redes Homogéneas

Las redes homogéneas convencionales son aquellas que tienen niveles de potencia de transmisión común⁴ en sus estaciones base, tecnología de acceso y tipos de antenas similares, atienden a un número parecido de Equipos de Usuario (UE) los cuales llevan flujos de datos con requisitos de calidad de servicio (QoS) semejantes.

En una red homogénea, cada Equipo de Usuario (UE) es atendido por la Estación Base (BS) con la intensidad de la señal más fuerte, mientras que las señales no deseadas recibidas de otras Estaciones Base (BS) se consideran como interferencia [8].

Según el enfoque que se pretende dar a una red celular, las redes homogéneas pueden ser definidas y diferenciadas de dos formas:

- Utilizando un criterio de tecnología de acceso; puede definirse una red homogénea como aquella arquitectura que hace uso exclusivo de una única tecnología de radio en el acceso, independientemente de la potencia de transmisión de cada radio base que forman la red de un operador.
- Referente a términos de potencia de transmisión, puede considerarse una red homogénea como aquella red que posee nodos donde la transmisión se realiza con un nivel de potencia común, independiente de la tecnología de acceso

1.4 Redes Heterogéneas

Ante el crecimiento exponencial en la demanda de tráfico de banda ancha móvil, impulsado por el auge en el mercado de los dispositivos móviles tales como teléfonos inteligentes y tabletas, crecen las expectativas y exigencias de los usuarios hacia los operadores ya que se necesita cada vez mayor capacidad, cobertura y Calidad de Servicio (QoS), dichas exigencias son una prioridad para los operadores que buscan sobresalir en el mercado buscando nuevas opciones como lo son la utilización de Redes Heterogéneas (HetNet) que permitan cumplir con los intereses de los usuarios [16].

⁴ Nivel de potencia de transmisión común: hace referencia a la potencia utilizada entre los elementos de un mismo nivel de red.



Una Red Heterogénea (HetNet) comúnmente está formada por múltiples tecnologías de acceso radio, arquitecturas, soluciones de transmisión y estaciones base de diferentes potencias de transmisión. Este concepto mezcla varios tipos de tecnología de acceso radio y hace uso de nodos de baja potencia como pequeñas celdas (microceldas, picoceldas y femtoceldas), que trabajan en conjunto con las macroceldas y así mejorar la cobertura y la capacidad en una red. Las pequeñas celdas y las redes heterogéneas se encuentran entre las innovaciones que permitirán que la nueva arquitectura de red de diferentes niveles como lo indica la figura 1.5, libere parte de la congestión del tráfico que pasa por las macro estaciones base, pero también incluye desafíos dirigidos a controlar la interferencia en el sistema inalámbrico [17].

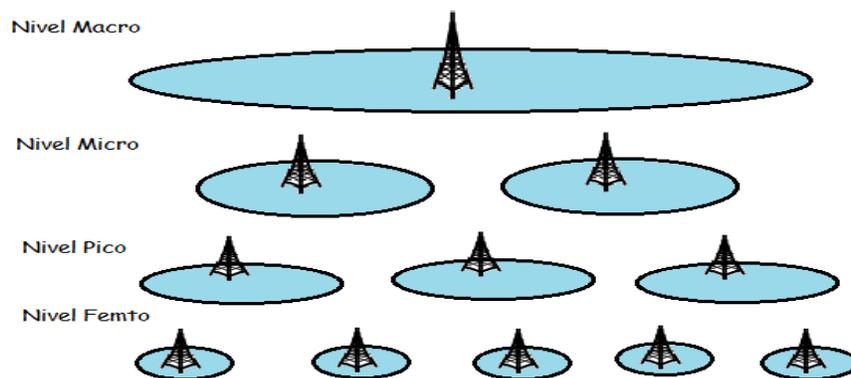


Figura 1.5 Niveles de Red en HetNet. Por los autores

El consumo de datos de banda ancha está aumentando vertiginosamente. Sin embargo, lograr espectro nuevo es difícil y la instalación de macroceldas son complejas por lo que una buena opción es la utilización de Redes Heterogéneas (HetNet) [18].

La figura 1.6 muestra la arquitectura de una Red Heterogénea (HetNet), en la cual acorde a sus necesidades se despliegan los distintos tipos de celdas en ambientes urbanos, suburbanos y rurales, para las macro, micro y pico el operador de la red garantiza el enlace directamente mientras que las femto primero van a unan conexión de internet de banda ancha móvil.

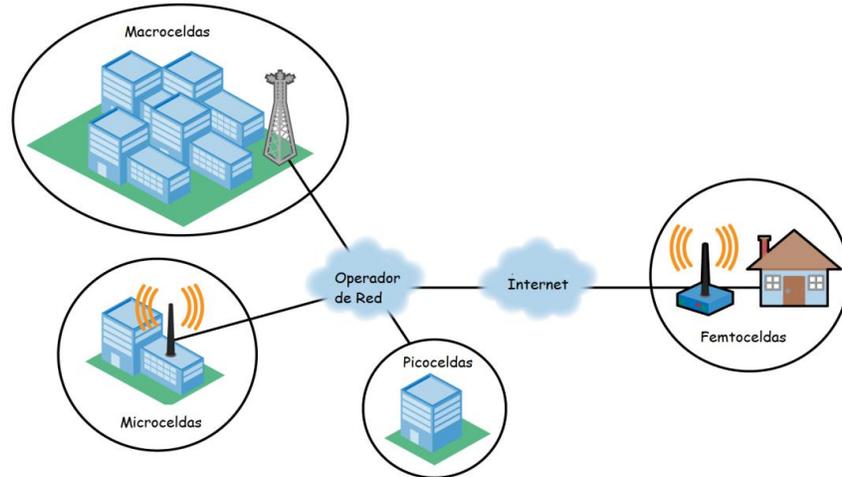


Figura 1.6 Arquitectura de una Red Heterogéneas. Adaptado de [19]

1.4.1 Espectro

Para los operadores, el espectro es un recurso limitado y una de las inversiones más estratégicas e importantes, por lo que se requiere su uso eficiente, especialmente y más aún en áreas densamente pobladas, donde muchos usuarios hacen uso de sus recursos.

En una red heterogénea, la coordinación e integración entre las macro y pequeñas celdas (SC) tiene un impacto positivo en el desempeño de la red y consecuentemente en la experiencia del usuario, ya que una buena utilización del espectro incrementa la capacidad y cobertura [20], [21]. Existen varios tipos de espectro como Dedicado, Compartido y Parcialmente Compartido.

1.4.1.1 Espectro Dedicado

En el tipo de espectro dedicado, al nivel macro de la red se le fija una parte reservada del espectro disponible, asignándole una banda de frecuencia única para ser utilizada en los servicios ofrecidos a los usuarios, para las pequeñas celdas: micro, pico y femto se asignan diferentes bandas de frecuencia, considerando que la interferencia entre pequeñas celdas del mismo nivel, como ejemplo entre las mismas femtoceldas, seguirá existiendo lo que produce menor capacidad, cobertura y Calidad de Servicio (QoS).



1.4.1.2 Espectro Compartido

En el espectro compartido se asignan todos los recursos disponibles a todos los niveles de red, tanto para el nivel macro como los demás de nivel inferior donde se sitúan las pequeñas celdas (micro, pico y femto), este tipo de espectro es muy útil ya que utiliza de manera eficiente el espectro, pero a su vez, se genera gran interferencia de dos tipos, entre celdas de su mismo nivel (interferencia co-nivel) como entre diferentes niveles de red (interferencia cruzada).

1.4.1.3 Espectro Parcialmente Compartido

Se define con anterioridad una pequeña parte del espectro para ser asignado a los usuarios que se encuentran en los niveles de red donde están ubicadas las pequeñas celdas, mientras que al nivel macro se le fija todo el espectro restante disponible, con lo cual para el caso compartido se reduce la interferencia entre celdas del mismo nivel y se mejora la eficiencia espectral en el espectro dedicado.

1.4.2 Calidad de Servicio (QoS)

En el sector de las telecomunicaciones uno de los factores más importantes es la Calidad de Servicio (QoS,) ofrecida por parte de los operadores en diferentes aplicaciones. En las Redes Heterogéneas (HetNet) las Macro Estaciones Base (MBS) muchas veces son incapaces de proporcionar buena señal al interior de un hogar u oficina, por lo que la experiencia del usuario sobre dicho servicio no es la mejor. Con la implementación de Pequeñas Celdas (SC) donde la cobertura de las macroceldas es restringida se consigue aumentar la capacidad y obtener un mejor nivel de señal para los usuarios lo que garantiza una buena Calidad de Servicio (QoS).

1.4.3 Capacidad

El auge en la demanda de dispositivos móviles hace que los operadores procuren mejorar constantemente la capacidad en las redes para atender a un mayor número de usuarios, una de las medidas para lograrlo es utilizar Redes Heterogéneas (HetNet), ya que al implementar Pequeñas Celdas (SC) en algunas zonas donde la señal de las Macro Estaciones Base (MBS) no logra dar cobertura se consigue ampliar la capacidad, que para este trabajo de grado se entiende como el número máximo de usuarios atendidos por el sistema.



1.4.4 Cobertura

Se entiende por cobertura la zona desde la cual un terminal móvil puede comunicarse con las estaciones base y viceversa, existen zonas denominadas puntos muertos donde la señal de ninguna estación base logra llegar, la utilización de Redes Heterogéneas (HetNet) permite que sean implementadas Pequeñas Celdas (SC) las cuales brindan cobertura de manera rápida y eficiente a dispositivos móviles en dichos puntos, una manera fácil y rentable tanto para los usuarios como para los operadores.

En la parte izquierda de la figura 1.7 se tiene una zona en la que sólo funcionan macroceldas y se aprecia que entre ellas existen algunos espacios donde no se ofrece cobertura de red, en la parte derecha se observa que con el uso de las Pequeñas Celdas (SC) se consiguen ocupar los espacios y alcanzar mayor cobertura.

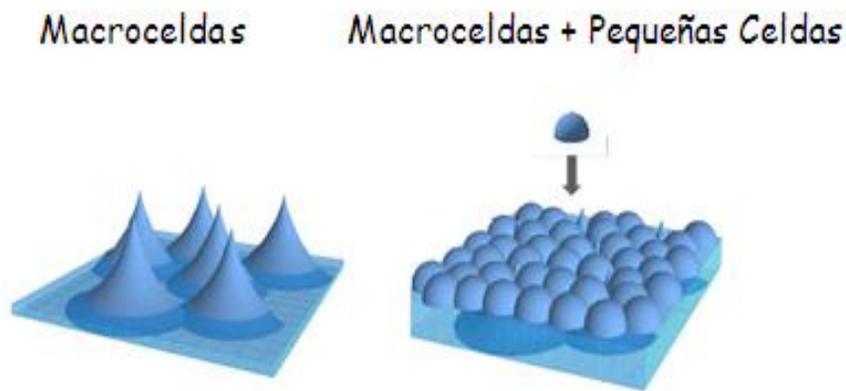


Figura 1.7 Cobertura de red con y sin la implementación de pequeñas celdas.
Adaptada de [22]

En la figura 1.8 se estima el alcance del área de cobertura en sistemas celulares de manera general en entornos urbanos en los que se despliegan los distintos tipos de celdas para diferentes escenarios como hogares, edificios y sector metropolitano.

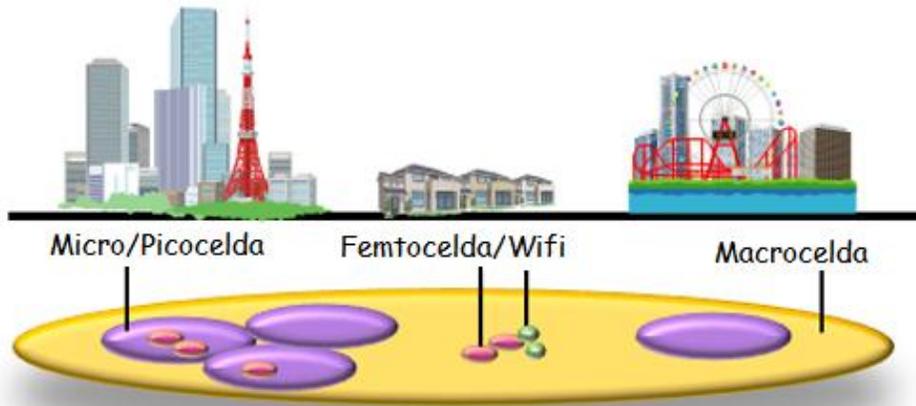


Figura 1.8 Cobertura en sistemas Celulares. Adaptada de [23]

1.5 Interferencia Co-Canal (CCI)

La Interferencia Co-Canal (CCI) se define como la señal que perturba la comunicación entre un Equipo de Usuario (UE) y una Estación Base (BS), la cual es generada por dispositivos que se encuentran operando en la misma frecuencia y están muy cerca de estos. En la figura 1.9, el Equipo de Usuario 1 (UE1) está conectado a la Estación Base 1 (BS1), el Equipo de Usuario 2 (UE2) se encuentra operando con la misma frecuencia en la Estación Base 2 (BS2), la Estación Base 1 (BS1) recibe niveles de interferencia por parte del Equipo de Usuario 2 (UE2) debido a que se presenta Interferencia Co-Canal (CCI), obstruyendo y disminuyendo la calidad de la señal que llega del Equipo de Usuario 1 (UE1) [24].

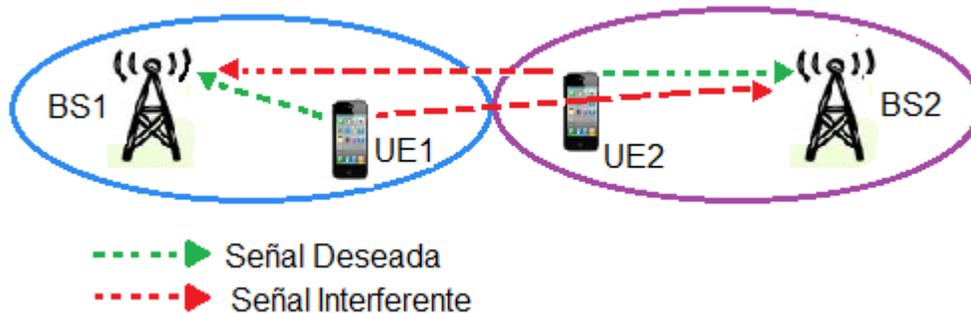


Figura 1.9 Interferencia Co-Canal. Por los autores

En las Redes Heterogéneas (HetNet) la Interferencia Co-Canal (CCI) es el gran problema a enfrentar, ya que la cercanía de las diferentes Estaciones Base (BS) que operan en la misma frecuencia aumenta los niveles de interferencia en las comunicaciones de la red, como consecuencia se presenta una disminución en la



Calidad del Servicio (QoS), por esta razón el centro de estudio de este trabajo de grado es contar con mecanismos de coordinación que mitiguen los efectos que la Interferencia Co-Canal (CCI) produce [25], [26].

1.6 Transmisión y Recepción Multipunto Coordinada.

Cada día los usuarios quieren navegar con mayor velocidad, para lograr esto se necesitan buenas condiciones de canal, estas se alcanzan cuando el Equipo de Usuario (UE) se encuentra cerca de la Estación Base (BS), pero si el dispositivo terminal se aleja las condiciones se ven afectadas, ya que las pérdidas de propagación aumentan y los niveles de Interferencia Co-Canal (CCI) crecen, debido a que el usuario se ve expuesto a las señales interferentes provenientes de Equipos de Usuarios (UE) pertenecientes a celdas vecinas [28].

La Transmisión y Recepción Multipunto Coordinada (CoMP, *Coordinated Multiple Point Transmission and Reception*) es un conjunto de técnicas que permiten coordinar la transmisión y recepción en múltiples estaciones base de manera dinámica, la cual tiene como objetivo mejorar el rendimiento general de un sistema inalámbrico utilizando de manera eficaz los recursos radio que proporciona la red [27].

CoMP trabaja principalmente en los bordes de la celda, ya que es donde la calidad de la señal puede degradarse, en esta zona de la celda se requiere una fina coordinación ya que en este punto el usuario es capaz de ser servido por dos o más estaciones base con el fin de mejorar el desempeño, coordinando las señales de recepción y transmisión. La figura 1.10 muestra el concepto básico de CoMP.

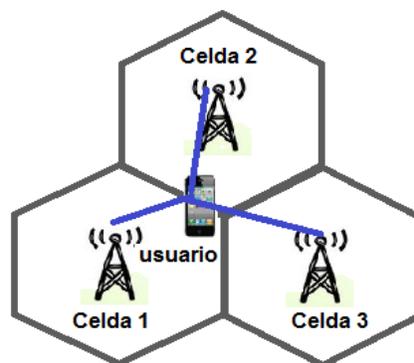


Figura 1.10 Concepto Coordinación Multipunto. Adaptada de [28]



Las técnicas que se utilizan para la coordinación multipunto son diferentes para los enlaces de subida y de bajada. Se explicarán las técnicas del enlace de subida que son las de interés.

- **Recepción y procesamiento conjunto:** esta técnica requiere del uso de varias antenas que se ubican en las Estaciones Base (BS). Las señales que se reciben en las estaciones base se combinan para producir una señal de salida. Este proceso permite que las señales que llegan con baja potencia o con interferencia, se puedan recuperar en el destino con una alta calidad. La principal desventaja es la cantidad de información redundante que se transmite por la red inalámbrica.
- **Programación Coordinada:** como segundo esquema se utiliza mecanismos de coordinación en la estación base, estos se basan en la planificación de la red para minimizar los efectos de la interferencia. Y tener una mejor señal de recepción en el destino.

1.7 Reuso de Frecuencia Fraccional

El Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR, *Fractional Frequency Reuse*) es un mecanismo que se emplea para la coordinación de Interferencia Co-Canal (CCI), esta técnica consiste en dividir la celda por sectores y realizar una asignación de recursos única para cada uno de los sectores de la celda. Las divisiones son llamadas centro y borde. Los Equipos de Usuario (UE) ubicados en el centro de la celda tienen unos niveles de interferencia diferentes a los usuarios que se encuentran en el borde de la misma. Por esta razón se emplea un Factor de Reuso de Frecuencia (FRF, *Frequency Reuse Factor*) diferente para cada sector de la celda [29]. Lo que quiere decir es que los usuarios que se encuentren en el borde operaran con una frecuencia diferente a los usuarios del centro de la celda.

