

Interferencia co-canal en redes heterogéneas¹

Artículo de Investigación Científica - Fecha de recepción: 19 de mayo de 2013 - Fecha de aceptación: 2 de junio de 2013

Merly Martínez Magín

Estudiante de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad del Cauca. Popayán, Colombia. mrmartinez@unicauca.edu.co

Juan Valdés Domínguez

Estudiante de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad del Cauca. Popayán, Colombia. jdvaldes@unicauca.edu.co

Víctor Quintero Flórez

Ingeniero. Magíster en Electrónica y Telecomunicaciones. Profesor Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad del Cauca, Popayán. vflorez@unicauca.edu.co

Para citar este artículo / to reference this article:

M. Martínez, J. Valdés and V. Quintero, "Interferencia co-canal en redes heterogéneas". *INGE CUC*, vol. 9, no. 1, pp. 143-162, Jun, 2013.

RESUMEN

En el presente artículo se presentan los resultados obtenidos a partir de una simulación básica estática a nivel de sistema usando el método Montecarlo, mediante la cual se analizó la interferencia co-canal y el efecto de diferentes mecanismos de control de interferencia en una red heterogénea, caracterizada principalmente por la interacción de una macroestación base y pequeñas celdas denominadas femto estaciones base en un entorno microcelular urbano. Se muestra cómo los diferentes mecanismos de coordinación de interferencia incrementan el desempeño de la red, mitigan considerablemente la interferencia co-canal (CCI, Co-channel Interference) presente en el sistema y permiten el aumento de la relación señal a interferencia (SIR) percibida por el usuario, satisfaciendo los objetivos de calidad requeridos por cada uno de los usuarios que establecen una comunicación.

Palabras clave

Femto estación base, interferencia co-canal, red heterogénea, mecanismos de coordinación, relación señal a interferencia.

¹ El presente artículo es resultado de un trabajo de grado realizado para la Universidad del Cauca, en el Grupo de Investigación GRIAL.

*Co-channel interference in heterogeneous networks***ABSTRACT**

This article poses the results obtained from a basic static simulation in system level. Using the Montecarlo method, this simulation allowed analyzing the Co-channel interference and the effect of different interference coordination mechanisms in a heterogeneous network, which is characterized mainly by the interaction of a macro base station and femtocells, in an urban micro cellular environment. This paper shows how different interference coordination mechanisms improve the performance of networks by substantially diminishing co-channel interference, and increase the signal-to-interference ratio (SIR) perceived by the user, satisfying the quality objectives required by each of the users who establish a communication with the macro base station.

Keywords

Femtocells, Co-channel interference, Heterogeneous networks, Coordination mechanisms, Signal-to-interference ratio.

INTRODUCCIÓN

Históricamente, la arquitectura de red concebida para las diferentes tecnologías inalámbricas que han surgido a través del tiempo ha sido homogénea, diseñada e implementada para brindar servicio con cobertura y capacidad de manera uniforme, utilizando elementos de red con parámetros muy similares. Pero actualmente, y en particular con la evolución de los sistemas de comunicación móvil celular y debido a la imperiosa necesidad de cumplir con ciertos requerimientos de Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*), cobertura y capacidad, han obligado al uso de nuevas tecnologías y la evolución de la arquitectura de red móvil convencional, a una nueva idea de red denominada Redes Heterogéneas (HetNet, *Heterogeneous Networks*), la cual contempla la introducción de pequeñas celdas, y en particular Estaciones Base Mejoradas para Hogar (HeNB, *Home Enhanced Node B*), incrementando la capacidad, la cobertura y la calidad de una red móvil celular, dependiendo principalmente de la cantidad de pequeñas celdas introducidas y el nivel de interferencia presente en el sistema.

Sin embargo la interferencia generada por estaciones base de diferente clase limitan la capacidad, cobertura y calidad de servicio que puede ser alcanzada idealmente por la red. Por lo tanto, la interferencia se convierte en un factor crítico que se debe controlar de manera inteligente en una red heterogénea. Por esta razón, este artículo se enfoca en el análisis de la interferencia co-canal

(CCI), y cómo ella es afectada por diferentes mecanismos de control. El artículo está estructurado de la siguiente forma: Primero, presenta un marco teórico sobre redes heterogéneas y pequeñas celdas; a continuación presenta la metodología de simulación; luego se analizan los mecanismos de coordinación; posteriormente se muestran los resultados y análisis y, al final, las conclusiones.

REDES HETEROGÉNEAS Y PEQUEÑAS CELDAS

Con las redes heterogéneas se busca una solución coherente con el mercado y sus necesidades actuales y futuras por medio de la interacción e integración inteligente de múltiples tipos de nodos, capaces de brindar y mejorar la capacidad y cobertura inalámbrica en diferentes tipos de escenarios, definiendo una estructura jerárquica de niveles² tal como se muestra en la Fig. 1 [1], formada por diferentes tipos de celdas, desde el nivel macro, en donde se ubican las macroestaciones base hasta niveles inferiores en donde se encuentran las pequeñas celdas (*small cells*), compuestas por nodos de baja potencia como: micro, pico, femtoceldas y WiFi-APs, complementando y descargando a la macroestación base en escenarios donde la densidad de población es alta y por consiguiente el tráfico de datos es elevado, con ciertos requerimientos de desempeño y capacidad, a bajo costo y con baja complejidad.

Existen diferentes alternativas de uso de una red heterogénea, donde el usuario final puede utilizar los recursos ofrecidos por las pequeñas celdas integradas a la red de distintas maneras:

2 Niveles, término referente al número del tipo de celdas (macro, micro, pico y femto) desplegadas en determinada topología de red; por ejemplo, en una red puede haber 3 niveles, donde el primer nivel es macro, segundo micro y tercero femto, cada uno independiente del otro.

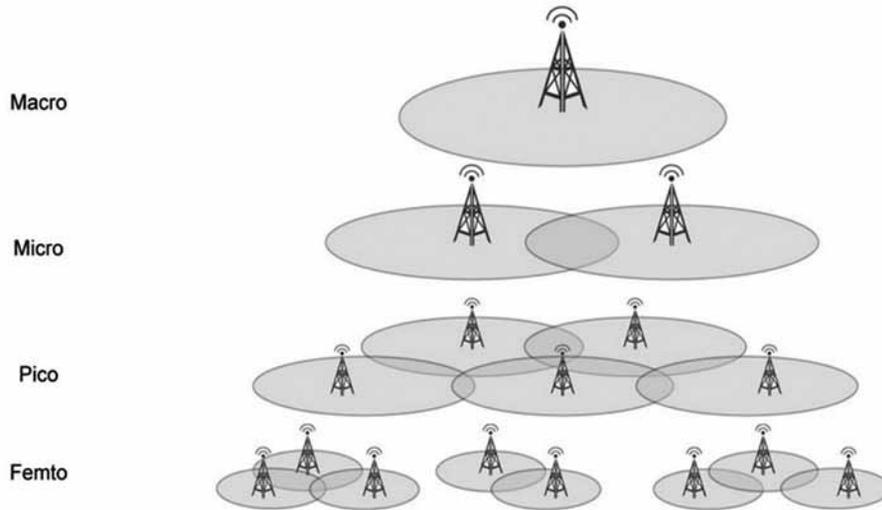


Fig. 1. Niveles de arquitectura de red [1]

- a. Impulsado por el dispositivo: Proceso transparente para el usuario final, donde el dispositivo de usuario está configurado para decidir qué red o nodo de servicio presenta las mejores características y condiciones, y de esta forma solicitar automáticamente el acceso a la pequeña celda.
- b. Impulsado por el usuario final: El usuario, conscientemente, debido a experiencias y conocimiento previo de la red, decide a qué red solicitar acceso y servicio. Debido a que el proceso es manual puede haber interrupción momentánea del servicio.
- c. Impulsado por el operador: Donde por medio de configuración del operador, la red automáticamente habilita y permite al usuario acceder continuamente (en tiempo real), a las pequeñas celdas que estén en acceso abierto, brindando las mejores condiciones y calidad que la red puede ofrecer.

La Fig. 2 presenta la arquitectura de una red heterogénea en una ciudad, en donde se han desplegado diferentes tipos de pequeñas celdas en diversos escenarios.

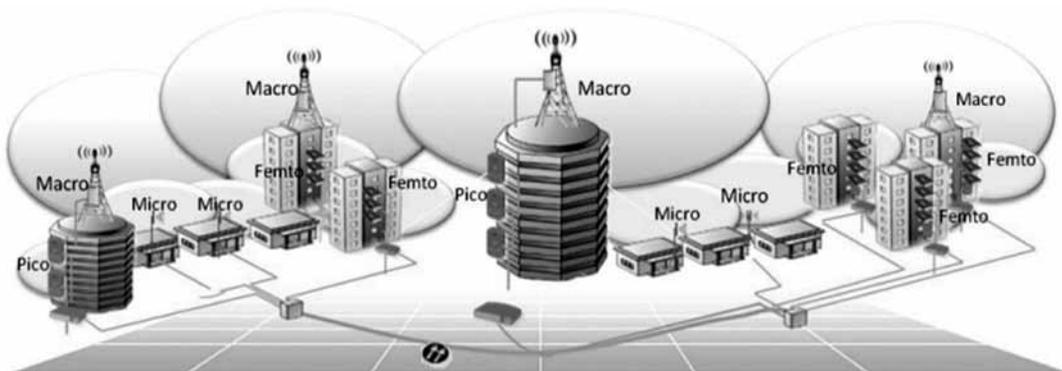


Fig. 2 Arquitectura de red heterogénea [2]

Femto estaciones base

Este tipo de pequeñas celdas han sido desarrolladas como Estaciones Base Mejoradas para Hogar (HeNB, *Home Enhanced Node B*), por el Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (3GPP, *3rd Generation Partnership Project*), de baja potencia, bajo costo y fácil integración y conexión, diseñadas para proporcionar cobertura y conexión a dispositivos móviles en escenarios de interiores, como lo son Pequeñas Oficinas y Oficinas de Casa (SOHO, *Small Office and Home Office*), y hogares de los usuarios, con lo que se beneficia tanto al usuario como al proveedor del servicio, disminuye el número de usuarios por antena y aumenta la proximidad de la misma al usuario final, mejorando las condiciones de canal y con ello la velocidad de transmisión de datos, la calidad de los servicios y la cobertura del sistema. Existen dos tipos de femto estación base: primero, la residencial, la cual tiene una potencia de transmisión de aproximadamente 20 mW (13 dBm), y proporciona un área de cobertura de alrededor de 10 metros, con capacidad de servir simultáneamente de 3 a 5 usuarios; segundo, la empresarial, la cual tiene una potencia de transmisión de aproximadamente 200 mW (23 dBm), y proporciona un área de cobertura de alrededor de 30 metros, con capacidad de servir de 8 a 16 usuarios.

Métodos de acceso a las femto estaciones base

- d. Acceso abierto: Todos los usuarios tienen autorización para acceder a la femto estación base siempre y cuando pertenezcan a la red de un operador determinado.
- e. Acceso cerrado: Solo usuarios pre-

viamente registrados en la femto estación base tienen autorización para acceder a la red de un operador determinado.

6. Acceso híbrido: Se integran los dos tipos de accesos anteriores (público y privado), autorizando en todo momento la conexión a la femto estación base a usuarios previamente registrados a esta, pero reservando una cantidad de recursos determinados para que los usuarios no registrados pertenecientes a la red móvil puedan acceder.

Beneficios de una femto estación base:

- Mejoramiento del servicio, capacidad y cobertura de una red.
- Reducción de recursos radio usados en el nivel macro.
- Reducción del número de usuarios atendidos por las estaciones base convencionales.
- Reducción del Costo de Operación y Mantenimiento (OPEX, *Operating Expenditures*) y Costo de Capital (CAPEX, *Capital Expenditures*) de la red.
- Mayor movilidad.
- Disminución de huella de carbono, la energía cautiva.
- Mayor calidad de servicios ofrecidos en ambientes interiores [3], [4].

METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Para obtener el modelo de simulación se empleó la metodología lineal secuencial (MLS), la cual sugiere una sucesión de

fases ordenadas y un encadenamiento entre ellas; en la elaboración de este estudio se empleó la herramienta Scilab®, en la cual se diseñó, implementó y se obtuvieron los resultados de simulación por medio del método de Montecarlo, en donde los procesos que componen la simulación estática a nivel de sistema tienen que ejecutarse cuantas veces sea necesario hasta obtener resultados válidos estadísticamente.

En el presente artículo se consideró que 10000³ ejecuciones son suficientes para obtener resultados válidos.

Modelo de simulación

El modelo de simulación se caracteriza por una arquitectura de red heterogénea de dos niveles: en el nivel superior conformada por una macroestación base y un macro-usuario (MU); en el nivel inferior por numerosas femto estaciones base, distribuidas de manera uniforme y cada una asociada a un femto-usuario (FU). Se considera que todas las femto estaciones base desplegadas se encuentran en comunicación activa, por lo tanto están generando interferencia al macro-usuario (MU), como se muestra en la Fig. 3.