1.8 Expansión de Rango

Cuando un usuario desea conectarse a una red heterogénea debe definir qué Estación Base (BS) presenta las mejores condiciones para establecer una comunicación, debido a que la potencia con la que transmite la Macro Estación Base (MBS) es mucho más alta que con la que realiza la transmisión las Femto Estaciones Base (FBS), Por lo que la conexión del usuario con la Macro Estación Base (MBS) puede generar una mejor Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR, *Signal to Interference Plus Noise Ratio*) y así el usuario solo desearía conectarse a la MBS y dejando a un lado las Femto Estaciones Base (FBS) [30].



En el Enlace de Subida (UL) donde la potencia es generada por el Equipo de Usuario (UE), y ya que las Pequeñas Celdas (SC) posiblemente se encuentren más cerca al usuario que la Macro Estación Base (MBS), estas percibirán una señal con mejor calidad debido a que se cuenta con mejores condiciones de canal. Así que el Equipo de Usuario (UE) terminará conectándose a la pequeña celda. En consecuencia del despliegue de un gran número de micro y femto estaciones base en las Redes Heterogéneas (HetNet), el Equipo de Usuario (UE) tendrá problemas para escoger a qué estación base debe conectarse. Para solucionar este problema, se hace uso de la técnica expansión de rango, la cual permite que el usuario se conecte a una femto o micro estación base, sin tener en cuenta la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) entre estos dos elementos de red, esta técnica se realiza con el objetivo que las estaciones base que estén sobrecargadas de usuarios se descongestionen y estos usuarios pasen a comunicarse con otras estaciones base con menos carga, así mejorar la capacidad total de la red [31].

1.9 Redes Auto Organizadas

El aumento de tráfico en las redes inalámbricas, cambiando rápidamente los servicios de voz por los datos móviles, es decir, las personas con el nuevo mercado de dispositivos inteligentes, prefieren usar los datos como fuente principal de comunicación e información, dejando a un lado la voz como servicio predominante [32]. Surge la necesidad de tener una red inteligente con rapidez y autonomía de realizar procesos de optimización, que brinde soporte a todos estos servicios, manteniendo la calidad de la red y una Experiencia de Usuario (QoE, *Quality of Experience*) satisfactoria. En una Red Heterogénea (HetNet) donde se despliegan múltiples pequeñas celdas que soportan diferentes tecnologías, es de vital importancia la interacción e integración de las Redes Auto Organizadas (SON, *Self Organizing Network*), ya que estas permiten realizar planificación, configuración, gestión, optimización y reparación en las redes móviles e inalámbricas [30].

Con el despliegue de las Redes Auto Organizadas (SON) se espera optimizar la Experiencia del Usuario (QoE), realizando un equilibrio de los recursos radio, entre las celdas que se encuentran con demasiados usuarios y las Estaciones Base (BS) que no posee sobrecarga de dispositivos, debido a que el ancho de banda se distribuye de una manera equitativa entre todos los usuarios que se encuentran en la red. Uno de los grandes beneficios que ofrece SON es la de realizar más rápido, fácil y con una mayor rentabilidad la instalación y puesta en marcha de nuevos



elementos en la red. Adaptándolos a la arquitectura y configurando sus parámetros más importantes, tarea fundamental en una red heterogénea debido a que constantemente se presentan nuevas instalaciones de pequeñas estaciones base [32].

1.10 Radio Cognitivo.

El Radio Cognitivo (CR, *Cognitive Radio*) es una técnica de comunicación inalámbrica, que se presenta como un nuevo enfoque, para mejorar el uso del espectro radioeléctrico, ya que es capaz de cambiar los parámetros fundamentales que se necesitan, para establecer una comunicación entre dos dispositivos. Esta alteración de parámetros es basada en observaciones que se realizan en el entorno donde se encuentra operando el sistema o la red [33].

Una de las ventajas que proporciona el radio cognitivo es el poder utilizar las bandas de frecuencia que no son empleadas en forma continua por los sistemas de radio. En la actualidad sería un gran beneficio debido a que aumentaría la capacidad de tener más aplicaciones ya que se incrementaría la eficiencia espectral. Esto funciona porque el Radio Cognitivo (CR) permite a los elementos de red operar en bandas de frecuencia del espectro que no estén siendo operadas en un momento determinado y liberarlas luego cuando sea requerido [34].

Esta técnica se puede presentar como un mecanismo de coordinación de interferencia en las Redes Heterogéneas (HetNet), dado que ayudaría a varios usuarios a utilizar otra banda de frecuencia, lo que disminuiría los efectos por Interferencia Co-Canal (CCI).

Se puede determinar dos tipos de Radio Cognitivo (CR), dependiendo del espectro que se encuentre disponible:

- Radio Cognitivo de espectro licenciado: cuando se utilizan bandas que se encuentran licenciadas y las bandas de libre uso, como la usada por los radioaficionados.
- Radio Cognitivo de espectro libre: cuando solamente se usan las bandas que no necesitan permiso alguno para operar en ellas.



Los dispositivos deben contar con la capacidad de detectar y capturar información de su entorno, a fin de identificar el espectro que no está siendo utilizado en un momento determinado; también los dispositivos deben variar dinámicamente los parámetros fundamentales, como lo son la frecuencia y la potencia entre otros, mejorando la eficiencia y la capacidad de la red [34].

1.11 Mecanismos de Coordinación de Interferencia

Para cumplir con el objetivo de mitigar la Interferencia Co-Canal (CCI) en Redes Heterogéneas (HetNet), se requiere la implementación de mecanismos de coordinación que busquen controlar y gestionar la interferencia, por lo cual a continuación se exponen los mecanismos que serán desarrollados en el presente trabajo.

1.11.1 Modelo de Control Ideal de Potencia

El modelo de Control Ideal de Potencia (IPC, *Ideal Power Control*) se centra principalmente en el conocimiento previo de las pérdidas de propagación, el ruido térmico en el sistema, más los efectos producidos por el desvanecimiento presente en la comunicación entre un usuario y una Estación Base (BS). El objetivo de conocer las variables mencionadas, es encontrar la potencia necesaria con la cual un Equipo de Usuario (UE) debe transmitir, para tener una buena SINR y lograr así una óptima calidad en el servicio y al mismo tiempo disminuir los niveles de interferencia que se generan por un inadecuado uso de la potencia de transmisión por parte de los usuarios de la red inalámbrica.

Para calcular el nivel mínimo de la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) experimentado por la Estación Base (BS) y que proviene de los equipos de usuarios ubicados en la red, se cuenta con la ecuación 1.1 [35]:

$$\text{sinr}_i = \frac{\alpha_i p t_i}{\eta + \sum_{j=1, j \neq i}^N \alpha_j p t_j}, \quad i, j \in \mathbb{N} \quad (1.1)$$



Para el sistema de ecuaciones 1.3 se define el ruido térmico (η) como un vector de orden $1 \times N$, donde $\alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_N\}$ es el vector de las ganancias del sistema de orden $N \times 1$, $\text{sinr} = \{\text{sinr}_1, \dots, \text{sinr}_N\}$ es un vector de orden $N \times 1$ con el valor de la calidad de la comunicación mínimo requerido por cada usuario en su servicio y en el caso de la potencia de transmisión, con el fin de cumplir con la SINR mínima requerida se tiene un vector de orden $N \times 1$ que se define $pt = \{pt_1, \dots, pt_2\}$. Es así que con los vectores anteriores se plantea el sistema de ecuaciones de la ecuación 1.4.

$$\begin{bmatrix} \frac{\alpha_1}{\text{sinr}_1} & \dots & -\alpha_N \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -\alpha_N & \dots & \frac{\alpha_N}{\text{sinr}_N} \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} pt_1 \\ \vdots \\ pt_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \vdots \\ \eta_N \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

Para facilitar la deducción de la potencia de transmisión de cada uno de los usuarios teniendo en cuenta todos los dispositivos que se encuentren en la red heterogénea, el anterior sistema queda expresado en función de un sistema lineal de ecuaciones. Como el que muestra la ecuación 1.5.

$$Hp = \eta \quad (1.5)$$

Donde H es una matriz no singular de orden $N \times N$, que se define en la siguiente ecuación.

$$H = \begin{cases} -\alpha_j & i \neq j \\ \frac{\alpha_i}{\text{sinr}_i} & i = j \end{cases}, \forall i, j \in N \quad (1.6)$$

De la ecuación 1.5 se despeja la potencia de transmisión para cada usuario, la cual se define la ecuación 1.7 como:

$$p = H^{-1}\eta \quad (1.7)$$

De la ecuación 1.7 se obtiene el resultado de la potencia que se debe asignar a cada equipo de usuario para transmitir. Para tener un cálculo sobre la interferencia que se genera por usuarios que se encuentran en celdas vecinas, es necesario incluir este tipo de interferencia intercelda, para lo cual se construye la ecuación 1.8.



$$\text{sinr}_i = \frac{\alpha_i p t_i}{\eta + i o + \sum_{j=1, j \neq i}^N \alpha_j p t_j}, \quad i, j \in \mathbb{N} \quad (1.8)$$

En donde io es un escalar que muestra la interferencia que percibe la estación base de estudio, proveniente de los usuarios que se encuentran fuera del área de cobertura, io se define en la ecuación 1.9.

$$io = \sum_{m=N+1}^M \alpha_m p_m \quad (1.9)$$

De esta manera la ecuación 1.10 muestra el sistema de ecuaciones lineales.

$$Hp = \eta + io \quad (1.10)$$

La solución del sistema de ecuaciones se encuentra con la ecuación 1.11.

$$p = H^{-1}(\eta + io) \quad (1.11)$$

De la anterior ecuación se obtiene la potencia con la que los usuarios deben transmitir para tener un control sobre la Interferencia Co-Canal (CCI), que es generada por todos los usuarios que se encuentren en la red.

1.11.2 Modelo de Cambio de Frecuencia

El modelo de cambio de frecuencia se presenta como un mecanismo de coordinación de interferencia, el cual se implementó en el desarrollo del presente trabajo de grado, con el objetivo de evaluar su gestión de interferencia en la Red Heterogénea (HetNet).

Este mecanismo se encuentra basado en la re-asignación del espectro, el cual se aplicará dependiendo de un nivel permitido de Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) que sea percibido por la Estación Base (BS) proveniente de los equipos de usuario que se encuentran en la Red Heterogénea (HetNet). Es decir cuando la estación base supere el nivel de referencia de la SINR, rápidamente un número de usuarios deberán cambiar la frecuencia en la que se encuentran operando, por una frecuencia que se encuentre disponible en ese determinado



tiempo, dejando así de interferir con los demás usuarios y como consecuencia de esto reduciendo los niveles de Interferencia Co-Canal (CCI) que se puedan presentar en la red.

Para la implementación de este método se hizo necesaria la sectorización de la celda, en donde se pueda dividir el Ancho de Banda (BW) del sistema en dos bandas de frecuencia. Estas se pueden distribuir exclusivamente para cada sector de la celda. La sectorización se realiza en el centro y el borde de la celda, debido a que los niveles de interferencia que se experimentan en estos dos sectores son diferentes, puesto que dependen de las condiciones que presenta el canal de comunicaciones. Una forma sencilla de explicar este modelo se expone en la figura 1.11.

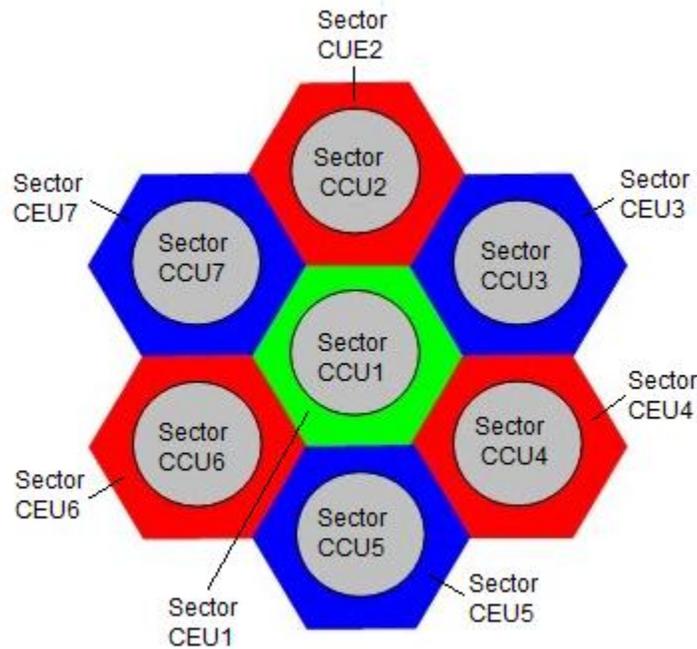


Figura 1.11 Sectorización para el modelo de cambio de frecuencia

Según lo que muestra la figura 1.11, los usuarios se pueden clasificar en dos categorías, la primera son los Usuarios del Centro de la Celda (CCU, *Cell Center User*), y los otros son los Usuarios del Borde de la Celda (CEU, *Cell Edge User*). Los CCU son los usuarios distribuidos en la zona gris, y los CEU son los usuarios ubicados en las áreas azules, verdes y rojas. Como el espectro se encuentra dividido los CCU pueden usar una parte de la banda de frecuencia y los CEU la otra porción de la banda. Pero para el área de los CEU debe aplicarse un factor de reuso mayor a 1, ya que en los bordes se puede presentar un mayor nivel de



interferencia, dado que los usuarios están más cercanos a celdas vecinas. Por parte de los CCU se utiliza un factor de reuso de frecuencias de 1, puesto que las otras zonas grises se encuentran a una distancia mayor, donde será más sencillo controlar la Interferencia Co-Canal (CCI) [15].

1.11.3 Modelo de Control Híbrido

Como tercer modelo se presentó el modelo de control híbrido, el cual integra los dos tipos de modelos anteriores, el modelo de control ideal de potencia y el modelo de cambio de frecuencia.

Para el desarrollo del modelo de control híbrido, primero se aplica la sectorización de las celdas, y se emplea el modelo de cambio de frecuencia (sección 1.11.2), Luego para cada uno de los usuarios se realiza control ideal de potencia, limitando aún más la interferencia que se pueda presentar en el sistema. Debido a que los CCU transmiten con una menor potencia dado que se encuentran más cerca a la Estación Base (BS) y por este motivo disminuirán la interferencia que puedan provocar a otros CCU de las celdas vecinas. El Problema a enfrentar es en los CEU debido a que necesitan transmitir con mayor potencia ya que se encuentran en el borde de la celda, y por estar ubicados en esta zona su distancia es menor a CEU vecinos, por este motivo el factor de reuso debe ser mayor a 1, logrando así mitigar la Interferencia Co-Canal (CCI) en la Red Heterogénea.



2 DISEÑO, IMPLEMENTACION Y PLAN DE PRUEBAS DEL SIMULADOR.

Este capítulo presenta el desarrollo de los procesos para la elaboración del simulador estático a nivel de sistema⁶, el desarrollo del simulador permitirá evaluar la Interferencia Co-Canal (CCI) en el Enlace de Subida (UL) para una Red Heterogénea (HetNet) y como ésta afecta a la Calidad de Servicio (QoS) en las comunicaciones que se generen.

El simulador permite la evaluación de diferentes mecanismos de coordinación, a fin de reducir los niveles de interferencia en las redes heterogéneas.

2.1 Metodología para el desarrollo

La metodología implementada para el presente trabajo de grado es el Modelo Lineal Secuencial [36]. Este modelo expone una estructura lineal conformada por fases, en el cual el inicio de cada una debe esperar a la finalización de la inmediatamente anterior. Para implementar el simulador estático a nivel de sistema se hace uso de la misma metodología.

Las fases que definen el modelo se aprecian en la figura 2.1.



Figura 2.1 Fases del Modelo Lineal Secuencial. Adaptada de [36]

⁶ Simulador estático a nivel de sistema: herramienta que permite el estudio del desempeño promedio (capacidad, cobertura, etc...) de una red sobre un área determinada.



2.2 Análisis de requerimientos

Determinar los requerimientos para la implementación del simulador de redes heterogéneas es fundamental para cumplir con los objetivos propuestos en este trabajo de grado.

2.2.1 Requerimientos

Partiendo y entendiendo el problema más significativo en las Redes Heterogéneas (HetNet), a continuación se determinan los requerimientos del simulador para el análisis de la Interferencia Co-Canal (CCI).

Requerimiento 1: realizar el despliegue de una red heterogénea estática.

Requerimiento 2: permitir la selección de la frecuencia de operación de los usuarios y el número de femtoceldas que se desplegaran.

Requerimiento 3: aplicar o no el método Montecarlo en la simulación, determinando el número de repeticiones a utilizar.

Requerimiento 4: obtener las pérdidas de propagación de cada uno de los usuarios con respecto a la Macro Estación Base (MBS).

Requerimiento 5: calcular la Interferencia Co-Canal (CCI) que percibe la Macro Estación Base (MBS).

Requerimiento 6: determinar la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) del Enlace de Subida (UL).

Requerimiento 7: ejecutar mecanismos de coordinación de interferencia, como el Control Ideal de Potencia (IPC), modelo de cambio de frecuencia y el modelo de control híbrido.

Requerimiento 8: evaluar la Interferencia Co-Canal (CCI) y la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR), cuando se emplean los mecanismos de coordinación de interferencia.

Requerimiento 9: mostrar los resultados por medio de gráficas para realizar el análisis estadístico.

2.3 Diseño

En esta etapa se planea y establecen soluciones que busquen cumplir los objetivos propuestos. Para esto se propone la construcción del simulador, el cual permite la representación de una Red Heterogénea (HetNet), en la cual interactúen diferentes elementos de red, con la intención de evaluar la interferencia y obtener resultados satisfactorios.

El diseño general del sistema se expone en la figura 2.2.