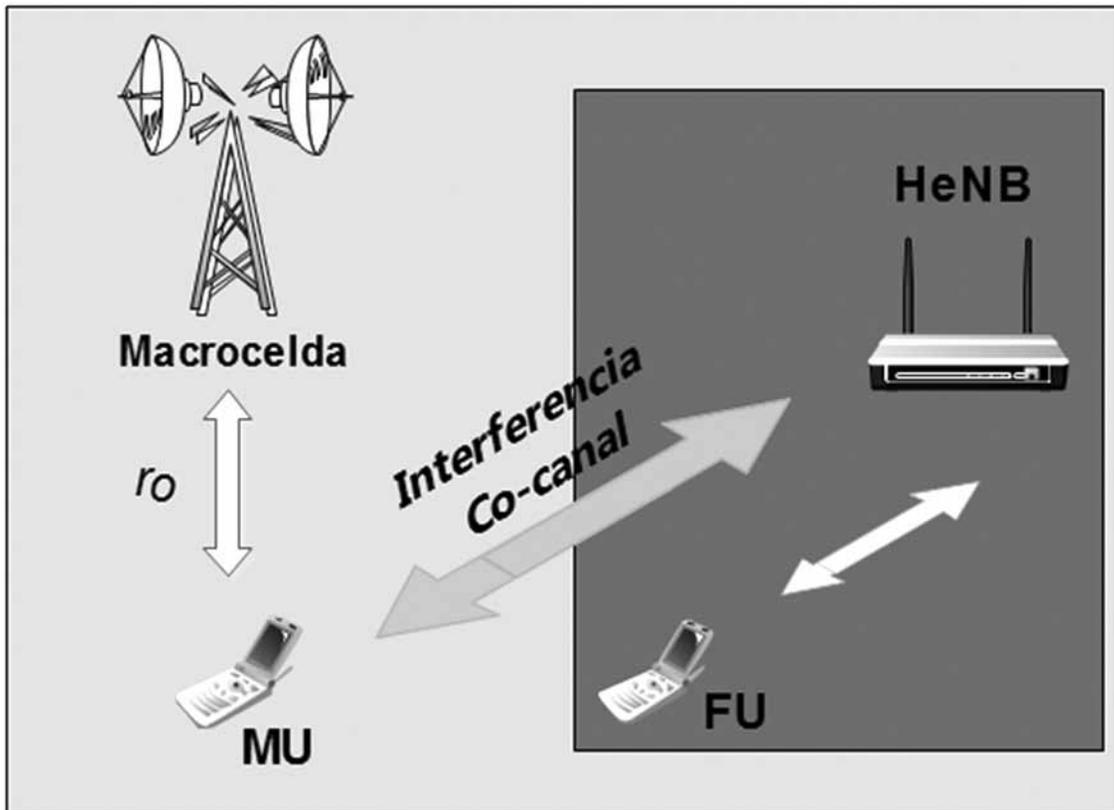


Fig. 3. Interferencia entre niveles

Fuente: Elaboración propia

3 Se realizaron diferentes pruebas hasta determinar, por ensayo y error, cuál era el número adecuado de ejecuciones, teniendo en cuenta el compromiso entre obtener resultados válidos estadísticamente y tiempo de simulación [5].

Para el análisis de interferencia se consideraron dos tipos de escenarios: primero, sin coordinación, en donde las femto estaciones base no emplean mecanismos de coordinación y actúan de manera independiente; y, por otro lado, el escenario coordinado donde cada femto estación base esta autoorganizada⁴, soportada por mecanismos de coordinación.

Consideraciones de simulación

Cada ejecución representa un sistema en un instante de tiempo específico (simulación estática, no hay evolución temporal), donde se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

1. Método de acceso de usuarios a la femto estación base

Se consideró que las femto estaciones base deben estar configuradas con acceso cerrado, como política de servicio; por lo tanto, solo atenderán a los femto-usuarios (FU) asociados a cada una de ellas.

2. Estrategia de gestión de espectro

Se empleó el método espectro compartido, permitiendo que tanto los nodos del nivel superior como los del nivel inferior de la red heterogénea utilicen el mismo rango de frecuencias en su operación.

3. Tipo de interferencia de estudio

El objeto de estudio del presente artículo es la interferencia co-canal generada entre niveles, en la cual todas las comunicaciones entre las femto

estaciones base y sus respectivos femto-usuarios (FU), interfieren al macro-usuario (MU) ya que operan en la misma frecuencia que la macro estación base.

Interferencia co-canal

La ecuación (1) permite calcular la potencia en vatios de la señal interferente percibida por el macro-usuario (MU) proveniente de cada una de las femto estaciones base en unidades lineales.

$$i_{r,i} = P_i * d_i^{-\alpha} * X_i \quad (1)$$

$d_i^{-\alpha}$, representa un modelo básico sencillo de propagación en función de la distancia y el exponente de propagación (α), el cual caracteriza las pérdidas de propagación que afectan la señal interferente desde cada una de las femto estaciones base hasta el macro-usuario (MU), convirtiéndose en una adaptación del modelo de pendiente única (no tiene en cuenta el valor de L_0 , el cual es la pérdida de propagación a una distancia de referencia) [6]; y X_i es una variable aleatoria que permite representar el desvanecimiento lento por medio de una distribución de probabilidad Log - Normal la cual depende de una media y desviación estándar representadas por μ y σ . Las ganancias de las antenas son de 0 dBi y no se considera ningún tipo de pérdidas adicionales.

La ecuación (2) presenta la interferencia co-canal total (CCI), percibida por el macro-usuario (MU), la cual es generada por todas las femto estaciones base desplegadas en el escenario, en unidades lineales.

4 Auto organizado: automatización de tareas como: planificación, configuración, administración, optimización y asignación de recursos radio de manera inteligente.

$$CCI = \sum i_{r,i} \quad (2)$$

Parámetros de simulación

1. El escenario de simulación tiene una dimensión de 200 metros de ancho por 200 metros de largo, con un área total de 40.000 metros cuadrados.
2. La macroestación base opera a una distancia igual a $r_0 = 10$ metros del macro-usuario.
3. Se encuentran 100 femto estaciones base distribuidas aleatoriamente en todo el escenario.
4. La distancia mínima (R_m) de las femto estaciones base con respecto al macro-usuario (MU) es igual a 1 metro.
5. Con respecto al modelo de propagación, debido a que el escenario de simulación es urbano, se asumió un exponente de propagación (α) igual a 3, el desvanecimiento lento o por sombra se modeló con una media (μ) igual a 0, y desviación estándar (σ) igual a 6 dB [7].
6. La potencia de transmisión de las femto estaciones base es igual a 10 mW (10 dBm) [8].
7. La potencia de transmisión de la macroestación base es igual a 100 mW (20 dBm).
8. Potencia umbral de coordinación⁵ igual a -40 dBm.

Procedimientos de coordinación

Se presentan ciertos procedimientos que permiten definir la acción y funcionamiento de los mecanismos de coordinación de interferencia.

1. Descubrimiento de usuario

El macro-usuario (MU) intencionalmente emite una señal de aviso (P_{Aviso}), con una potencia igual a 1 mW (0 dBm), con el objetivo de que las femto estaciones base que perciban tal señal con potencia por encima del valor umbral de coordinación (P_{umbral}), se auto organicen, y reduzcan la interferencia co-canal en el sistema. La ecuación (3) presenta la condición que debe llevarse a cabo en unidades lineales [9].

$$P_{Aviso} * d_i^{(-\alpha)} * X_i > P_{Umbral} \quad (3)$$

2. Regiones de coordinación

Con la ayuda del proceso anterior, y partiendo de que solo algunas femto estaciones base percibirán la señal de aviso emitida por el macro-usuario (MU), la región de cobertura de la red (Φ) se divide en dos regiones, las cuales se denominan regiones de coordinación, en donde cada una de estas es independiente y pueden aplicar diferentes mecanismos de coordinación de interferencia.