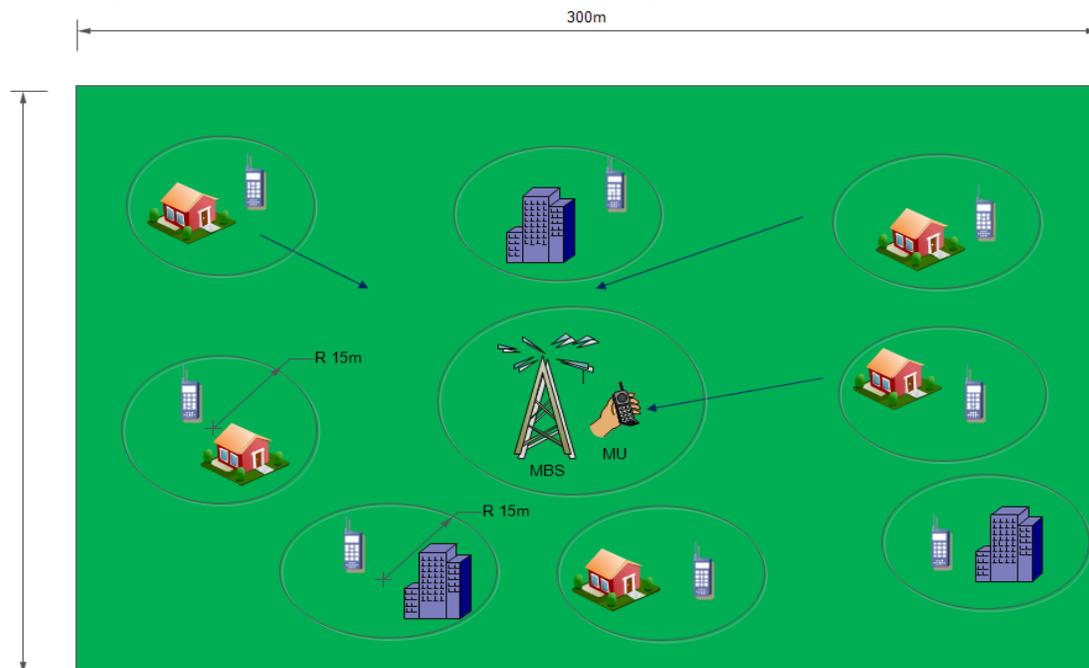


Figura 2.2 Escenario de Análisis

2.3.1 Diseño del modelo del sistema

Para el diseño del sistema se definió el diagrama en bloques mostrado en la figura 2.3, el cual representa los elementos esenciales para el sistema de Redes Heterogéneas (HetNet).

Como primera medida se tienen dos tipos de Estaciones Base (BS). La primera es una Macro Estación Base (MBS), y la segunda son Femto Estaciones Base (FBS), donde le brindan servicio a dos tipos de usuarios, los que son asociados a la Macro Estación Base (MBS), denominados Macro Usuarios (MU) y a los conectados a la Femto Estación Base (FBS), llamados Femto Usuarios (FU).



Cada Femto Usuario (FU) se conecta a su Femto Estación Base (FBS), transmitiendo una señal la cual sufre los efectos de atenuación y desvanecimiento por parte del canal, al mismo tiempo esta señal interfiere en la comunicación entre el Macro Usuario (MU) y la Macro Estación Base (MBS), para lo cual se implementan procesos para la coordinación de señales interferentes.

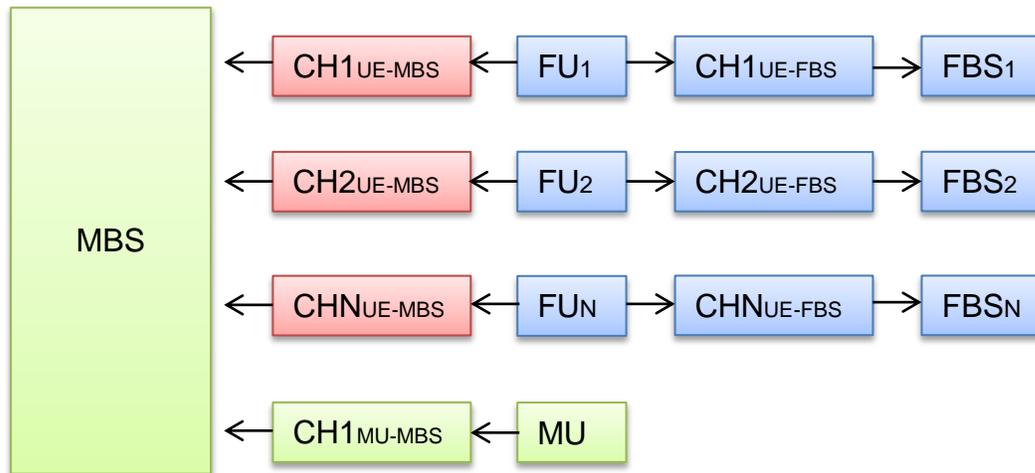


Figura 2.3 Escenario de Análisis

2.3.2 Diseño del simulador

En la figura 2.4 se modela el diagrama de flujo general donde se definen los procedimientos a ejecutar en el sistema desde su inicio, comenzando con las variables de entrada de diseño, las cuales especifican los parámetros de configuración del escenario a analizar, luego se implementa un mecanismo de control de interferencia para determinar el Estado de Degradación (OS, *Outage State*) y realizar el análisis de Interferencia Co Canal (CCI).

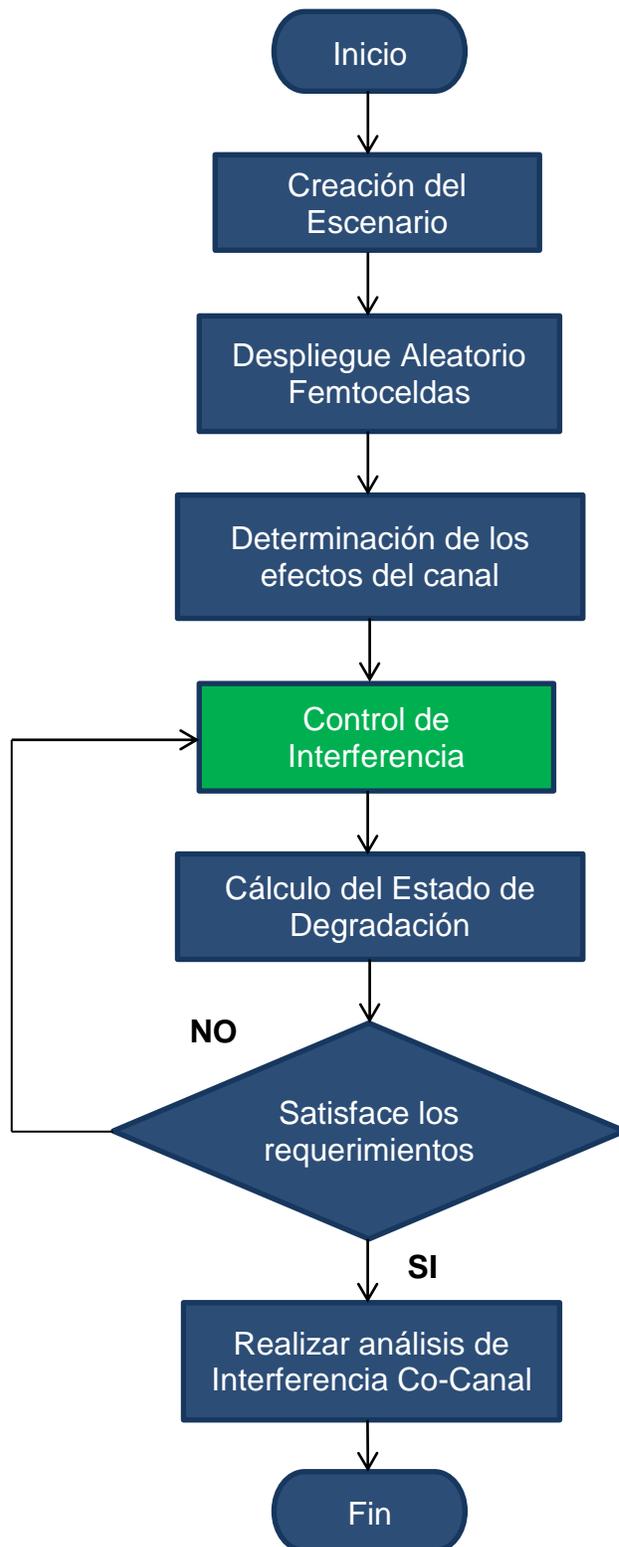


Figura 2.4 Diagrama de Flujo General del Sistema



El desarrollo del modelo de Control Ideal de Potencia (IPC) representado en la figura 2.5, en la primera parte se efectúa cálculos matemáticos para obtener la potencia de transmisión necesaria que se asigna a cada Equipo de Usuario (UE), posteriormente se calcula la Interferencia Co-Canal (CCI) y la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR).

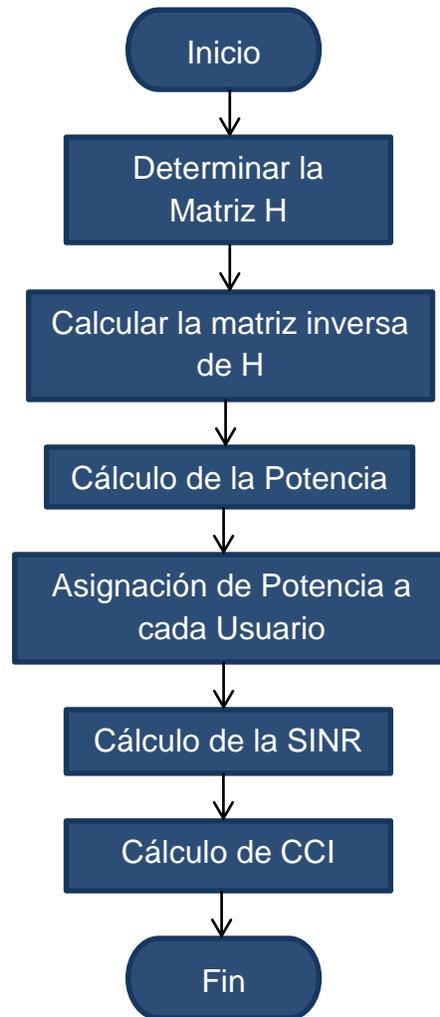


Figura 2.5 Diagrama de Flujo de Control Ideal de Potencia

El diagrama de flujo del modelo de cambio de frecuencia representado por la figura 2.6 inicia con la sectorización de las femtoceldas, se identifica la posición de los usuarios (borde o centro) para determinar si al usuario se le aplica o no cambio de frecuencia, seguido de los cálculos de SINR y CCI.

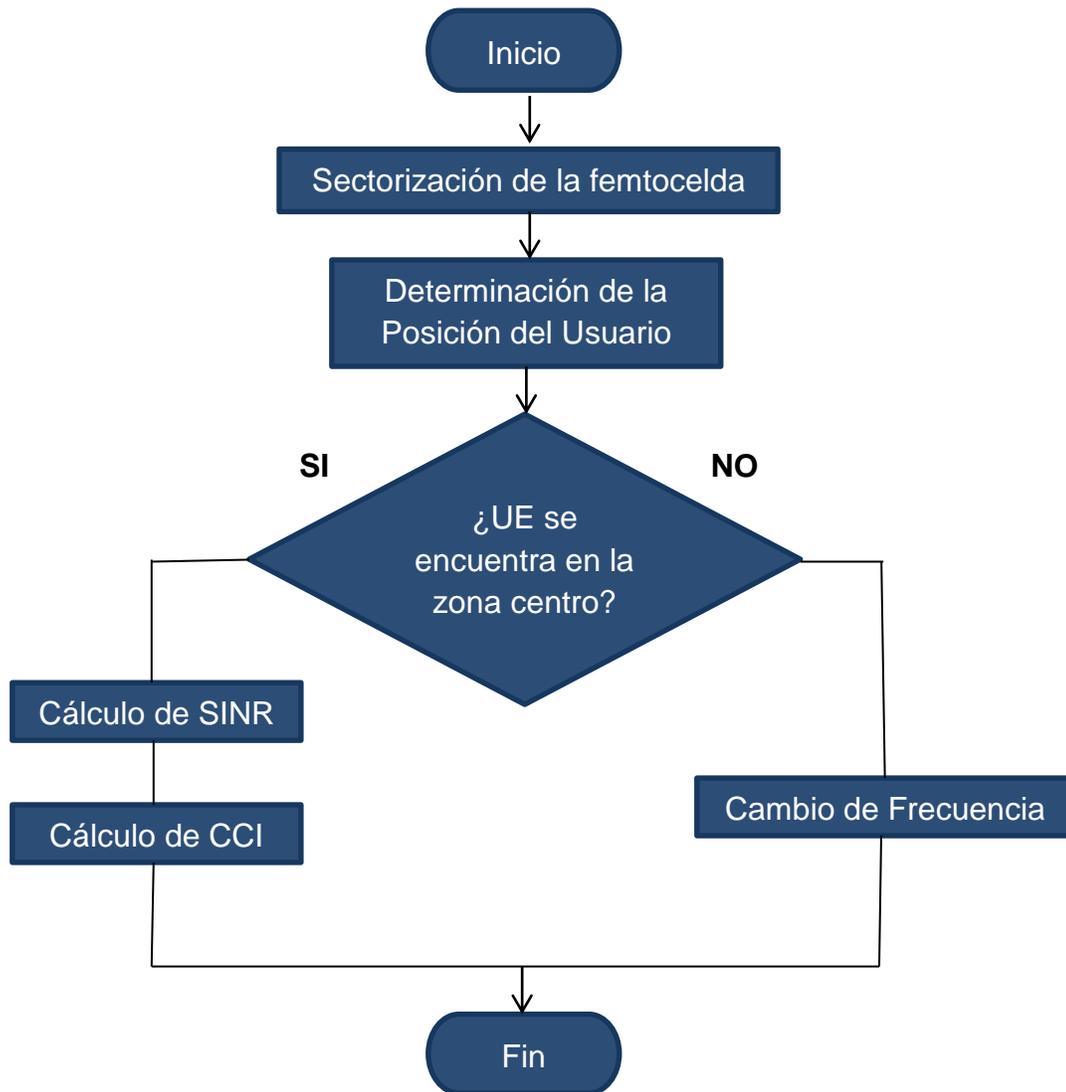


Figura 2.6 Diagrama de Flujo de Cambio de Frecuencia

El procedimiento para el modelo de control híbrido se especifica en el diagrama de flujo que exhibe la figura 2.7, el cual es una combinación de los modelos anteriormente explicados, que inicia con la aplicación del modelo de cambio de frecuencia, para después implementar el modelo de Control Ideal de Potencia (IPC) y realizar los respectivos cálculos de SINR y CCI.

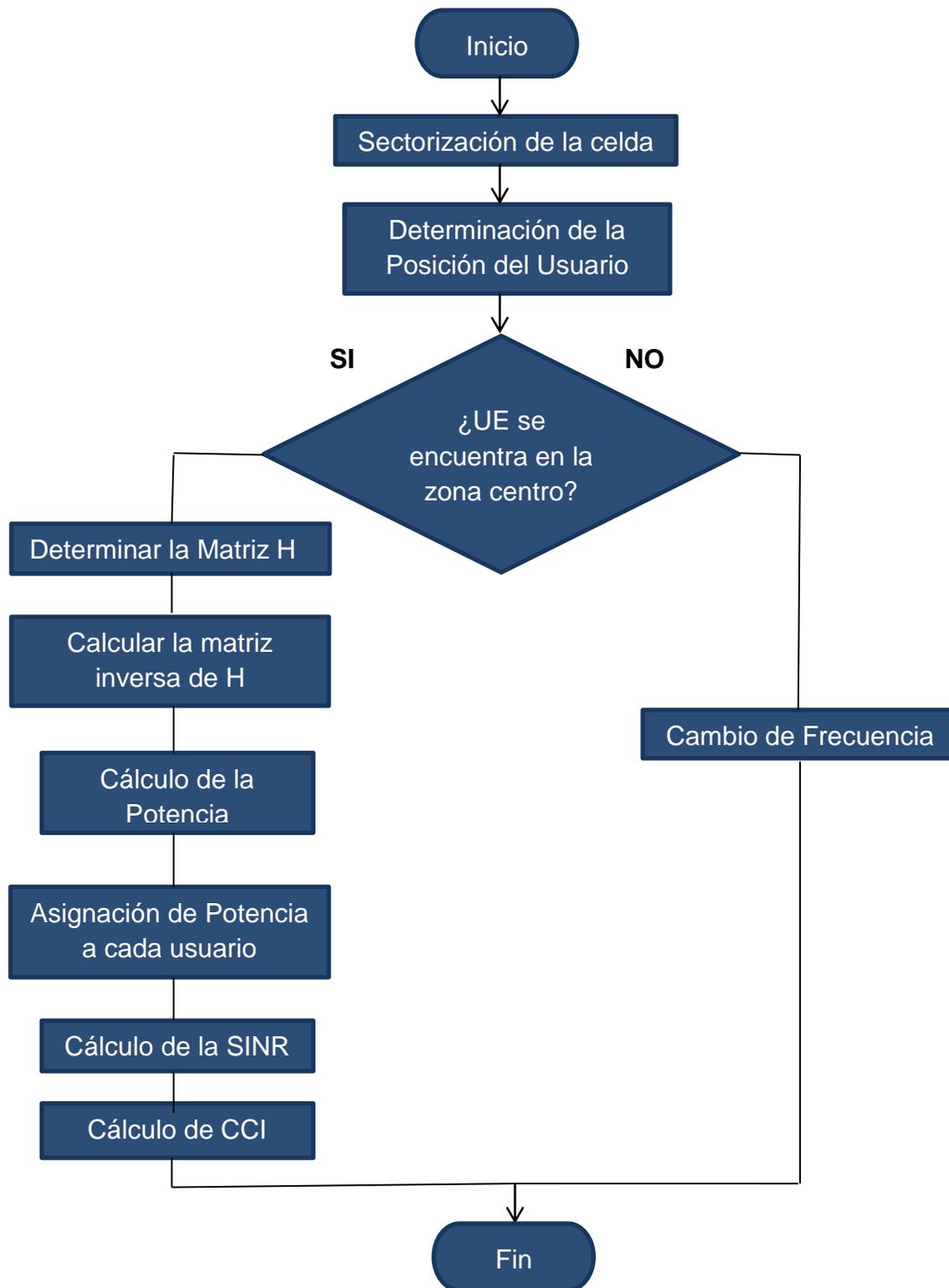


Figura 2.7 Diagrama de Flujo de Control Híbrido



2.3.3 Aspectos a tener en cuenta en el Simulador

Para el desarrollo del simulador se deben tener en cuenta varias consideraciones importantes que representan el comportamiento de una Red Heterogénea (HetNet) en un entorno móvil, los cuales se especifican a continuación:

2.3.3.1 Método de acceso de usuario a la femtocelda

Existen diferentes métodos de acceso a una femtocelda por parte de los usuarios, cerrado, abierto e híbrido, para el presente trabajo de grado se van a desplegar un gran número de femtoceldas (100, 300 y 500) en los escenarios, simulando un operador de red móvil celular de pequeña capacidad por lo que el método escogido es el cerrado, en el cual sólo usuarios previamente registrados tienen autorización para acceder a la red donde cada femtocelda puede atender a un sólo Femto Usuario (FU). La Interferencia Co-Canal (CCI) se genera entre el mismo grupo de femtoceldas que están registradas, sin importar las que no están registradas o alguna Macro Estación Base (MBS) cercana.

2.3.3.2 Administración del espectro

Con la intención de obtener una administración estratégica en el uso y aprovechamiento eficiente del espectro, se escogió el tipo de espectro compartido, el cual asigna el mismo rango de frecuencias a todos los niveles de red, tanto para el nivel macro como el nivel inferior donde se encuentran las pequeñas celdas, este tipo de espectro es muy útil, pero a su vez genera un crecimiento de la Interferencia Co-Canal (CCI), ya que todos los usuarios tienen la misma posibilidad de hacer uso de los recursos, con lo que se ve afectado el desempeño de la red.

2.3.3.3 Ruido Térmico

El ruido en general es cualquier señal no deseada que afecta a la señal de información. Para desarrollar el análisis de la Interferencia Co-Canal (CCI) se tiene en cuenta el ruido térmico, ya que este se encuentra presente en cualquier circuito eléctrico o sistema debido a la agitación térmica de electrones. Este se define en la ecuación 2.1 expresada en unidades lineales.

$$\eta [Watts] = \kappa T B \quad (2.1)$$



dónde:

κ : es la constante de Boltzmann, donde $\kappa = 1.3806504 * 10^{-23} J/^{\circ}K$

T : Temperatura ambiente, normalmente $T = 290 ^{\circ}K$

B : es el ancho de banda en Hertz [Hz]

Para un mejor análisis se calcula el nivel umbral de ruido térmico en el receptor a una temperatura ambiente, la cual se expresa en la ecuación 2.2 en unidades logarítmicas.

$$N[dB_w] = -204 + 10 \log(B[Hz]) + NF[dB] \quad (2.2)$$

dónde:

NF : figura de ruido.

2.3.3.4 Aspectos Generales

Las características generales del simulador y de los escenarios y las condiciones a simular son:

- Para cada transmisión entre los usuarios y las estaciones base (macro y femto) se planifican todos los parámetros de simulación.
- Cada usuario que se despliega tiene asociado a él una estación base, este se ubica dentro del área de cobertura, donde se cuenta con una comunicación activa. Las Femto Estaciones Base (FBS) y los usuarios se reparten de manera aleatoria dentro del escenario siguiendo una distribución uniforme.
- Se asume que tanto la macro estaciones base como las femtoceldas y los usuarios no tienen más de una antena, por lo que no se considera ningún tipo de ganancia por diversidad.
- Se consideran antenas con un patrón de radiación omnidireccional, sin contar con los efectos relacionados a los cambios de inclinación de la antena.



- Se considera que el área de servicio de la Macro Estación Base (MBS) como la de las femtoceldas es circular.
- Los escenarios no tienen cuadrícula tipo Manhattan, como se realiza en la mayoría de simulaciones en entornos micro celulares.
- No se consideran traspasos entre las estaciones base, debido a que es un simulador estático.
- No se asumen ningún tipo de pérdidas adicionales.

2.3.4 Modelo de Propagación.

Los modelos de propagación permiten representar aproximadamente las pérdidas de un canal en un ambiente en particular. Estos modelos se basan en análisis probabilísticos, que calculan el nivel de la señal transmitida. Para el presente trabajo de grado se empleó el modelo de propagación para ambientes interiores, exteriores y peatonales desarrollado por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*) [37], el cual se define en la ecuación 2.3

$$L_b[dB] = 49 + 40 \log(d[km]) + 30 \log(f[MHz]) \quad (2.3)$$

dónde:

d : es la distancia entre un usuario y la Estación Base (BS) en [Km].

f : es la frecuencia de operación dada en [Mhz]

2.3.5 Desvanecimiento

Para este trabajo de grado el desvanecimiento se define como la variabilidad que produce el medio de transmisión, se representa por unas pérdidas aleatorias que se le adicionan a la señal de transmisión, afectando la comunicación entre el usuario y la Estación Base (BS).

Para realizar el cálculo de las pérdidas por desvanecimiento, se suman dos valores aleatorios, los cuales siguen una distribución de tipo Rayleigh y Normal.



2.3.6 Interferencia Co-canal en el Sistema

En este trabajo las señales interferentes provienen de los Femto Usuarios (FU) y afectan la comunicación entre el Macro Usuario (MU) y la Macro Estación Base (MBS). Por medio de la ecuación 2.6 se determina la potencia de las señales interferentes percibidas por la Macro Estación Base (MBS), que proviene de cada uno de los Femto Usuarios (FU) en unidades lineales.

$$p_i = p_t * \alpha \quad (2.6)$$

dónde:

p_i : potencia interferente recibida del Femto Usuario (FU) en vatios.

p_t : potencia de transmisión del Femto Usuario (FU) en vatios.

α : ganancia del sistema entre el Femto Usuario (FU) y la Macro Estación Base (MBS), se define en la ecuación 1.2.

Para calcular la Interferencia Co-Canal (CCI) se utiliza la ecuación 2.7 en unidades lineales.

$$cci = i_o = \sum_{j=1}^N p_{t_j} * \alpha_j \quad (2.7)$$

en dónde:

N : número de Femto Usuarios (FU) desplegados en la red heterogénea.

2.3.7 Relación Señal a Interferencia más Ruido

La Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) es uno de los factores más importantes para determinar el desempeño en una Red Heterogénea (HetNet), ya que con el cálculo de esta se permite evaluar la probabilidad de degradación.

Para calcular el valor de la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) percibida por la Macro Estación Base (MBS) se utiliza la ecuación 2.8, expresada en unidades lineales. Esta ecuación relaciona la potencia de la señal recibida por la Macro Estación Base (MBS) y la suma de las potencias recibidas de señales interferentes de cada uno de los Femto Usuarios (FU) más el ruido térmico presente en el sistema.



$$\text{sinr}_{\text{MBS}} = \frac{\alpha_{\text{MU-MBS}} * p_{t\text{MU}}}{\eta + \sum_{j=1}^K \alpha_j p_{tj}}, \quad j \in \mathbb{N} \quad (2.8)$$

donde,

$\alpha_{\text{MU-MBS}}$: ganancia del sistema entre el Macro Usuario (MU) y la Macro Estación Base (MBS).

$p_{t\text{MU}}$: potencia de transmisión del Macro Usuario (MU) en vatios.

η : ruido térmico que se presenta en el sistema en vatios.

K: número total de usuarios presentes en la red.

2.3.8 Estado de degradación

El límite de capacidad del sistema puede darse en términos del Estado de Degradación (OS). Este criterio se basa en el hecho de determinar la Calidad de Servicio (QoS) del sistema, a partir del valor de la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) percibida en la Macro Estación Base (MBS), la ecuación 2.9 determina el Estado de Degradación (OS) del servicio que puede ser de 1 ó 0 (cero) según esté por debajo o encima de un valor de SINR objetivo $\gamma = 0$ dB, el cual representa el valor mínimo de SINR que la Macro Estación Base (MBS) debe percibir para que la Calidad del Servicio (QoS) prestado por el Macro Usuario (MU) no se afecte.

$$\text{estado}_{\text{degradación}} = \begin{cases} 1, & \text{SINR}_{\text{MBS}} < \gamma \\ 0, & \text{SINR}_{\text{MBS}} \geq \gamma \end{cases} \quad (2.9)$$

- El Estado 1 representa que la Macro Estación Base (MBS) capta una SINR por debajo del valor de SINR objetivo (0dB), por lo cual se degrada la Calidad de Servicio (QoS) ofrecida.
- El Estado 0 representa que la Macro Estación Base (MBS) capta una SINR igual o por encima del valor de SINR objetivo (0dB), por lo que la MBS está percibiendo una buena calidad de servicio (QoS).



2.4 Implementación

Esta fase describe los procesos involucrados en el desarrollo del simulador propuesto para este trabajo de grado. Como primera medida, se escoge la herramienta de simulación más conveniente, posteriormente se explican los diferentes parámetros de simulación para implementar y validar el código que permita evaluar la Interferencia Co-Canal (CCI) percibida por la Macro Estación Base (MBS) cuando se hace uso o no de diferentes mecanismos de coordinación de interferencia en una Red Heterogénea (HetNet).

2.4.1 Selección de la Herramienta de Simulación

Para realizar la selección de la herramienta de simulación se tienen en cuenta las necesidades del proyecto, como lo son las operaciones y funciones matemáticas, elaboración de gráficas, entorno agradable de trabajo. Se analizaron dos herramientas que cumplen con estos requisitos, estas son el software de licencia Matlab® 7.14 R2012a) [38] y el software libre y de código abierto Scilab 5.4.1 [39].

Scilab versión 5.4.1 satisface los requerimientos para el desarrollo del trabajo de grado, ya que ofrece herramientas de cálculo y construcción de gráficos, además de ser un producto de software libre y de código abierto, por otra parte Matlab® proporciona una gran variedad de funciones que se pueden implementar para facilitar la construcción del código de programación, además es una herramienta acogida por gran parte de la comunidad científica y universitaria. Este es un software que se distribuye bajo la adquisición de una licencia, pero gracias a que la Universidad del Cauca cuenta con licencias, se escogió Matlab® como herramienta principal del trabajo de grado ya que permite la creación de una interfaz gráfica, la cual es necesaria para la creación del simulador.

2.4.2 Parámetros del sistema

El escenario en el cual se despliegan las Macro Estaciones Base (MBS) y femtoceldas tiene por dimensiones 300 metros (m) de ancho y 300 metros (m) de largo, es decir un área de 90000 metros cuadrados (m^2). Dentro de este se encuentran varios Equipos de Usuario (UE) desplegados siguiendo una distribución uniforme, que transmiten con una potencia de 10mW (10dBm), donde cada uno de los usuarios se conecta a una Femto Estación Base (FBS), estos Equipos de Usuario (UE) interfieren con la señal que percibe una Macro Estación Base (MBS) proveniente de un Macro Usuario (MU) o usuario deseado.



El sistema se configura para que los usuarios dispongan de un Ancho de Banda (BW) de 5 MHz, las macro y femto estaciones base poseen antenas cuya ganancia es igual a 0 dBi. Los demás parámetros se presentan en las tablas 2.1, 2.2 y 2.3.

La tabla 2.1 sintetiza los parámetros utilizados por los equipos de usuario.

	Equipos de Usuario
Potencia Máxima de transmisión	10dBm
Perdidas Adicionales	0 dB
Ganancia de Antena	0 dBi

Tabla 2.1 Parámetros del Equipo de usuario

La tabla 2.2 muestra los parámetros de la Macro Estación Base (MBS) y las Femto Estaciones Base (FBS).

	Femto Estación Base	Macro Estación Base
Radio de la celda	15m	100m
Perdidas Adicionales	0 dB	0 dB
Ganancia de Antena	0 dBi	0 dBi

Tabla 2.2 Parámetros femto estación base y macro estación base

La tabla 2.3 presenta los parámetros del sistema que se implementan en la simulación.

	Equipos de Usuario
Escenario	Semi-urbano
Tipo de Interferencia	Entre niveles
Frecuencia de Operación	1700 MHz
Ancho de Banda	5 MHz

Tabla 2.3 Parámetros del Sistema

La implementación del código en el simulador se especifica en el apéndice B del trabajo de grado.



2.5 Pruebas

Una vez determinadas las características de la Red Heterogénea (HetNet) sobre la cual se realizarán las simulaciones, el paso siguiente es definir los escenarios con el propósito de evaluar la Interferencia Co-Canal (CCI) y los diferentes mecanismos de coordinación de interferencia que buscan mitigar sus efectos en la comunicación inalámbrica. El plan de pruebas del simulador estático a nivel de sistema está diseñado para implementar el método de Montecarlo⁷, con el objetivo de obtener una muestra estadística representativa que permita realizar la evaluación de la Red Heterogénea (HetNet), analizando su desempeño y los niveles de interferencia al aplicar los mecanismos de coordinación.

Para analizar comparativamente la Interferencia Co-Canal (CCI) se establece un plan de pruebas en el simulador, donde se considera un sistema estocástico, debido a que depende de variables aleatorias. Para este trabajo de grado se definieron 3 escenarios de pruebas, variando las condiciones y parámetros de simulación, a fin de analizar con profundidad el comportamiento de la Red Heterogénea (HetNet). En la tabla 2.4 se expone los escenarios de pruebas.

Escenario	Numero de femto estaciones base.	Mecanismos de coordinación de interferencia.
1	100	Sin Mecanismo de coordinación de interferencia.
		Modelo de control ideal de potencia.
		Modelo de cambio de frecuencia.
		Modelo de control híbrido.
2	300	Sin Mecanismo de coordinación de interferencia.
		Modelo de control ideal de potencia.
		Modelo de cambio de frecuencia.

⁷ Método Montecarlo: método numérico que mediante la repetición de un mismo fenómeno un número considerable de veces, busca obtener una tendencia estadística en el desempeño de la red.



		Modelo de control híbrido.
3	500	Sin Mecanismo de coordinación de interferencia.
		Modelo de control ideal de potencia
		Modelo de cambio de frecuencia
		Modelo de control híbrido.

Tabla 2.4 Plan de Pruebas

Los resultados de las pruebas y el correspondiente análisis se presentan en el capítulo 3.





3 PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS.

Este capítulo presenta las pruebas y resultados obtenidos en el simulador estático a nivel de sistema implementado con la herramienta Matlab®, en el cual se simularon los escenarios expuestos en el capítulo anterior.

La presentación de los resultados se realiza por medio de gráficas y tablas para lograr una clara comparación de cada uno de los mecanismos de coordinación de interferencia. Para el análisis estadístico de los resultados se trabaja con las siguientes funciones:

- **Función de Distribución Acumulativa (CDF, *Cumulative Distribution Function*):** indica la probabilidad que una variable aleatoria sea menor o igual a un valor específico.
- **Promedio o media:** valor más probable de una cantidad medida. Es la relación entre la suma de todos los valores obtenidos en cada repetición y el número total de repeticiones [40].
- **Moda:** la moda es el dato más repetido, el valor de la variable con mayor frecuencia absoluta [40].

Para una mejor visualización de las figuras y tablas de los resultados, se hace uso de la siguiente nomenclatura para diferenciar los mecanismos de coordinación de interferencia empleados en los escenarios de simulación:

- **CCI:** interferencia co-canal sin mecanismo de coordinación de interferencia.
- **CCI_CP:** interferencia co-canal con Control Ideal de Potencia (IPC).
- **CCI_FRE:** interferencia co-canal con cambio de frecuencia.
- **CCI_HIB:** interferencia co-canal con control híbrido.
- **SINR:** Relación Señal a Interferencia más Ruido sin mecanismo de coordinación a interferencia.
- **SINR_CP:** Relación Señal a Interferencia más Ruido con Control Ideal de Potencia.



- **SINR_FRE:** Relación Señal a Interferencia más Ruido con cambio de frecuencia.
- **SINR_HIB:** Relación Señal a Interferencia más Ruido con control híbrido.

3.1 Escenario 1

El primer escenario tiene como objetivo principal determinar la Interferencia Co-Canal (CCI) y la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) percibida por el Macro Usuario (MU).

En este escenario se desplegaron 100 Femto Estaciones Base (FBS) de manera aleatoria, las cuales se representan por un cuadrado de color azul, cada una tiene asociado un Femto Usuario (FU) simbolizado por un círculo de color rojo, además se despliega la Macro Estación Base (MBS) como un cuadrado de color negro ubicado en el centro del escenario y el usuario deseado o Macro Usuario (MU) con un círculo de color verde, todos los elementos se muestran en la figura 3.1.

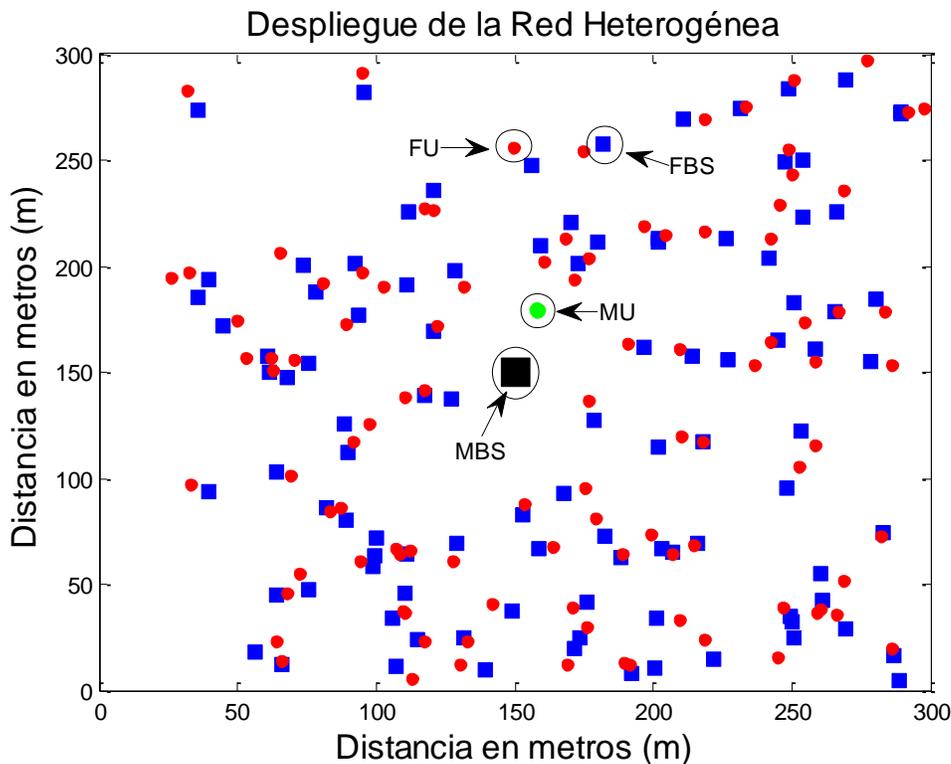


Figura 3.1 Escenario con 100 Femto Usuarios (FU)



Una vez desplegadas las 100 Femto Estaciones Base (FBS), se ejecuta el simulador con el método Montecarlo a 10000 repeticiones, el simulador entrega las gráficas que muestra la figura 3.2, las cuales presentan por medio de histogramas los resultados de la Interferencia Co-Canal (CCI) que percibe la Macro Estación Base (MBS), cuando se aplica o no los diferentes mecanismos de coordinación de interferencia.