Las ecuaciones (4) y (5) presentan la forma matemática de la composición de cada región:

⁵ Valor de referencia de todas las femto estaciones base, donde si la potencia de la señal de aviso proveniente del macro-usuario (MU) es mayor, tendrán que aplicar algún mecanismo de coordinación.

$$\varphi_1 = \left\{ \text{FBS} \in \varphi \mid P_{\text{Aviso}} * d_i^{(-\infty)} * X_i > P_{\text{Umbral}} \right\} \quad (4)$$

$$\varphi_2 = \left\{ \text{FBS} \in \varphi \mid P_{\text{Aviso}} * d_i^{(-\infty)} * X_i < P_{\text{Umbral}} \right\} \quad (5)$$

En la Fig. 4 se observan las dimensiones del escenario, las regiones de coordinación y la ubicación del macro-usuario (MU). Las femto estaciones base ubicadas en casas y edificios dentro del círculo representan la primera región de coordinación (φ_1), mientras que las femto estaciones base ubicadas en casas y edificios fuera del círculo representan la segunda región de coordinación (φ_2) y, por último, el personaje ubicado en el centro del escenario es el macro-usuario (MU).

MECANISMOS DE COORDINACIÓN DE INTERFERENCIA

En esta sección se presentan diferentes variantes de mecanismos de coordinación de interferencia utilizados por las femto estaciones base, procurando disminuir la interferencia percibida por el MU.

Control ideal de potencia

En este caso, el control ideal de potencia (CP) se realizó en las dos regiones de coordinación, con el objetivo de disminuir el nivel de potencia de transmisión de todas las femto estaciones base. Este mecanismo de coordinación de interferencia se basa en el conocimiento previo de las pérdidas de propagación para deducir el valor de potencia de transmisión adecuado que debe utilizar cada femto estación base para servir a los femto-usuarios (FU).

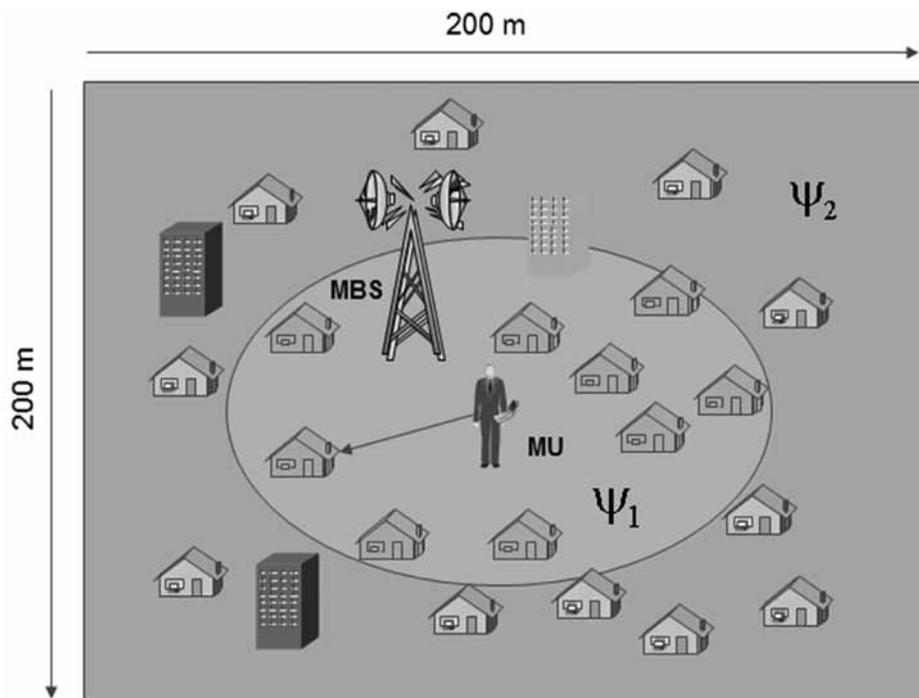


Fig. 4 Regiones de coordinación (Ψ_1, Ψ_2).

Control de potencia discreto

En este caso, el control de potencia *discreto* (CP 3 dB y CP 6 dB) se realizó a partir del procedimiento de regiones de coordinación, de la siguiente manera:

1. En la primera región de coordinación (φ_1) se aplicó control de potencia discreto para dos casos distintos; se reduce la potencia de transmisión de todas las femto estaciones base en 3 dB o 6 dB, transmitiendo con un nuevo valor de potencia P' , tal como se presenta en las ecuaciones (6) y (7) [9].

$$P' = P_i - 3\text{dB.} \quad (6)$$

$$P' = P_i - 6\text{dB.} \quad (7)$$

2. En la segunda región de coordinación (φ_2), debido a que las femto estaciones base escuchan la señal de aviso proveniente del macro-usuario (MU) por debajo del nivel umbral de coordinación, no se aplica control de potencia discreto.

Región de exclusión dinámica

El mecanismo de región de exclusión dinámica (RED) está basado en la reasignación del espectro, donde cada femto estación base ubicada en la primera región de coordinación cambia su frecuencia de operación a alguna de las frecuencias disponibles; es decir, cuando las femto estaciones base perciben la señal de aviso del macro-usuario (MU) por encima del umbral de coordinación, rápidamente cambian la frecuencia en la que están operando por una en la que la macroestación base no esté utilizando

ni vaya o utilizar, dejando de interferir al macro-usuario (MU).

En el caso de la segunda región de coordinación, debido a que las femto estaciones base no perciben la señal de aviso del macro-usuario (MU), no cambian la frecuencia en la que están operando, por lo que siguen generando interferencia co-canal (CCI).

Región de exclusión dinámica y control ideal de potencia

Para el mecanismo de región de exclusión dinámica y control ideal de potencia (RED + CP), todas las femto estaciones base emplean control ideal de potencia (CP), exceptuando las femto estaciones base ubicadas en la primera región de coordinación, las cuales emplean región de exclusión dinámica (RED), cambiando la frecuencia de operación. Al combinar las ventajas de estos dos mecanismos se espera una reducción considerable de la interferencia co-canal [9].

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la simulación estática a nivel de sistema, donde se observa el comportamiento de la interferencia co-canal en los escenarios con y sin el uso de mecanismos de coordinación de interferencia.