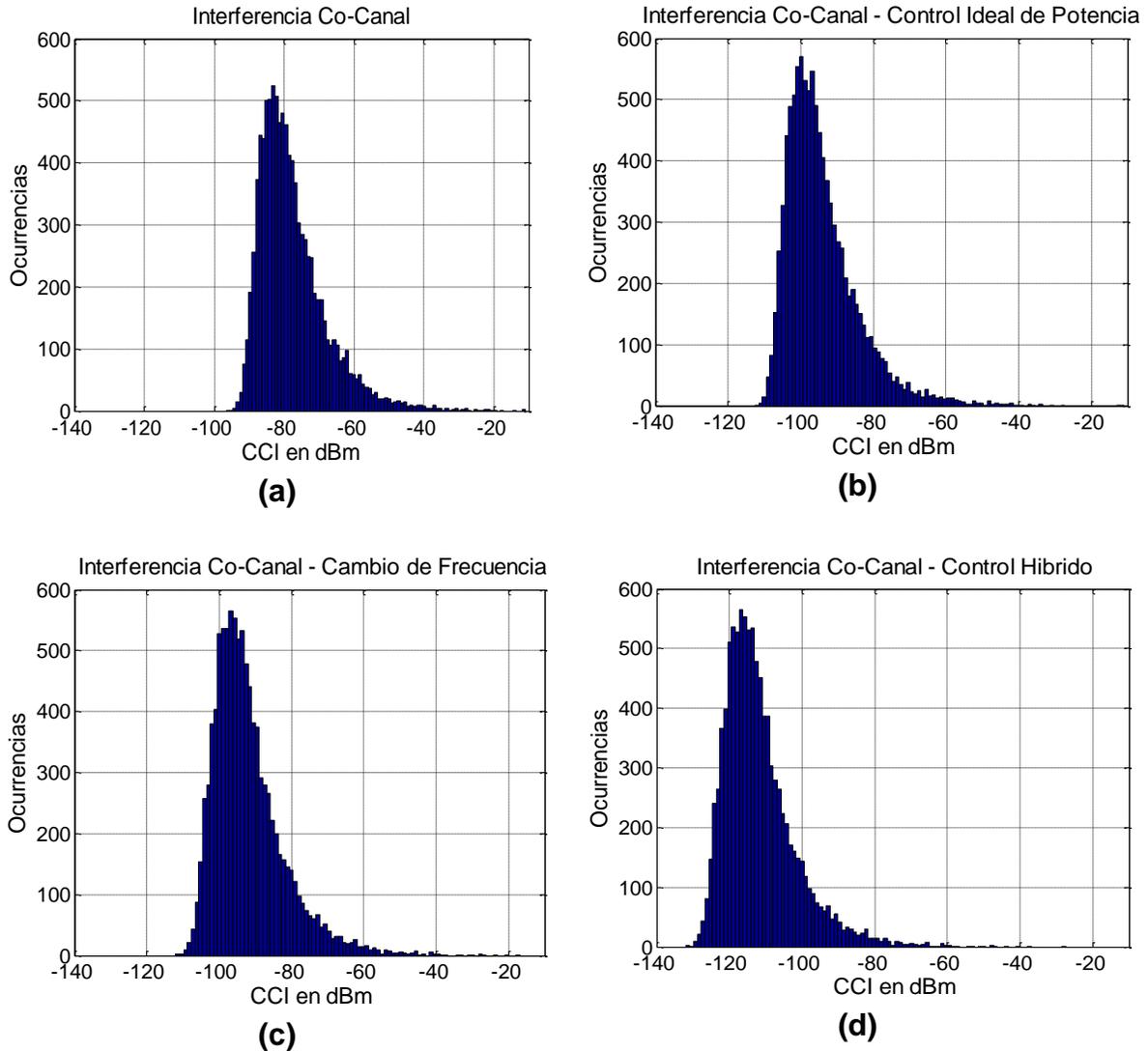


Figura 3.2 Interferencia Co-Canal (CCI) para 100 Femto Usuarios

La tabla 3.1 presenta el valor promedio de la Interferencia Co-Canal (CCI) que percibe la Macro Estación Base (MBS) y la moda obtenida en el escenario 1 con 100 femtoceldas.



Interferencia Co-Canal (CCI)	Promedio CCI (dBm)	Moda (dBm)
Interferencia total sin mecanismo	-77.6136	-83.2
Control Ideal de Potencia	-94.1454	-99.8
Control de Cambio de Frecuencia	-91.8453	-96.8
Control Híbrido	-111.6877	-117

Tabla 3.1 Promedio de CCI y Moda para 100 Femto Usuarios (FU)

Los diagramas que muestra la figura 3.2, evidencian que a medida que se emplean los diferentes mecanismos de coordinación, los niveles de Interferencia Co-Canal (CCI) percibidos en la Macro Estación Base (MBS) disminuyen, como se puede apreciar también en la tabla 3.1, ya que al comparar la CCI sin ningún mecanismo y la CCI del modelo de control híbrido, se observa una reducción de 34.07 dBm en el nivel de Interferencia Co-Canal (CCI).

Los resultados presentados en la tabla 3.1, muestran que para 100 femtoceldas desplegadas, los mecanismos de Control Ideal de Potencia (IPC) y cambio de frecuencia, entregan niveles de CCI similares, lo que hace indiferente la elección de cualquiera de los dos para la coordinación de la interferencia en las Redes Heterogéneas (HetNet).

La figura 3.3 presenta por medio de la función de distribución acumulativa (CDF) la probabilidad que la Interferencia Co-Canal (CCI) percibida por la macro estación base (MBS) sea menor o igual a un valor específico, para el análisis se toman dos valores de referencia -80 dBm y -100 dBm.

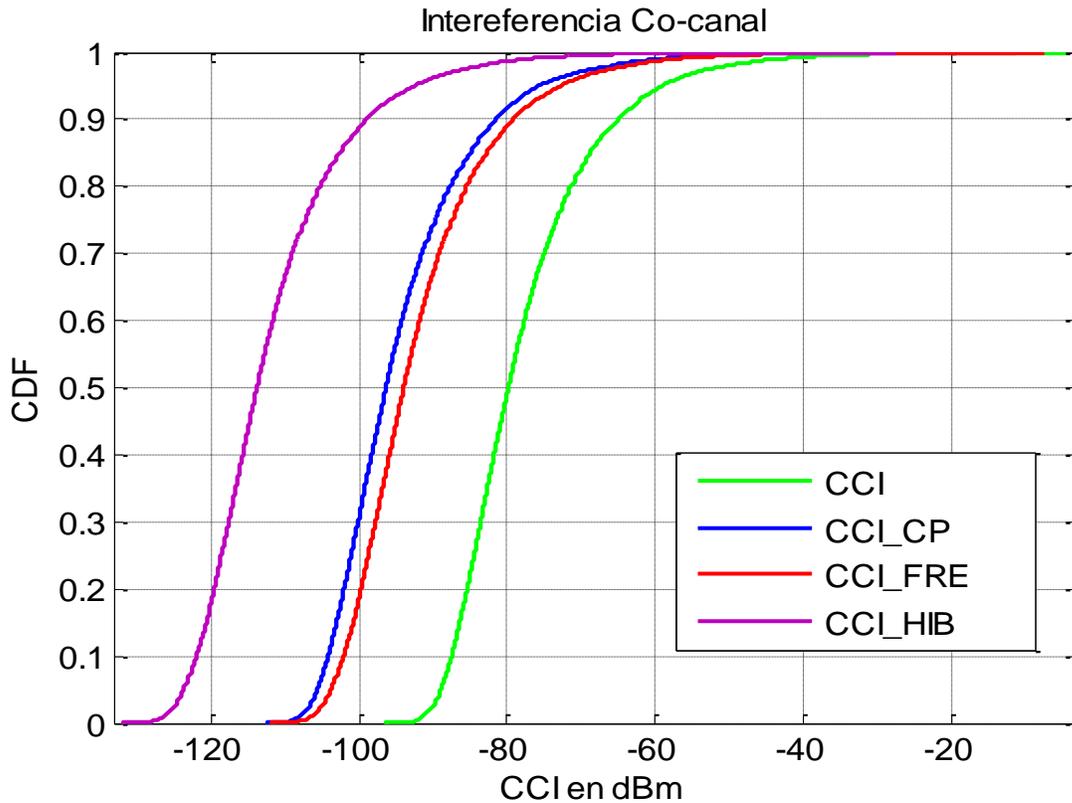


Figura 3.3 Función de Distribución Acumulativa (CDF) de la CCI para 100 FU

En la figura 3.3 se observa que el mecanismo de control híbrido (CCI_HIB) presenta el mejor desempeño para un nivel de CCI de -80 dBm al tener mayor probabilidad de obtener valores inferiores a los alcanzados por los otros mecanismos de coordinación. Para las CDF de CCI_CP y CCI_FRE se presenta un desempeño similar para obtener niveles de CCI menores a -80 dBm, sin embargo, para valores de CCI de -100 dBm se aprecia una clara diferencia entre estos dos mecanismos de coordinación.

La tabla 3.2 expone la probabilidad de percibir valores de Interferencia Co Canal (CCI) menores o iguales a -80dBm y -100 dBm en la Macro Estación Base (MBS) para 100 femtoceldas desplegadas, muestra que los mecanismos de coordinación presentan una alta probabilidad de alcanzar niveles menores a -80 dBm para 100 femtoceldas desplegadas, también se observa que sin el uso de los mecanismos, la probabilidad de lograr que la CCI sea menor a -100 dBm es cero, lo que hace indispensable la coordinación de interferencia para prestar un servicio de calidad en un Red Heterogénea (HetNet).

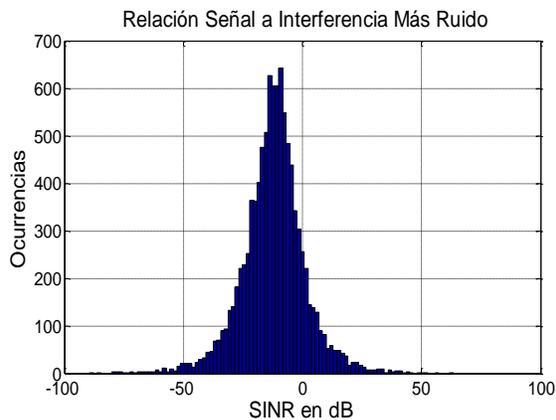


Mecanismos	Probabilidad (CCI) < -80 dBm	Probabilidad (CCI) < -100 dBm
Sin Mecanismo	0.489	0
Control Ideal de Potencia	0.915	0.304
Control de Cambio de Frecuencia	0.888	0.185
Control Híbrido	0.986	0.887

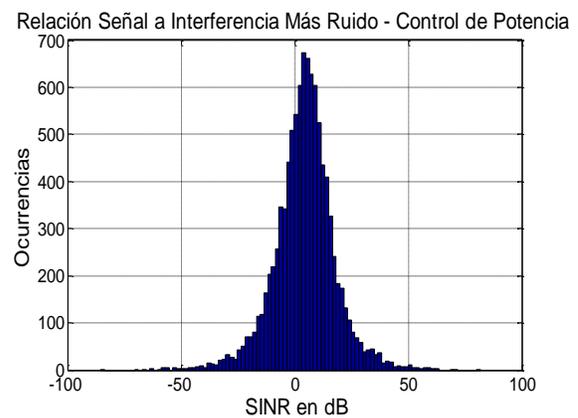
Tabla 3.2 Función de Distribución Acumulativa (CDF) para CCI con 100 FU

Los histogramas de la figura 3.4 muestran la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) en la Macro Estación Base (MBS) al desplegar 100 femtoceldas e implementando cada uno de los mecanismos de coordinación de interferencia anteriormente presentados.

En los diagramas de la figura 3.4, se observa que los niveles de SINR mejoran al implementar los mecanismos de coordinación, como se puede notar en los histogramas se pasa de un valor de SINR negativo a un valor de cero cuando se implementan los modelos de Control Ideal de Potencia (IPC) y cambio de frecuencia, mientras que para el modelo de control híbrido se cuenta con un valor de SINR positivo.



(a)



(b)

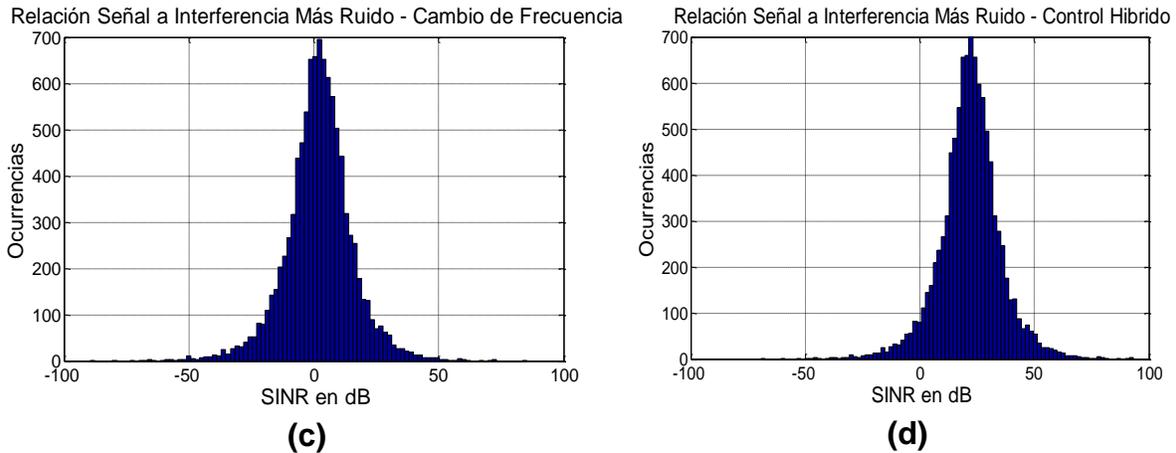


Figura 3.4 Relación Señal a Interferencia Más Ruido (SINR) para 100 FU

En La tabla 3.3 se puede ver que los valores del promedio y moda de la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) que percibe la Macro Estación Base (MBS), obtenida a partir del escenario de pruebas con 100 femtoceldas.

Relación Señal A Interferencia Más Ruido (SINR)	Promedio SINR(dB)	Moda (dB)
SINR Total Sin Mecanismo	-12.1582	-9.16
Control Ideal De Potencia	4.3736	4.03
Control De Cambio De Frecuencia	2.0735	2.37
Control Híbrido	21.9159	22.4

Tabla 3.3 Promedio de SINR y Moda para 100 Femto Usuarios

De la tabla 3.3 se observa un aumento progresivo de los valores de SINR en la Macro Estación Base (MBS) al aplicar los mecanismos de coordinación. Para ofrecer una buena Calidad de Servicio (QoS) en la Red Heterogénea (HetNet) se hace indispensable utilizar los mecanismos, ya que la SINR total es negativa lo que degrada el servicio ofrecido.

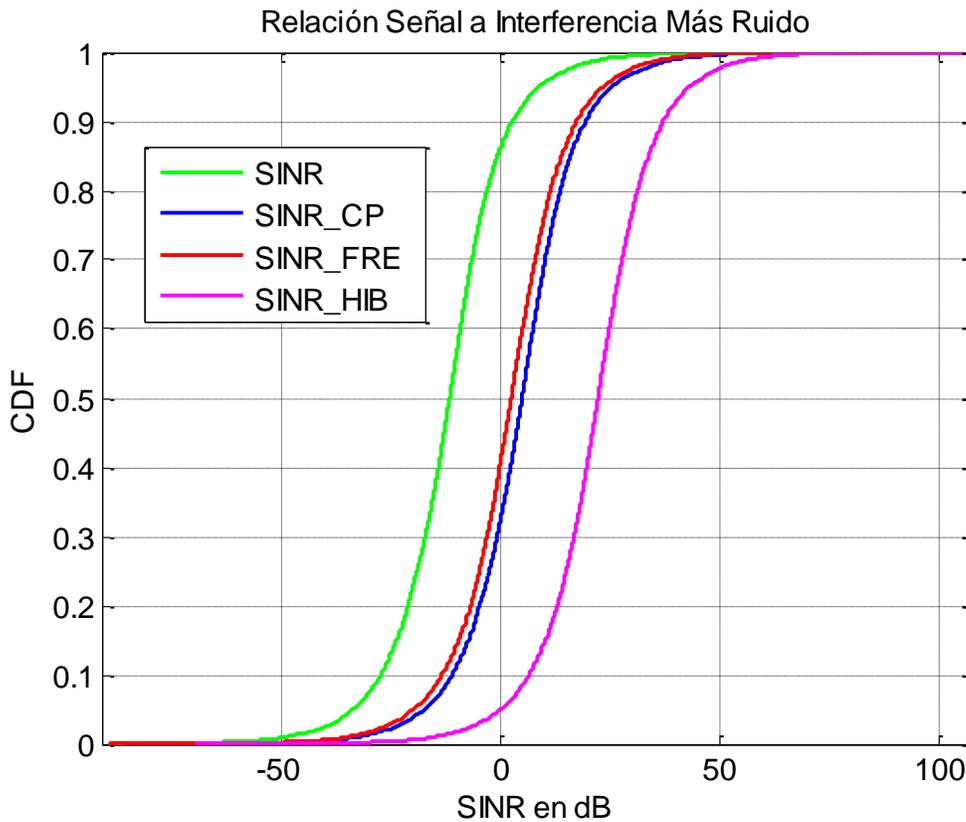


Figura 3.5 Función de Distribución Acumulativa (CDF) de la SINR para 100 FU

En la figura 3.5 se aprecia que la probabilidad de alcanzar una SINR mayor a cero sin contar con los mecanismos de coordinación es baja, lo que hace de la Red Heterogénea un sistema que no presta una buena Calidad de Servicio (QoS), caso contrario sucede con la curvas de SINR_HIB, SINR_CP y SINR_FRE, las cuales presentan una alta probabilidad de lograr valores SINR por encima de cero y ofreciendo un servicio eficiente en la red. El comportamiento presentado por las curvas de SINR_CP y SINR FRE es similar al momento de enfrentar la Interferencia Co-Canal (CCI)



Mecanismos	Probabilidad (SINR) < 0 dB
Sin Mecanismos	0.864
Control Ideal De Potencia	0.329
Control De Cambio De Frecuencia	0.414
Control Hibrido	0.0498

Tabla 3.4 Función de Distribución Acumulativa (CDF) para SINR con 100 FU

A medida que se implementan los mecanismos de coordinación la probabilidad de encontrar niveles de SINR por debajo de cero disminuye, como se muestra en la tabla 3.4. Para el escenario de 100 femtoceldas se presenta una reducción de 0.8142 la probabilidad que la SINR sea menor a cero, entre la no implementación de los mecanismos de coordinación y el modelo de control hibrido en el sistema. Los mecanismos de Control Ideal de Potencia (IPC) y el control de cambio de frecuencia proporcionan una buena probabilidad de prestar un servicio de calidad.



3.2 Escenario 2

Para las siguientes pruebas se realizó una modificación sobre el escenario, aumentando a 300 el número de femtoceldas, manteniendo las dimensiones y los requerimientos del anterior escenario de simulación.

Para el nuevo escenario se determina la Interferencia Co-Canal (CCI) y la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) que la Macro Estación Base (MBS) percibe.

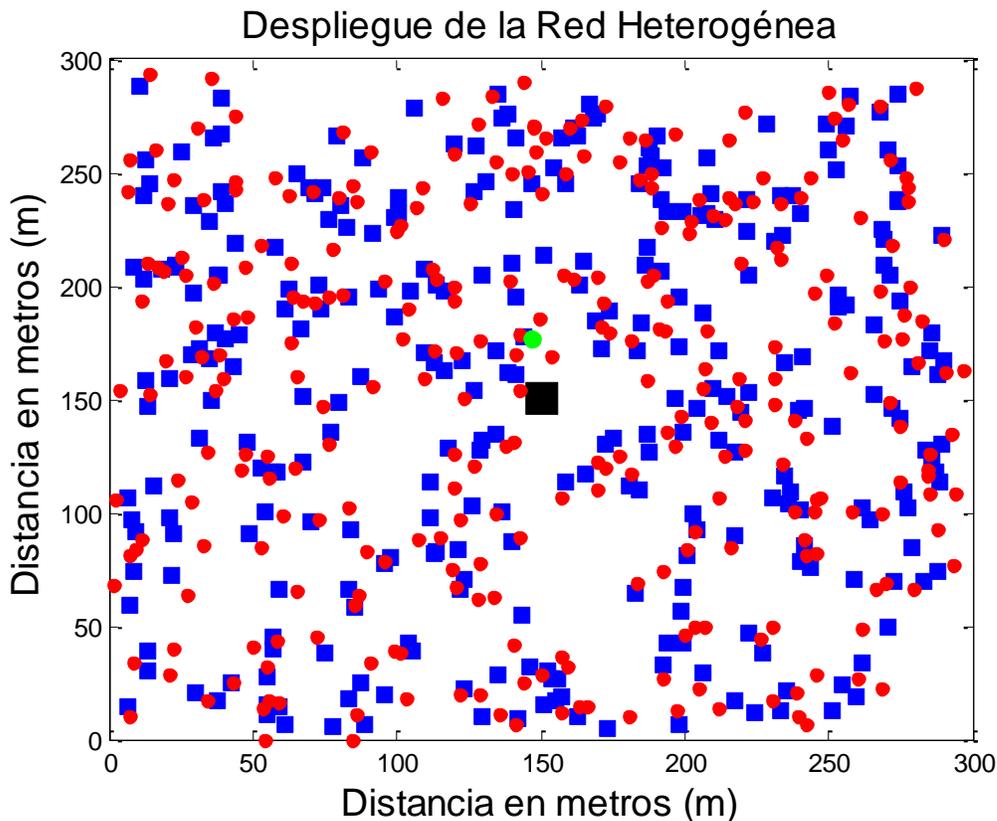


Figura 3.6 Escenario con 300 Femto Usuarios

La figura 3.6 muestra el resultado de distribuir 300 Femto Estaciones Base (FBS) en el escenario 2, el simulador realiza 10000 repeticiones para cada uno de los mecanismos que permiten la coordinación de la interferencia.

En la figura 3.7 se puede observar que la Interferencia Co-Canal (CCI) percibida por la Macro Estación Base (MBS) tiende a desplazarse hacia la parte derecha con respecto a los resultados mostrados en la figura 3.2 ya que la CCI aumenta debido al incremento en el número de Femto Usuarios (FU) en el escenario.

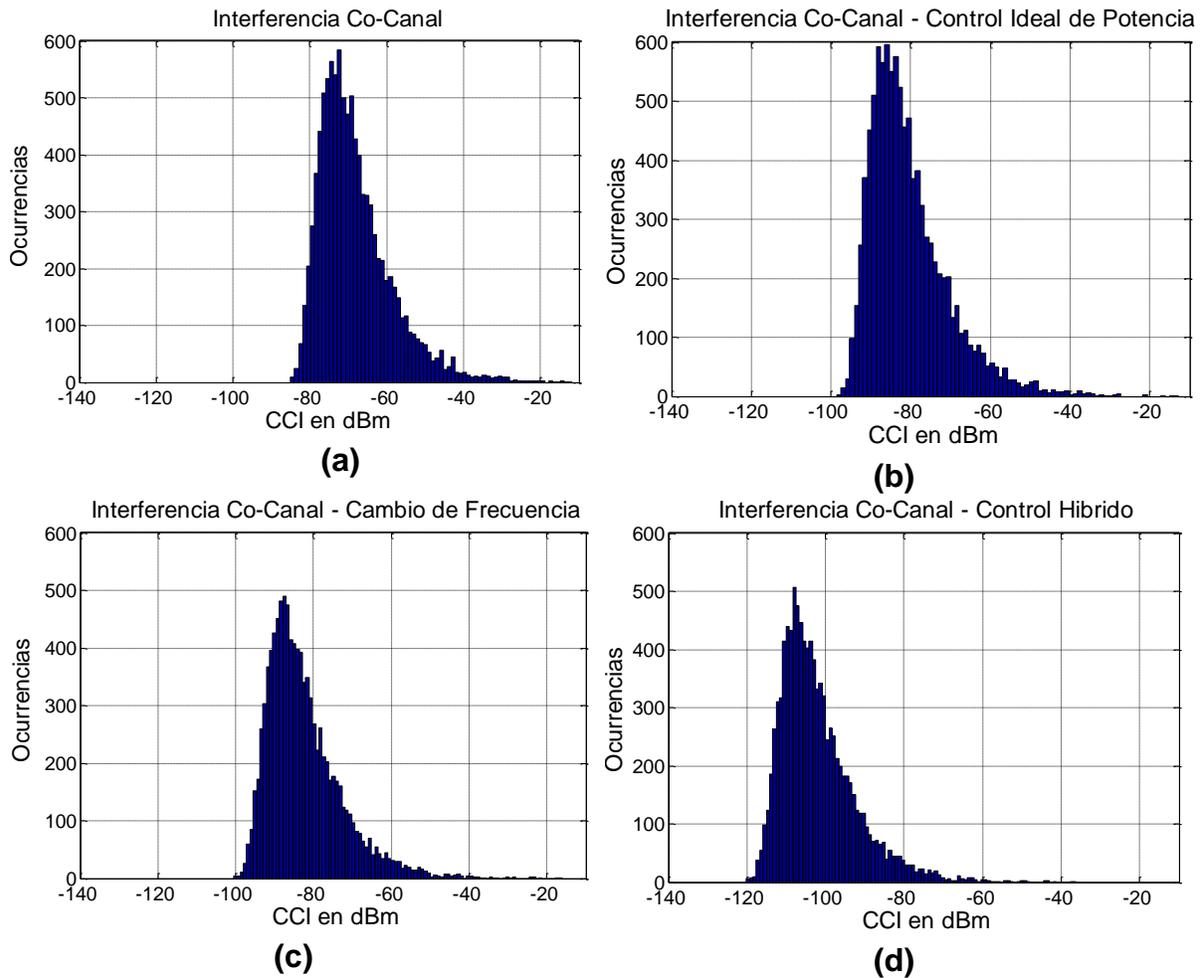


Figura 3.7 Interferencia Co-Canal (CCI) para 300 Femto Usuarios

Los diagramas de la figura 3.7 muestran que al usar los diferentes mecanismos de coordinación, la moda de la Interferencia Co-Canal (CCI) que percibe la Macro Estación Base (MBS) con 300 femtoceldas desplegadas se reduce.

La tabla 3.5 presenta el valor promedio de la Interferencia Co-Canal (CCI) que percibe la Macro Estación Base (MBS), también el valor que más se repite en el escenario 2 con 300 femtoceldas en los diferentes casos donde se utiliza o no los mecanismos de coordinación de interferencia.



Interferencia Co-Canal (CCI)	Promedio CCI (dBm)	Moda (dBm)
Interferencia Total Sin Mecanismo	-68.1633	-72.3
Control Ideal De Potencia	-80.4076	-85.9
Control De Cambio De Frecuencia	-82.443	-87.5
Control Hibrido	-101.995	-108

Tabla 3.5 Promedio de CCI y Moda para 300 Femto Usuarios

De la tabla 3.5 se aprecia que la moda y el promedio de la interferencia en la Macro Estación Base (MBS) disminuyen a medida que se utilizan los mecanismos de coordinación. Con relación a los datos adquiridos en el primer escenario, el modelo de control hibrido continua teniendo mejor promedio y moda de la interferencia en la Red Heterogénea (HetNet). El comportamiento de los modelos de Control Ideal de Potencia (IPC) y control de cambio de frecuencia es similar, pero en este escenario el que obtuvo mejor desempeño fue el modelo de cambio de frecuencia, debido a que el número de Femto Usuarios (FU) que realizaron un cambio de frecuencia arrojaron mejores resultados que cuando se aplicó el modelo de Control Ideal de Potencia (IPC) a los usuarios de la Red Heterogénea (HetNet).

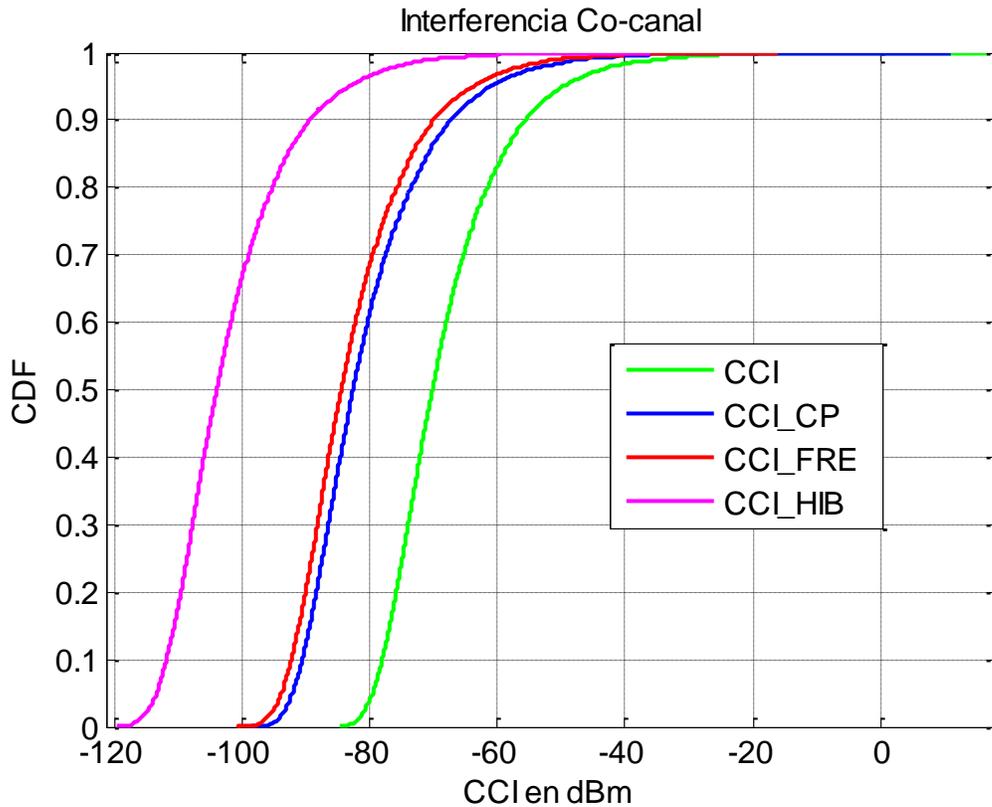


Figura 3.8 Función de Distribución Acumulativa (CDF) de la CCI para 300 FU

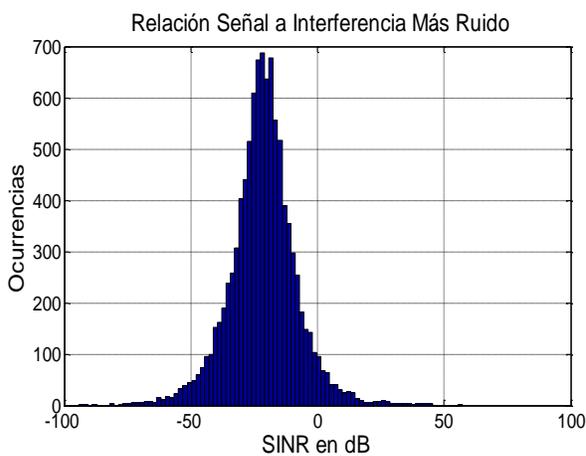
Las curvas de CDF presentadas en la figura 3.8 muestran que la probabilidad de lograr una interferencia menor a -80 dBm sin emplear los mecanismos de coordinación es muy baja y de probabilidad cero para alcanzar una CCI de -100 dBm, esta misma probabilidad la tienen los mecanismos de Control Ideal de Potencia (IPC) y cambio de frecuencia para lograr una CCI de -100 dBm, lo que indica que la interferencia para 300 femtoceldas se hace difícil de controlar con estos dos mecanismos, perjudicando notoriamente los servicios prestados por la red. El comportamiento del modelo de control híbrido sigue siendo estable en comparación con los resultados calculados en el primer escenario.



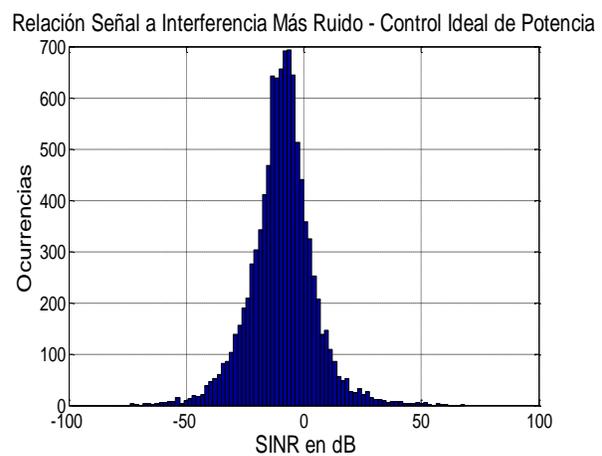
Mecanismos	Probabilidad (CCI) < -80 dBm	Probabilidad (CCI) < -100 dBm (%)
Sin Mecanismo	0.419	0
Control Ideal De Potencia	0.616	0
Control De Cambio De Frecuencia	0.688	0.002
Control Híbrido	0.965	0.672

Tabla 3.6 Función de Distribución Acumulativa (CDF) para CCI con 300 FU

Los valores mostrados en la tabla 3.6 muestran que para conseguir niveles de CCI menores a -80 dBm, los mecanismos de coordinación presentan una buena probabilidad para alcanzar dicho objetivo, también se nota la robustez que tiene el mecanismo de control híbrido con respecto a los otros mecanismos, debido a que el modelo de control híbrido presenta una probabilidad de alcanzar niveles de interferencia menores a -100 dBm de 0.672 y los otros dos mecanismos tienen probabilidad 0, lo que muestra la superioridad del mecanismo de control híbrido al tener 300 femtoceldas desplegadas.



(a)



(b)

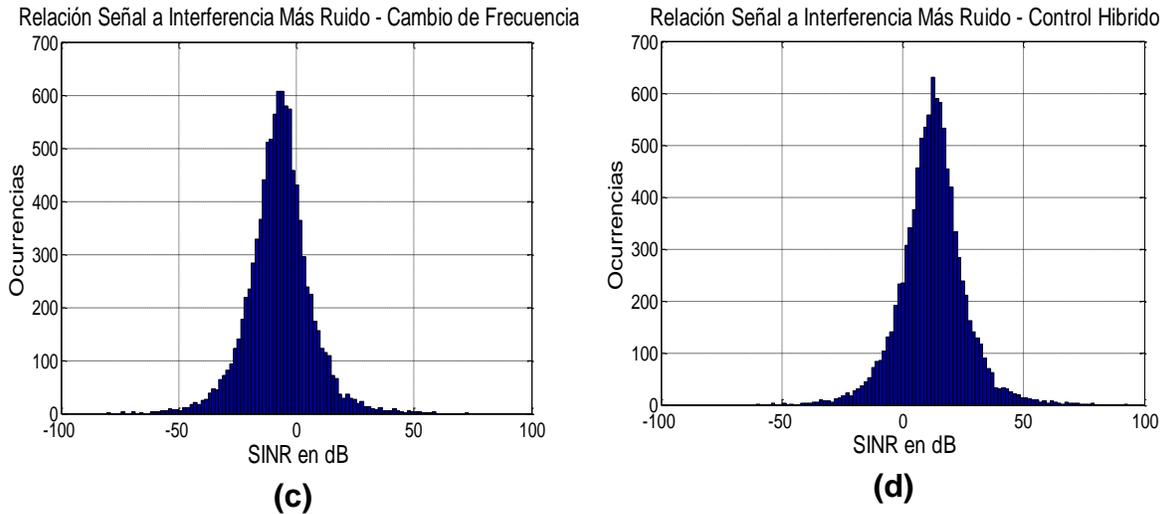


Figura 3.9 Relación Señal a Interferencia Más Ruido (SINR) para 300 FU

Los niveles de la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) en la Red Heterogénea (HetNet) con 300 femtoceldas, mejoran al implementar los mecanismos de coordinación como se muestra en los diagramas de la figura 3.9. Al comparar los histogramas de la figura anterior con los de la figura 3.4 se evidencia un corrimiento de la moda hacia la izquierda, lo que significa la disminución de la SINR en el sistema debido a que hay un incremento de 200 usuarios con respecto al anterior escenario.

Los histogramas de Control Ideal de Potencia (IPC) y cambio de frecuencia obtienen valores de moda de la SINR menores a cero, indicando que para 300 femtoceldas los dos modelos no proporcionan una buena Calidad de servicio (QoS) para la red inalámbrica, debido a que no alcanzan la SINR objetivo, por otra parte el modelo de control híbrido si presenta niveles mayores a la SINR objetivo.

Relación Señal A Interferencia Más Ruido (SINR)	Promedio SINR(dB)	Moda (dB)
SINR Total Sin Mecanismo	-21.5012	-21.6
Control Ideal de Potencia	-9.2569	-6.19
Control de Cambio de Frecuencia	-7.2215	-6.01
Control Híbrido	12.3304	12.5

Tabla 3.7 Promedio de SINR y Moda para 300 Femto Usuarios



La tabla 3.7 indica que para el escenario simulado con 300 femtoceldas, la SINR promedio y de la moda es negativa para los 3 primeros casos, se sigue presentando el mismo comportamiento del primer escenario, en donde la SINR de Control híbrido es superior y para este caso, siendo el único mecanismo que obtiene una SINR positiva.