El objetivo principal de este artículo es caracterizar la interferencia co-canal (CCI) total presente en el sistema, percibida por el macro-usuario (MU), con y sin aplicar los diferentes mecanismos de coordinación expuestos; por tal razón, la Fig. 5 muestra cómo se despliegan en el escenario de simulación 100 femto estaciones base, representadas en la primera

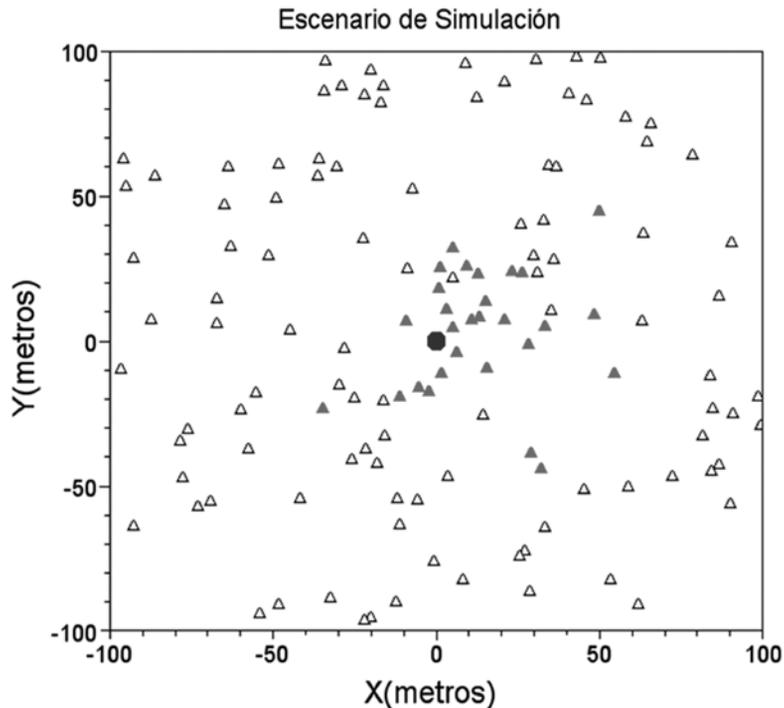


Fig. 5 Escenario de simulación 100 HeNB

región de coordinación con triángulos de color negro y en la segunda región de coordinación con triángulos de color blanco, donde el macro-usuario (MU) es el círculo relleno de color negro en el centro del escenario.

La Fig. 6, la Fig. 7 y la Fig. 8, a partir del método Montecarlo, presentan los histogramas obtenidos con 100 femto estaciones base desplegadas, donde se aprecia el número de veces que la potencia de la interferencia co-canal (CCI) presente en el sistema percibida por el macro-usuario (MU) se encuentra dentro de diferentes rangos establecidos, tanto en el escenario sin coordinación (interferencia total) como en el escenario coordinado utilizando control de potencia discreto de 6 dB (CP 6 dB) y empleando región de exclusión dinámica más control ideal de potencia (RED + CP).

Con base en los histogramas, se observa cómo la interferencia co-canal (CCI) percibida por el macro-usuario (MU) disminuye paulatinamente debido a la acción de los mecanismos de coordinación. Por ejemplo, en el escenario donde no existe coordinación (interferencia total), el macro-usuario (MU) percibe mayor interferencia, resultando la barra representada con -12 dBm como la moda (rango entre -12,5 dBm y -11 dBm); en el escenario coordinado utilizando control de potencia discreto de 6 dB la interferencia percibida por el macro-usuario (MU) se reduce, resultando la barra representada con -17 dBm como la moda (rango entre -18 dBm y -16,5 dBm); finalmente, en el escenario coordinado utilizando regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia (RED + CP) el macro-usuario (MU) percibe un mínimo nivel de interferencia, resultando la barra representada con < -24 dBm como la moda.

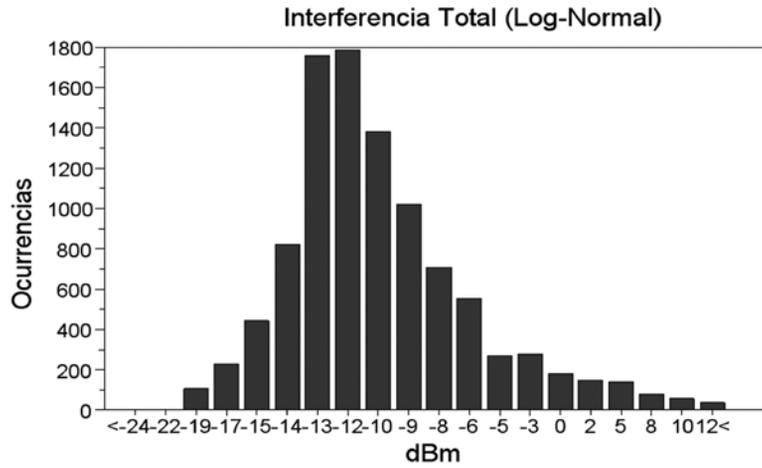


Fig. 6 Histograma escenario sin coordinación

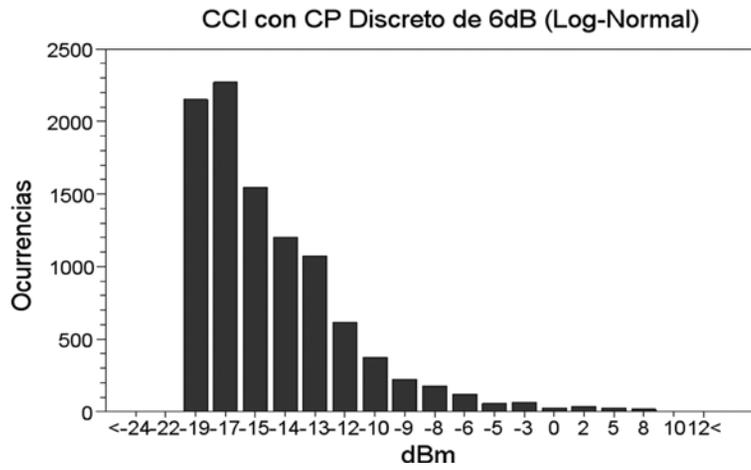


Fig. 7. Histograma escenario coordinado (CP discreto 6 dB)

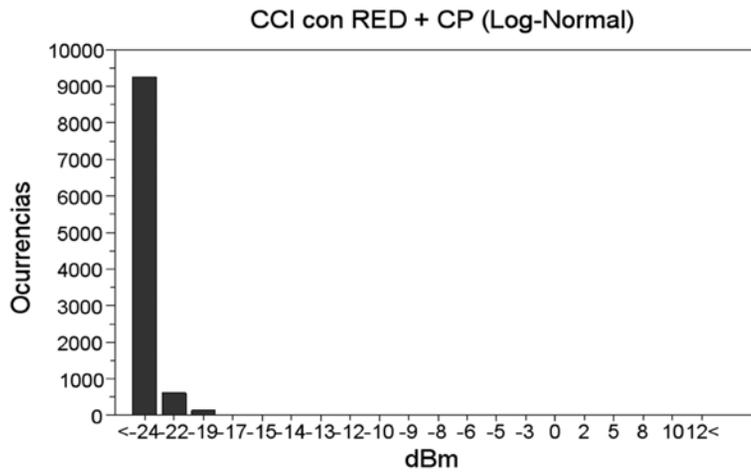


Fig. 8. Histograma escenario coordinado (RED + CP)

De esta manera, se aprecia que a medida que las femto estaciones base aplican control de potencia discreto de 6 dB (CP 6 dB) y región de exclusión dinámica más control ideal de potencia (RED + PC), las barras con mayor número de repeticiones se desplazan hacia la izquierda, evidenciando la reducción cada vez mayor de la interferencia co-canal (CCI) percibida por el macro-usuario (MU).