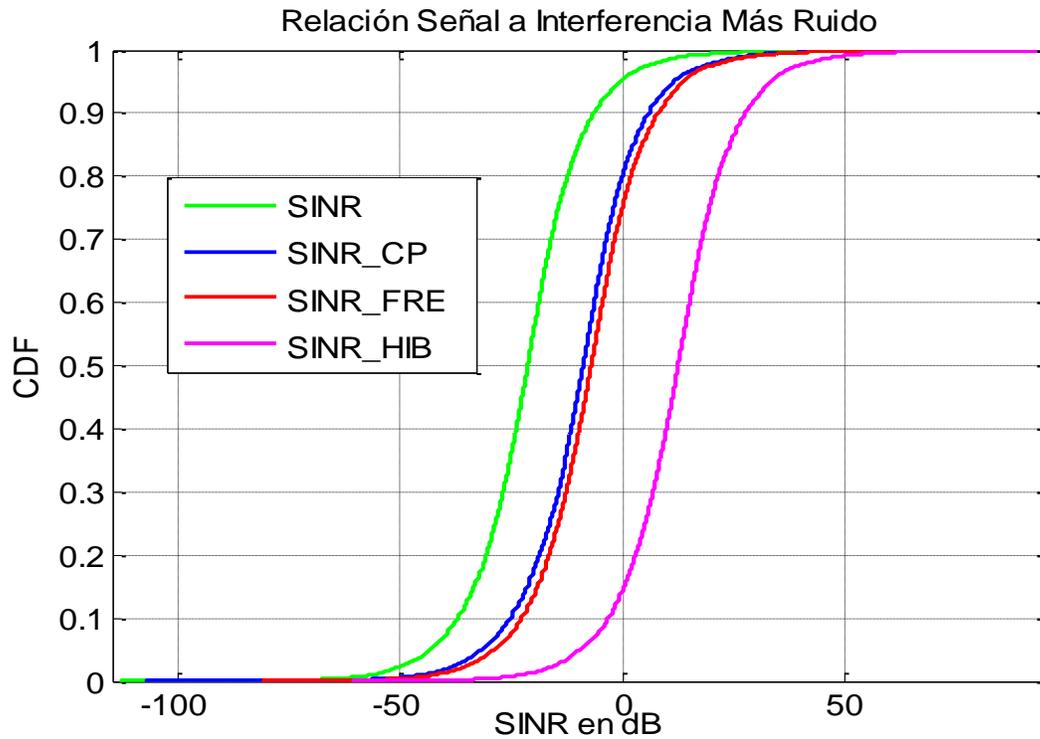


Figura 3.10 Función de Distribución Acumulativa (CDF) de la SINR para 300 FU

El comportamiento de las curvas de la CDF de la figura 3.10, indican que hay una alta probabilidad de conseguir valores de SINR menores a cero para los mecanismos de IPC, cambio de frecuencia y sin hacer uso de algún mecanismo, por lo cual no se cumple con la SINR objetivo y no se ofrece una buena Calidad de Servicio (QoS), por otro lado, el mecanismo de control híbrido presenta una alta probabilidad de prestar un buen servicio en la Red Heterogénea (HetNet).



Mecanismos	Probabilidad (SINR) < 0 dB
Sin Mecanismo	0.952
Control Ideal De Potencia	0.801
Control De Cambio De Frecuencia	0.752
Control Hibrido	0.143

Tabla 3.8 Función de Distribución Acumulativa (CDF) para SINR con 300 FU

La tabla anterior presenta los valores de SINR, se evidencia claramente la diferencia de las probabilidades del modelo de control híbrido frente a los demás mecanismos.

Según los datos mostrados en el segundo escenario, el modelo que presenta la mejor opción para mitigar la Interferencia Co-Canal (CCI) es el control híbrido basado en los resultados de tener una baja probabilidad de percibir en la Macro Estación Base (MBS) valores por debajo del valor SINR objetivo. Los mecanismos de Control Ideal de Potencia y cambio de frecuencia pierden su efectividad para el despliegue de 300 femtoceldas en la red, lo que asegura que al implementar estos mecanismos la Calidad del Servicio (QoS) no sea satisfactoria.



3.3 Escenario 3

Para el último escenario se aumentó a 500 Femto Estaciones Base (FBS) desplegadas, manteniendo las dimensiones y los requerimientos de los anteriores escenarios de simulación.

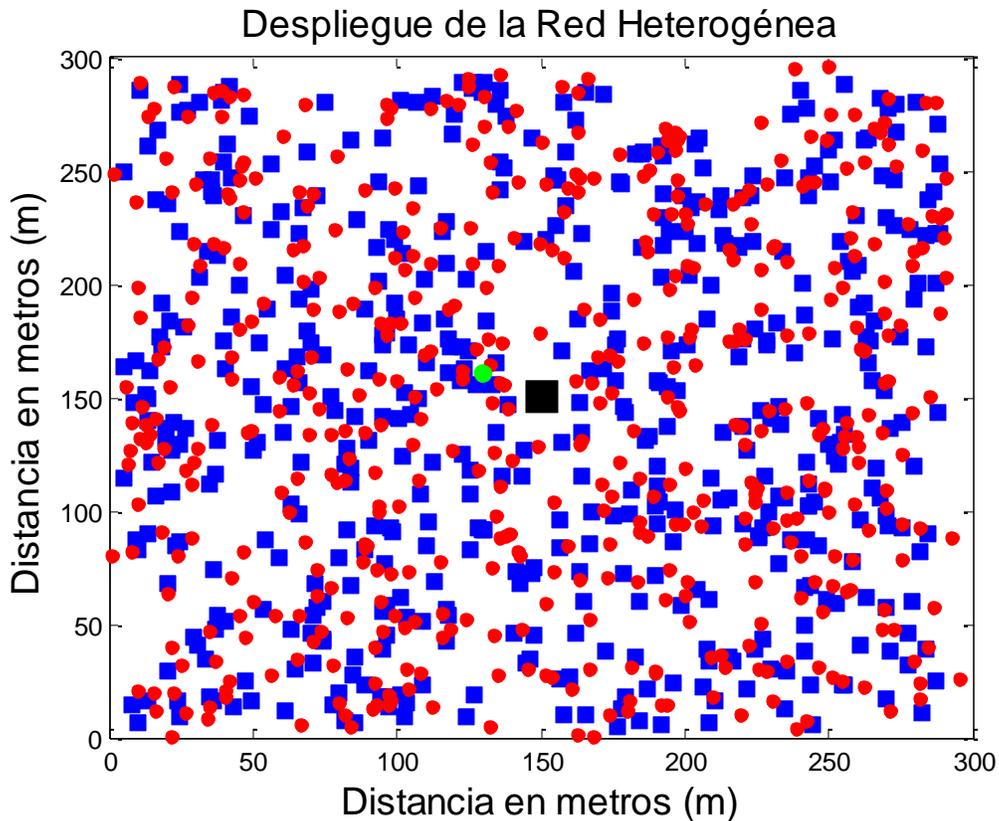


Figura 3.11 Escenario con 500 Femto Usuarios

En la figura 3.11 distribuyó 500 Femto Estaciones Base (FBS) en el escenario 3, el simulador realiza 10000 repeticiones para cada uno de los mecanismos que permiten la coordinación de la interferencia.

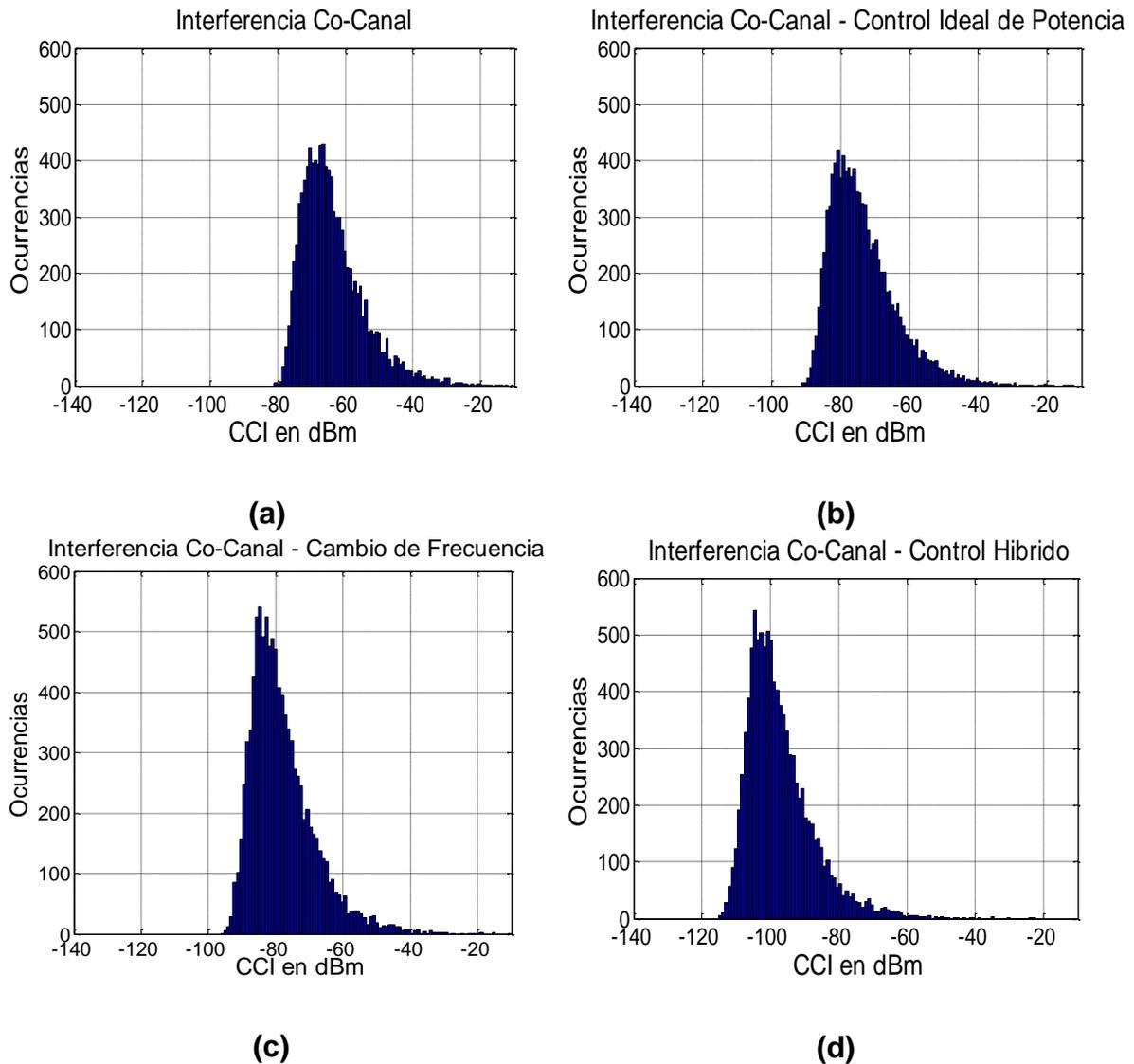


Figura 3.12 Interferencia Co-Canal (CCI) para 500 Femto Usuarios

Los diagramas de la figura 3.12, corroboran los resultados que se han mostrados en los escenarios 1 y 2, en donde la Interferencia Co-Canal (CCI) disminuye a partir de la implementación de los mecanismos de coordinación. Esta reducción de la interferencia se muestra a partir del corrimiento de los histogramas hacia la parte izquierda, donde el que obtiene menores valores de CCI es el mecanismo de control híbrido, también los histogramas muestran un aumento en los niveles de CCI con respecto a los anteriores escenarios.

La tabla 3.9 presenta el promedio de la Interferencia Co-Canal (CCI) percibida por la Macro Estación Base (MBS) y la moda alcanzada en el escenario con 500 femtoceldas.



Interferencia Co-Canal (CCI)	Promedio CCI (dBm)	Moda (dBm)
Interferencia Total Sin Mecanismo	-63.6598	-66.5
Control Ideal De Potencia	-73.3819	-80.7
Control De Cambio De Frecuencia	-77.8830	-84.7
Control Hibrido	-97.1120	-104

Tabla 3.9 Promedio de CCI y Moda para 500 Femto Usuarios

De igual manera, comparando los promedios de Interferencia Co-Canal (CCI) para los diferentes casos se evidencia la reducción de la CCI. Aunque los niveles de CCI son los más altos debido al gran número femtoceldas desplegadas en la red.

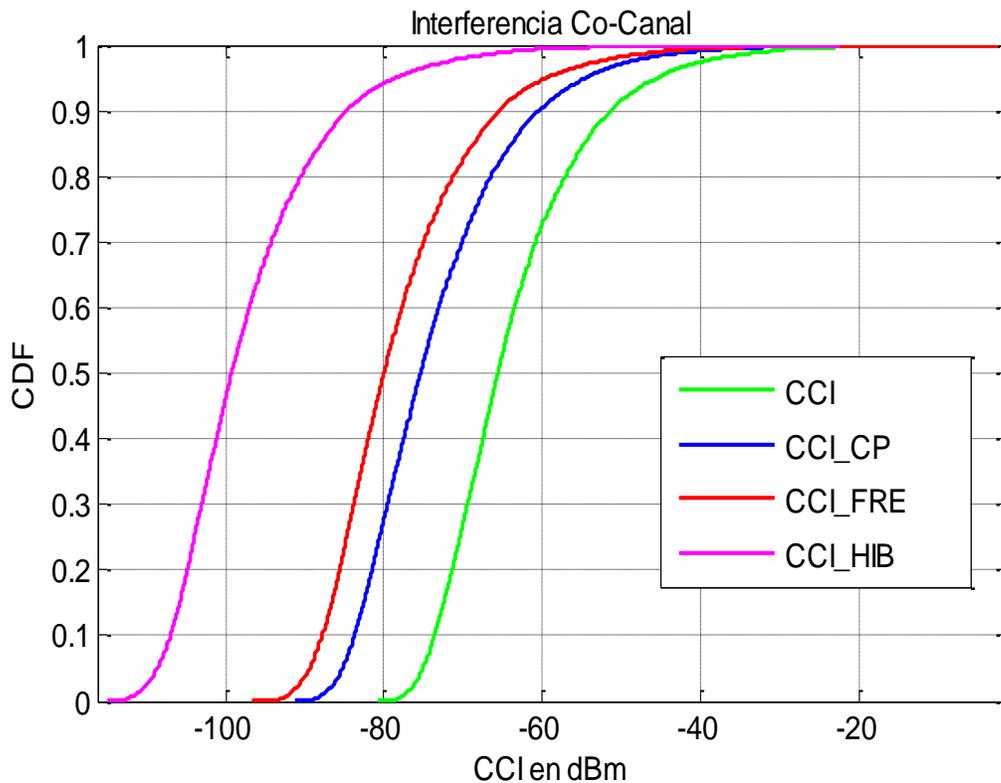


Figura 3.13 Función de Distribución Acumulativa (CDF) de la CCI para 500 FU

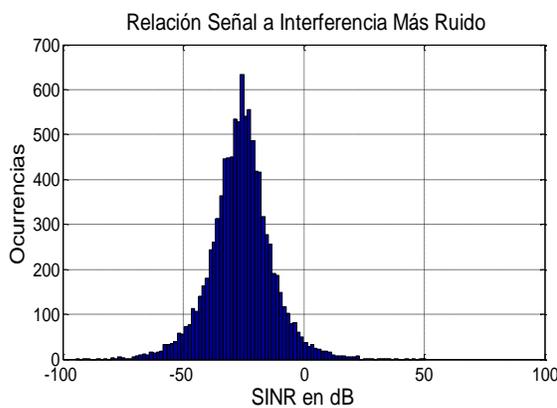


Partiendo de los valores de referencia de CCI de los escenarios anteriores (-80 dBm y -100 dBm), las curvas de CCI_CP y CCI_FRE no alcanzan los -100 dBm, indicando que los mecanismos son insuficientes para mitigar de una manera efectiva la interferencia en este escenario de pruebas, por otro lado la curva de CCI_HIB si obtiene un desempeño estable entre estos dos valores de referencia, lo que evidencia que el uso de este mecanismo mitiga en mejor proporción los efectos de la interferencia.

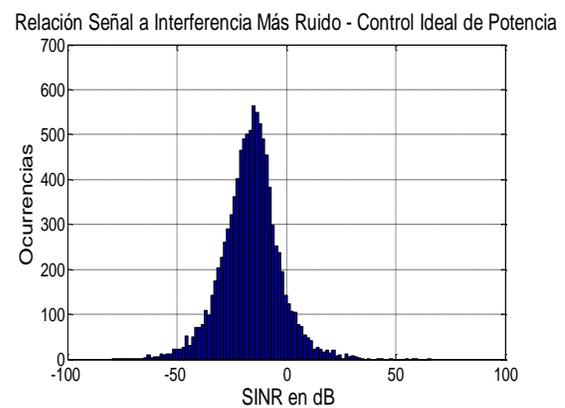
Mecanismos	Probabilidad (CCI) < -80 dBm	Probabilidad (CCI) < -100 dBm
Sin Mecanismo	0.008	0
Control Ideal De Potencia	0.277	0
Control De Cambio De Frecuencia	0.501	0
Control Hibrido	0.941	0.463

Tabla 3.10 Función de Distribución Acumulativa (CDF) para CCI con 300 FU

La tabla 3.10 muestra la probabilidad que tienen los diferentes mecanismos para lograr que la CCI sea menor o igual a los valores específicos de -80 dBm y -100 dBm, se observa que para este escenario el mecanismo de cambio de frecuencia tiene mejor desempeño que el Control Ideal de Potencia (IPC) para lograr niveles menores a -80dBm, aunque los dos tienen probabilidad cero para el siguiente valor de referencia.