En la Fig. 9 se aprecia cómo el promedio de interferencia co-canal (CCI) obtenida a partir de la (8), percibida por el macro-usuario (MU), disminuye considerablemente desde -11,97 dBm obtenido en el escenario sin coordinación (interferencia total), hasta niveles de potencia de -14 dBm obtenido en el escenario coordinado utilizando control de potencia discreto de 3 dB (CP 3 dB), -17 dBm obtenido en el escenario empleando control ideal de potencia (CP) y control de po-

tencia discreto de 6 dB (CP 6), -21 dBm utilizando región de exclusión dinámica (RED) y finalmente niveles de potencia inferiores a -24 dBm utilizando región de exclusión dinámica más control ideal de potencia (RED + CP).

$$Promedio_{de\ CCI} = \frac{\sum i_{r,i}}{100\ Femtoceldas} \quad (8)$$

En la Fig. 10 se aprecia la probabilidad de que la interferencia co-canal (CCI) presente en el sistema percibida por el macro-usuario (MU) sea mayor o igual a cierto valor específico por medio de la función de distribución acumulativa complementaria (CCDF, *Complementary Cumulative Distribution Function*), de la interferencia co-canal (CCI) obtenida con 100 femto estaciones base, en los escenarios sin y con coordinación, donde se aprecia el efecto de cada uno de los me-

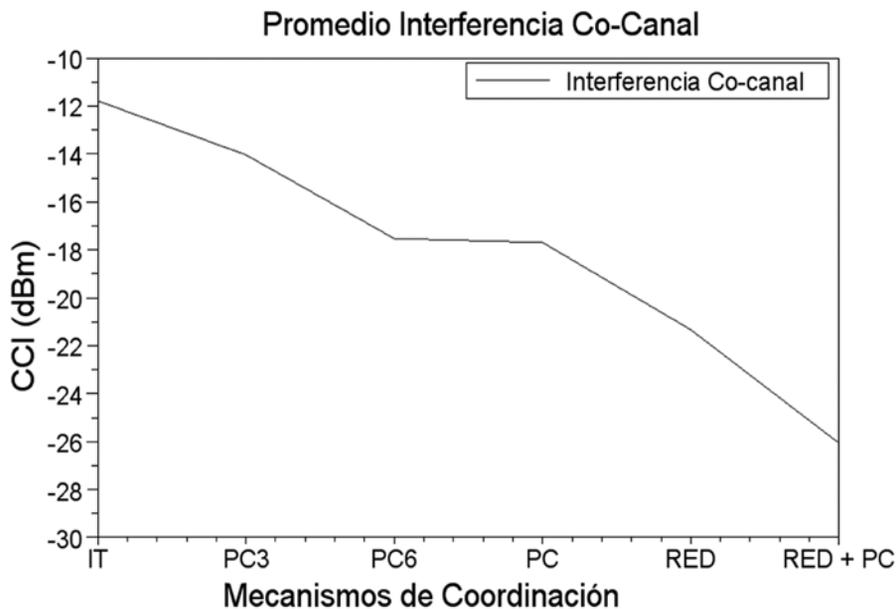


Fig. 9. Nivel de interferencia co-canal

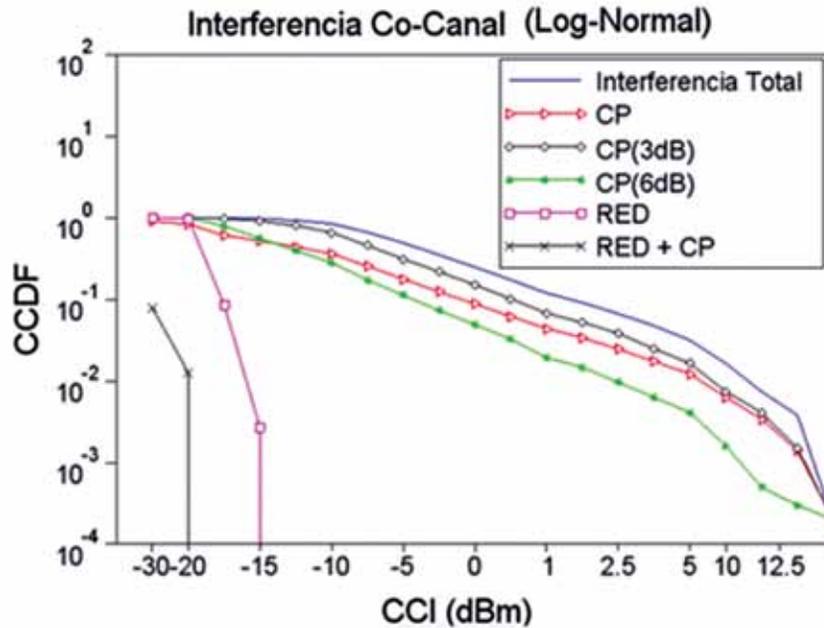


Fig. 10. CCI percibida por el macro-usuario (MU)

canismos de coordinación, disminuyendo paulatinamente la CCI presente en el sistema percibida por el macro-usuario (MU). Iniciando desde la derecha con la línea continua (interferencia total), donde no existe coordinación entre las femto estaciones base y, por lo tanto, el MU percibe los niveles más altos de CCI; luego se determinó la CCI en el escenario coordinado, empleando uno por uno, los diferentes mecanismos de coordinación a cada femto estación base, representados con: la línea con círculos (CP 3 dB), seguida por la línea con triángulos (CP), posteriormente la línea con asteriscos (CP 6 dB), luego la línea con cuadros (RED) y por último la línea con cruces (RED + CP), los cuales permiten disminuir progresivamente la CCI percibida por el macro-usuario (MU). Por ejemplo, la probabilidad de que la interferencia co-canal (CCI) sea mayor a -10 dBm en el escenario sin coordinación es de

100%, a diferencia del escenario coordinado, donde se observa cómo la probabilidad de que la interferencia co-canal percibida por el MU sea mayor a -10 dBm disminuye paulatinamente a medida que se emplean los diferentes mecanismos, comenzando con el mecanismo CP 3 dB (línea con círculos) donde la probabilidad se disminuyó a 90%; luego, utilizando CP 6 dB (línea con asteriscos) donde la probabilidad disminuyó a 50% y empleando los mecanismos RED (línea con cuadros) y RED + PC (línea con cruces) donde la probabilidad cayó hasta 0%, logrando que el nivel de interferencia percibido por el macro-usuario (MU) siempre esté por debajo de -10 dBm.

La Fig. 11 indica el escenario con 400 femto estaciones base desplegadas, representadas en la primera región de coordinación con triángulos de color negro y en la segunda región de coordinación

con triángulos de color blanco, donde el macro-usuario (MU) es el círculo relleno de color negro en el centro del escenario.

La Fig. 12, la Fig 13 y la Fig. 14 presentan los histogramas obtenidos con 400 femto estaciones base desplegadas, donde se aprecia un corrimiento de las ba-

rras con mayor número de repeticiones (moda) hacia la derecha, en comparación con las barras de la Fig. 6, la Fig. 7 y la Fig. 8 (escenario con 100 femto estaciones base), indicando un incremento de la interferencia en el sistema percibida por el macro-usuario (MU). Por ejemplo, en el escenario sin coordinación (inter-

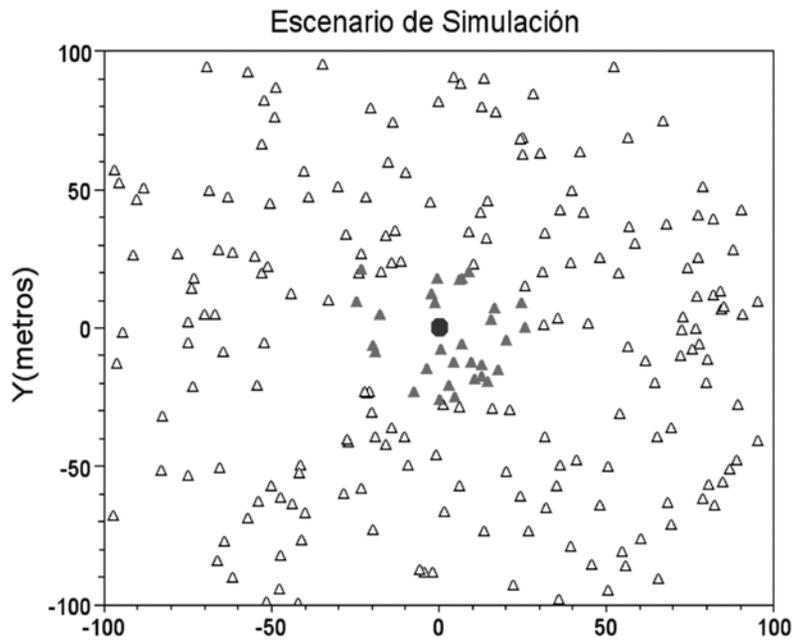


Fig. 11. Escenario de simulación 400 HeNB

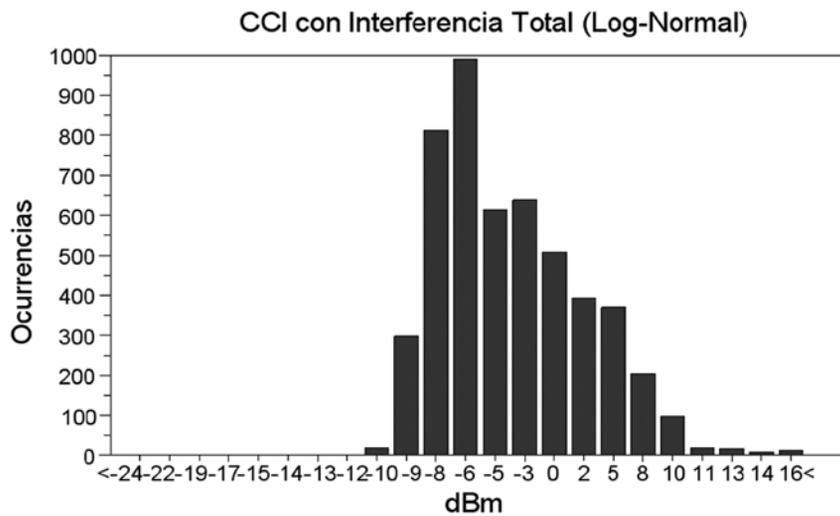


Fig. 12. Histograma escenario sin coordinación

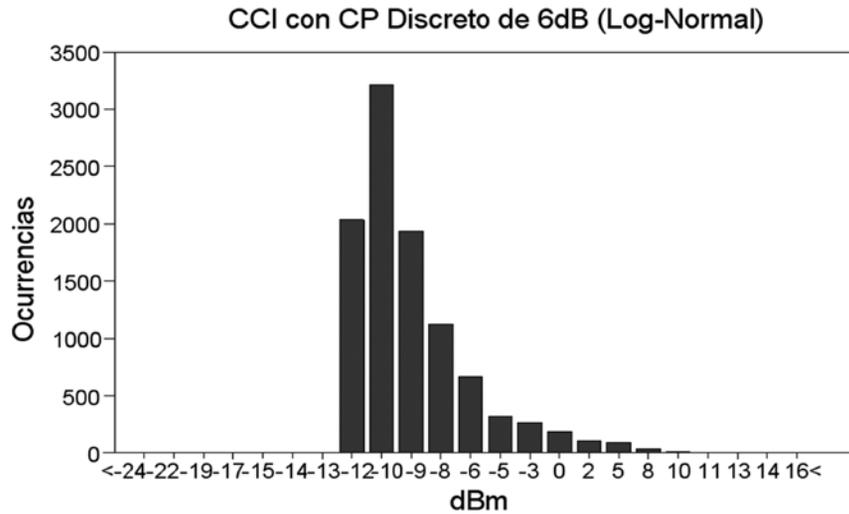


Fig. 13. Histograma escenario con coordinación (CP discreto 6 dB)

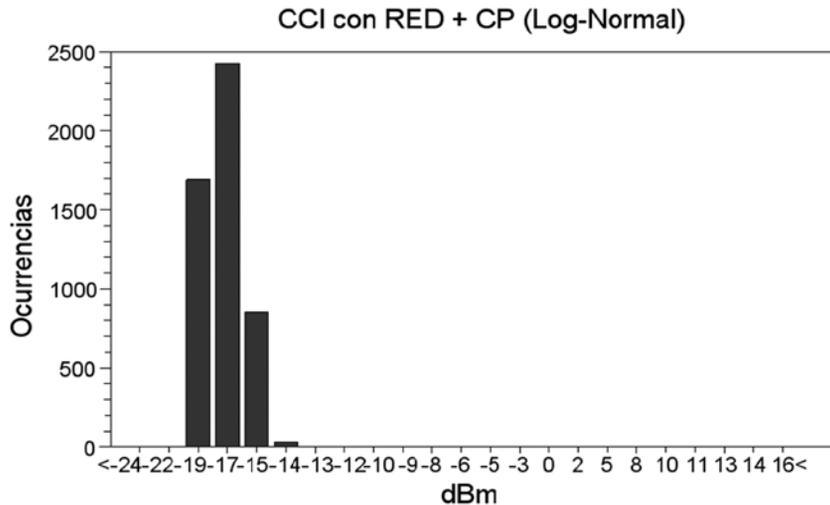


Fig. 14. Histograma escenario con coordinación (RED + CP)

ferencia total), la moda pasó de ser la barra representada por -12 dBm (rango entre -12,5 dBm y -11 dBm) a la barra representada por -6 dBm (rango entre -7 dBm y -5,5 dBm), aumentando en 6 dB la interferencia co-canal percibida por el macro-usuario (MU).