(a)



(b)

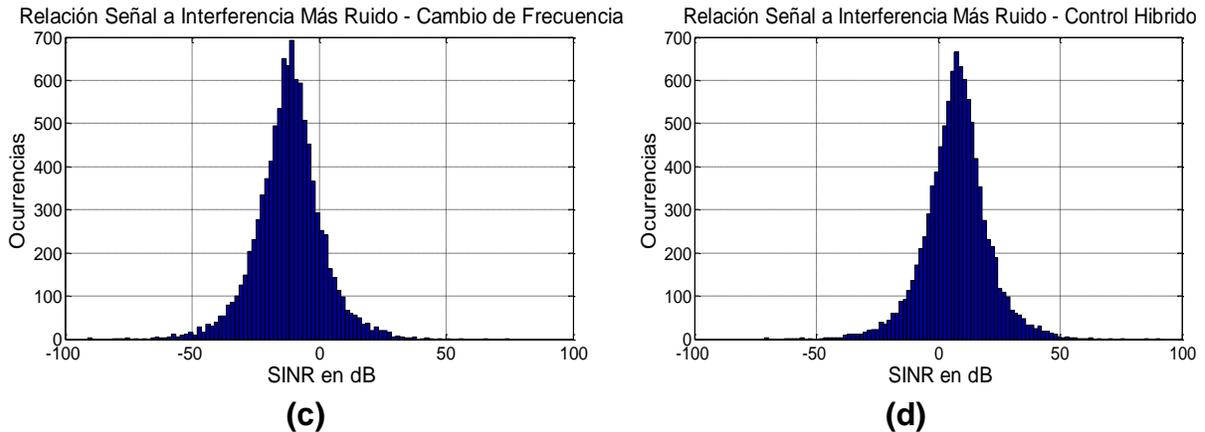


Figura 3.14 Relación Señal a Interferencia Más Ruido (SINR) para 500 FU

Los histogramas de la figura 3.14 confirman que el modelo de control híbrido presenta el mejor desempeño en la red con 500 femtoceldas desplegadas y el comportamiento de los otros mecanismos es similar, aunque insuficientes para cumplir con una buena Calidad de Servicio (QoS).

Relación Señal A Interferencia Más Ruido (SINR)	Promedio SINR (dB)	Moda (dB)
SINR Total Sin Mecanismo	-26.0457	-25.5
Control Ideal De Potencia	-16.3236	-14.9
Control De Cambio De Frecuencia	-11.8225	-10.6
Control Híbrido	7.4047	7.49

Tabla 3.11 Promedio de SINR y Moda para 500 Femto Usuarios

La tabla 3.11 indica los niveles de SINR de promedio y moda para 500 femtoceldas desplegadas, esta indica que así se implementen los dos primeros mecanismos de coordinación la SINR sigue por debajo del objetivo requerido, haciendo difícil poder ofrecer una buena Calidad de Servicio (QoS).

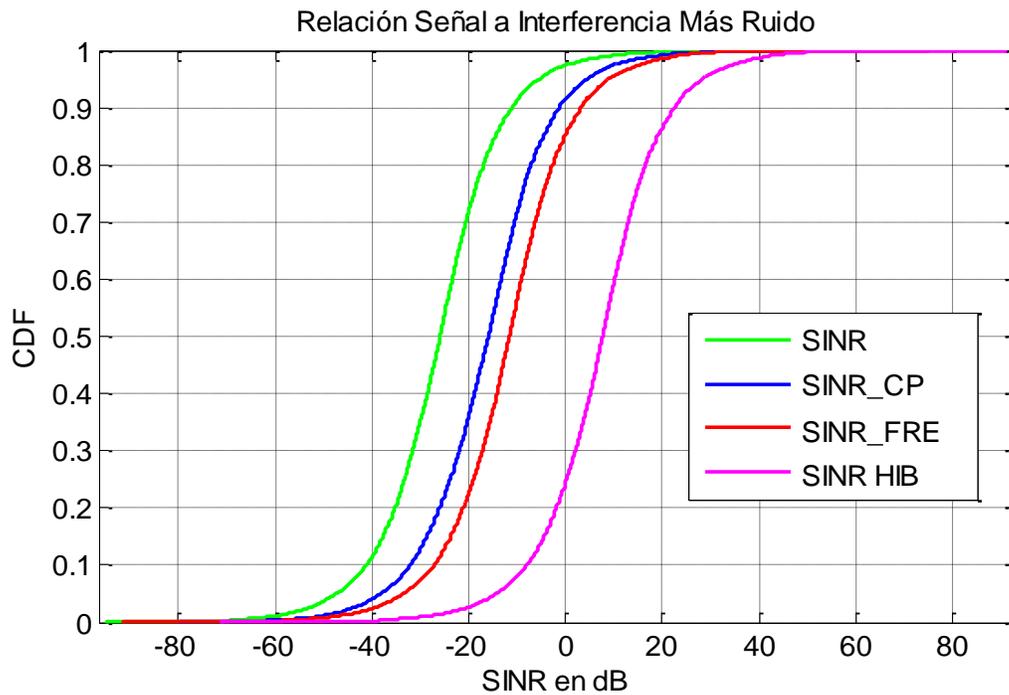


Figura 3.15 Función de Distribución Acumulativa (CDF) de la SINR de 500 FU

Mecanismos	Probabilidad (SINR) < 0 dB
Sin Mecanismo	0.973
Control Ideal De Potencia	0.913
Control De Cambio De Frecuencia	0.852
Control Hibrido	0.243

Tabla 3.12 Función de Distribución Acumulativa (CDF) para SINR con 500 FU

Como en los demás escenarios mostrados, la figura 3.15 y la tabla 3.12 confirman que los mecanismos de coordinación Control Ideal de Potencia (IPC) y Cambio de frecuencia, no tienen un desempeño deseable ya que su probabilidad es alta para brindar un mal servicio, caso contrario sucede con el mecanismo de control hibrido que a pesar de tener 500 femtoceldas sigue ofreciendo una aceptable probabilidad para cumplir con la SINR objetivo, así que la implementación de este mecanismo es necesaria para desplegar un gran número de femtoceldas.



3.4 Resumen

En las tablas 3.13 y 3.14 se presentan de manera general los resultados obtenidos a partir de las curvas de la Función de Distribución Acumulativa (CDF) de las pruebas realizadas en los escenarios de simulación, donde se nota de forma general el comportamiento de los diferentes mecanismos de coordinación en las Redes Heterogéneas (HetNet) a medida que se aumentan el número de femtoceldas.

Probabilidad de la Interferencia Co-Canal (CCI)					
CDF		Sin mecanismos de coordinación	Control Ideal de Potencia	Cambio de Frecuencia	Control Híbrido
-80 dBm	Escenario 1 (100 FU)	0.489	0.915	0.88	0.986
	Escenario 2 (300 FU)	0.419	0.616	0.68	0.965
	Escenario 3 (500 FU)	0.08	0.277	0.501	0.941
-100 dBm	Escenario 1 (FU 100)	0	0.304	0.185	0.887
	Escenario 2 (300 FU)	0	0	0.002	0.672
	Escenario 3 (FU 500)	0	0	0	0.463

Tabla 3.13 Resumen de Resultados para la Interferencia Co-Canal (CCI)



Probabilidad de la Relación Señal a Interferencia Más Ruido (SINR)				
CDF	Sin mecanismos de coordinación	Control Ideal de Potencia	Cambio de Frecuencia	Control Hibrido
Escenario 1 (100 FU)	0.864	0.329	0.414	0.49
Escenario 2 (300 FU)	0.952	0.801	0.752	0.143
Escenario 3 (500 FU)	0.973	0.913	0.852	0.243

Tabla 3.14 Resumen de Resultados de la SINR

La probabilidad de alcanzar niveles de CCI de referencia y cumplir con la SINR objetivo disminuye a medida que se aumentan los Femto Usuarios (FU) en la Red Heterogénea (HetNet), como se observa en las tablas 3.13 y 3.14. El modelo de control hibrido tiene un desempeño estable y obtiene los mejores resultados al momento de mitigar la Interferencia Co-Canal (CCI) para cada uno de los escenarios propuestos; los mecanismos de Control Ideal de Potencia (IPC) y cambio de frecuencia son una buena solución para combatir la interferencia, pero son insuficientes cuando se tiene el mayor número de usuarios en la Red Heterogénea (HetNet).





4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presenta las conclusiones y propuestas de trabajos futuros que puedan generarse a partir del desarrollo de este trabajo de grado.

4.1 Conclusiones

A partir del diseño y desarrollo del simulador básico a nivel de sistema para el análisis de la Interferencia Co-Canal en Redes Heterogéneas (HetNet) para el enlace de subida se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La implementación de diferentes mecanismos de coordinación de interferencia, permiten mejorar la Calidad de Servicio (QoS) del enlace entre un usuario y una Estación Base (BS), debido a la mitigación de la Interferencia Co-Canal (CCI) y el incremento de la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR).
- El modelo de control híbrido se presentó como la mejor alternativa para la mitigación de la interferencia, ya que reduce significativamente los niveles de Interferencia Co-Canal (CCI) y por consiguiente obtiene valores altos de SINR, pese al aumento del número de femtoceldas, a diferencia de los otros mecanismos de coordinación en la red heterogénea (HetNet).
- En una Red Heterogénea (HetNet) si no se utilizan mecanismos de coordinación de interferencia, la comunicación entre el Macro usuario (MU) y la Macro Estación Base (MBS) tendría una calidad baja o que llegara a no presentarse ningún tipo de comunicación, esto debido a que sin coordinación la interferencia presente en la red es demasiada alta disminuyendo en gran proporción la SINR.
- Al comparar los resultados obtenidos por el modelo de Control Ideal de Potencia (IPC) y el modelo de cambio de frecuencia, el modelo de Control Ideal de Potencia (IPC) presenta mejores niveles de interferencia para pocos usuarios, pero cuando en una Red Heterogénea (HetNet) se tienen un gran número de usuarios el modelo de cambio de frecuencia es el que presenta los mejores resultados.
- Los modelos de Control Ideal de Potencia (IPC) y cambio de frecuencia son una buena elección para mitigar la interferencia, si el número de



femtoceldas desplegadas esta alrededor de las 100, ya que al aumentar de manera significativa las Femto Estaciones Base (FBS), el desempeño de estos mecanismos no es el deseado para reducir la CCI y aumentar la SINR.

- La simulación a nivel de sistema permite analizar de una manera general el comportamiento de una red inalámbrica, debido a que se modelan varias características que a nivel de enlace no se tienen en cuenta, tales como la implementación de todos los recursos o el estado de las comunicaciones de todos los usuarios de la red heterogénea.
- La herramienta de simulación Matlab® permitió el desarrollo del simulador estático a nivel de sistema, ya que proporciona herramientas para la creación de interfaces gráficas, el código se puede desarrollar de una manera flexible aceptando con facilidad la inclusión de nuevos parámetros para la simulación del sistema.
- El simulador del presente trabajo de grado es de gran ayuda para realizar procesos de aprendizaje y enseñanza en áreas a fines con los sistemas de comunicación inalámbrica, debido a su fácil manejo y comprensión sirven para el desarrollo de trabajos futuros.

4.2 Trabajos Futuros

El presente trabajo de grado es de gran ayuda para realizar procesos de aprendizaje y enseñanza en áreas a fines con los sistemas de comunicación inalámbrica, para esto se plantean los siguientes trabajos futuros:

- Análisis de la Interferencia Co-Canal (CCI) en Redes Heterogéneas (HetNet) mediante la implementación de radio cognitivo.
- Diseño de un simulador básico a nivel de sistema que permita el análisis en capacidad y cobertura de una Red Heterogénea (HetNet).
- Análisis de interferencia en Redes Heterogéneas (HetNet) para LTE.
- Evaluación del impacto de un algoritmo de control de potencia en la capacidad de una red heterogénea (HetNet).



REFERENCIAS

- [1] R. Parkway, "High-Capacity Indoor Wireless Solutions: Picocell or Femtocell". Fujitsu Network Communications Inc, 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.fujitsu.com/downloads/TEL/fnc/whitepapers/High-Capacity-Indoor-Wireless.pdf>. [Último acceso: Marzo 2014].
- [2] Nasir Kafai. "It is a Picocell or a Femtocell". Ubee Airwalk. Agosto de 2011. [En línea]. Disponible en : <http://www.ubeeairwalk.com/2011/08/is-it-a-picocell-or-a-femtocell/> [Último acceso: Marzo de 2014].
- [3] L. Wang, G. Stuber, C. Lea, "Architecture Design, Frequency Planning, and Performance Analysis for a Microcell/Macrocell Overlaying System", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 46, No. 4, Noviembre 1997.
- [4] 3GPP, ETSI, "TR 143.030 - Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio network planning aspects ", versión 11.0.0 Release 11, pp. 9-10, Oct. 2012.
- [5] 3GPP, ETSI, "TR 136.931 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) requirements for LTE Pico Node B", versión 11.0.0 Release 11, pp. 5-7, Oct. 2012.
- [6] M. Deruyck, W. Vereecken, W. Joseph, B. Lannoo, M. Pickavet, and L. Martens, "Reducing the Power Consumption in Wireless Access Networks: Overview and Recommendations", Progress In Electromagnetics Research, Vol. 132, 255-274, Universidad de Ghent, Bélgica, 2012.
- [7] 3GPP, ETSI, "TR 125.951 - Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); FDD Base Station (BS) classification ", versión 11.0.0 Release 11, pp. 7-11, Oct. 2012.
- [8] Ernesto Apú Picado, "Análisis de las tecnologías de Redes Heterogéneas (HetNet) en los sistemas móviles Estudio caso: Tecnologías lightRadio™", Universidad de Costa Rica, Julio del 2012.
- [9] V. Buenestado, J. M. Ruíz Avilés, M. Toril, S. Luna Ramírez, "Optimización de Parámetros de Traspaso en Femtoceldas Corporativas LTE", Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. ETSI Telecomunicación. Universidad de Málaga.
- [10] G. Heredia, C. Merino, J. Sánchez, M. García, J. I. Alonso, "Evaluación de Algoritmos de Localización en Redes de Femtoceldas Autogestionadas (SON)", Universidad Politécnica de Madrid, Madrid



- [11] M. de Paz , "Femtoceldas de UMTS", Departamento de Tecnología Electrónica y Comunicaciones, Universidad Autónoma de Madrid , Marzo de 2012
- [12] C.J .Corrales , "Diseño de redes utilizando la tecnología de las femtoceldas en la telefonía móvil", Escuela Politécnica Nacional, Quito , Marzo de 2011
- [13] M.Morales, "Gestión de Interferencias en Sistemas Femtocelda", Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones .Universidad Carlos III de Madrid, Octubre.2010.
- [14] G.de la Roche, A. Valcarce, D.López, J. Zhang , "Access Control Mechanisms for Femtocells", IEEE Communications Magazine , Julio. 2009.
- [15] Small Cell Forum, "Small Cell Market Status", Informa Telecoms & Media, pp. 5, Febrero 2013
- [16] H.J.B. Hans, M. Hiroyuki, "The Smartphone Challenge is Surmountable", Ericsson Corporate Public, vol. 2, Dec. 2011.
- [17] S. Landstrom, A. Furuskar, K.Johansson, L. Falconetti ,F. kroneStedt, "Heterogeneous networks increasing cellular capacity", Ericsson Review, 2011
- [18] M.Noordman, "El rol de las pequeñas celdas en las Redes Heterogéneas", Ericsson Latin America y Caribbean, Julio de 2012
- [19] O'Reilly y Media, 2013, [En línea], chimera.labs.oreilly.com/books/123000000545/ch07.html#_real_world_3g_4g_and_wifi_performance , [Último acceso: Marzo 2014]
- [20] A.Galvis, "Acceso Dinámico al Espectro: Estado Actual , tendencias y retos", Universidad Católica Popular de Risaralda, pp 38-57, Diciembre de 2008
- [21] L. Luo , S.Roy, "Analysis of Dynamic Spectrum Access with Heterogeneous Networks: Benefits of Channel Packing Scheme " Dept. of Electrical Engineering , University of Washington.
- [22] Casadomo, Febrero de 2011, [En línea], www.casadomo.com/articulos/femtoceldas-de-alcatel-lucent, [Último acceso: Marzo 2014]
- [23] NEC, Nipon Electrical Company, "Nec on Heterogeneous Network", [En línea]. Disponible en http://www.nec.com/en/global/solutions/nsp/lte_sc/hetnet.html. [Último acceso: Marzo 2014].
- [24] F. Khan, "LTE for 4G Mobile Broadband", Ed. Cambridge University Press, 2009, ch 16.



- [25] 4G Americas, "4G Mobile Broadband Evolution 3GPP Release 10 and Beyond", pp. 59-85, Jan. 2012.
- [26] 4G Americas, "Mobile Broadband Explosion", The 3gpp Wireless Evolution, pp. 117-123, Aug. 2013. (redes heterogeneas)
- [27] Simonsson, et al., "LTE Uplink CoMP Trial in a HetNet Deployment", *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 IEEE*, vol., no., pp.1,5, 3-6 Sept. 2012
- [28] "4G LTE CoMP, Coordinated Multipoint Tutorial", www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/lte-long-term-evolution/4g-lteadvanced-comp-coordinated-multipoint.php, sitio web visitado el 10/03/2014.
- [29] B. Fernandez, L. Gonzales, "Análisis de interferencia en LTE con reuso de frecuencia fraccional", tesis de pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia 2014.
- [30] J. Valdés, M. Martínez, "Análisis de interferencia co-canal en redes heterogéneas", tesis de pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia 2013.
- [31] P. Ökvist, et al. "LTE HetNet Trial - Range Expansion Including Micro/Pico Indoor Coverage Survey," *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 IEEE*, vol., no., pp.1,5, 3-6 6 Sept. 2012.
- [32] "Self Organising Networks, SON", www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/self-organising-networks-son/basics-tutorial.php, sitio web visitado el 28/03/2014.
- [33] J. E. Hakegard, et al., "Power control in HetNets and cognitive networks," *2012 International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, vol., no., pp.568, 573, 2-5 Oct. 2012.
- [34] J. Aguilar, A. Navarro, "Radio cognitiva – Estado del arte", Universidad ICESI, Revista Sistemas y telematica. Vol.9, Feb. 2011.
- [35] V. Mirama, "Control de Potencia Basado en Teoría de Juegos", Tesis de Maestría, Universidad del Cauca, Popayán 2012.
- [36] R. Pressman, "Ingeniería del software, un enfoque práctico", Quinta edición, Mc Graw Hill, 2002.



-
- [37] ETSI, “ Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTs. Reporte Técnico, European Telecommunications Standards Institute (ETSI) 1998. Version 3.2.0
- [38] “MATLAB The Language of Technical Computing” www.mathworks.com/products/matlab sitio web visitado el 29/04/2014.
- [39] “SCILAB”, <http://www.scilab.org/> sitio web visitado el 29/04/2014.
- [40] P. Meyer, “Probabilidad y Aplicaciones Estadísticas”, Edición revisada, Departamento de Matemáticas, Washington State University, 1998.