La Fig. 15 permite comprobar el aumento de la interferencia y la efectividad de los diferentes mecanismos de coordinación. Para el caso del escenario sin coordinación (interferencia total) con 100 femto

estaciones base, el promedio de CCI es de -11,97 dBm, mientras que para el escenario con 400 femto estaciones base e igual situación, el promedio de CCI obtenido a partir de la (9), es de -3,14 dBm, incrementando en aproximadamente 8 dB el nivel de CCI percibido por el macro-usuario (MU). Por otra parte, en el escenario con 100 femto estaciones base, el promedio de CCI obtenido en el escenario coordinado utilizando RED + PC fue de -25 dBm, mientras que en el escenario con 400 femto estaciones base

desplegadas fue de -19 dBm, evidenciando la efectividad del mecanismo de coordinación de interferencia.

$$Promedio\ de\ CCI = \frac{\sum i_{r,i}}{400\ Femtoceldas} \quad (9)$$

En la Fig. 16 se presenta la función de distribución acumulativa complementaria de la interferencia co-canal (CCI) percibida por el macro-usuario (MU) en el escenario con 400 femto estaciones base desplegadas, con y sin coordinación,

donde se observa un comportamiento similar al apreciado en la Fig. 10, logrado con 100 femto estaciones base desplegadas, con la diferencia de que el nivel de interferencia co-canal (CCI) presente en el sistema percibido por el macro-usuario (MU) aumentó 5 dB aproximadamente, incrementando la CCI hasta 17 dBm en el escenario sin coordinación (interferencia total) y hasta -13 dBm en el escenario coordinado empleando región de exclusión dinámica con control ideal de potencia (RED + CP).

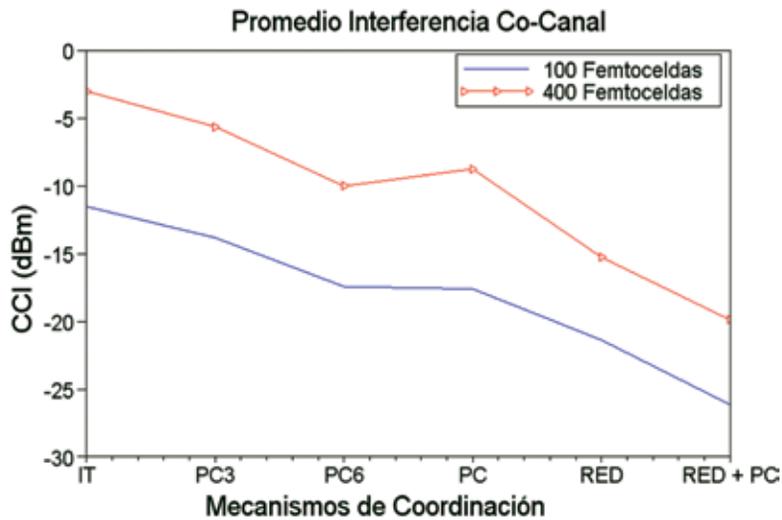


Fig. 15. Promedio CCI 100 HeNB VS 400 HeNB

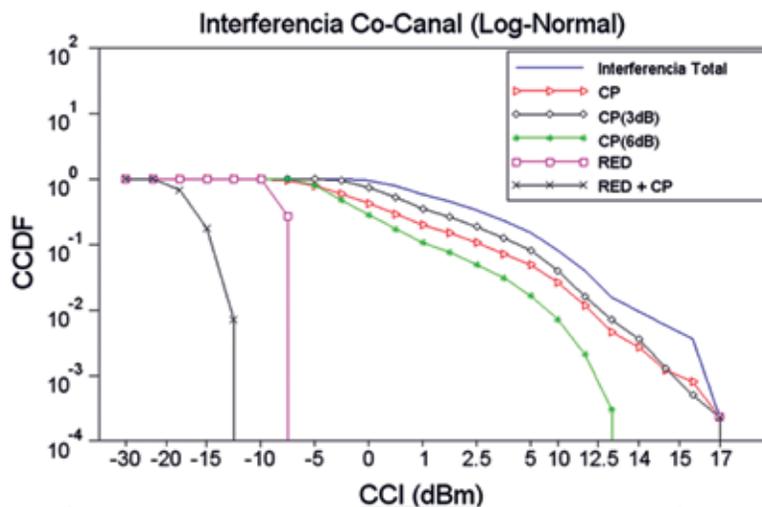


Fig. 16. CCI percibida por el macro-usuario (MU)

La Tabla 1 y la Tabla 2 presentan los resultados más importantes de las Fig. 10 y Fig. 16 relacionadas con los niveles de interferencia co-canal percibidos por el macro-usuario, dependiendo del escenario modelado y el mecanismo de coordinación de interferencia utilizado.

Así mismo, presentan el valor de la función de distribución acumulativa complementaria (CCDF), y por lo tanto la probabilidad de que la interferencia co-canal (CCI) percibida por el macro-usuario (MU) sea mayor o igual a -10 dBm, 0 dBm o 5 dBm, en el escenario 1, con 100 y 400 femto estaciones base desplegadas, respectivamente, y desvanecimiento lento. En ese sentido, el único caso en el escenario con 100 femto estaciones base que presentó el 100% de probabilidad de que la interferencia co-canal sea mayor a -10 dBm, fue el escenario sin coordinación (interferencia total); mientras que, en el escenario con 400 femto estaciones base, la probabilidad fue

igual a 100% para todos los mecanismos de coordinación, exceptuando el mecanismo de región de exclusión dinámica más control ideal de potencia con 0%, el cual logró mitigar considerablemente la CCI. El incremento del número de femto estaciones base aumentó la interferencia co-canal (CCI) en el sistema, la cual fue controlada formidablemente por el mecanismo de región de exclusión dinámica más control ideal de potencia.

Sin embargo, para una CCI igual a 5 dBm, la probabilidad de que se superara este valor al incrementar de 100 a 400 femto estaciones base, se mantuvo por debajo del 9% para los mecanismos de coordinación considerados, al lograr una probabilidad de 1%, utilizando control de potencia discreto de 6 dB y una probabilidad de 0% utilizando regiones de coordinación con y sin control de potencia, cumpliendo su función de mitigación de CCI.

TABLA 1. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULATIVA COMPLEMENTARIA VS INTERFERENCIA CO-CANAL CON 100 HeNB

CCI (dBm)	CCDF					
	I_{TOTAL}	CP (3 dB)	CP	CP (6 dB)	RED	RED + CP
	100	100	100	100	100	100
-10	100%	90%	70%	50%	0%	0%
0	35%	25%	12%	8%	0%	0%
5	7%	1%	2%	0.1%	0%	0%

TABLA 2. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULATIVA COMPLEMENTARIA VS INTERFERENCIA CO-CANAL CON 400 HeNB

CCI (dBm)	CCDF					
	I_{TOTAL}	CP (3 dB)	CP	CP (6 dB)	RED	RED + CP
	400	400	400	400	400	400
-10	100%	100%	100%	100%	100%	0%
0	100%	93%	80%	70%	0%	0%
5	40%	9%	6%	1%	0%	0%

CONCLUSIONES

- a. La integración de diferentes mecanismos de coordinación de interferencia en una red heterogénea con femto estaciones base, logró reducir la interferencia co-canal percibida por el macro-usuario (MU) con regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia, hasta 15 dB, comparado con el escenario sin coordinación, demostrando la efectividad de los mecanismos.
- b. Los mecanismos relacionados con gestión de espectro son más efectivos en mitigar la interferencia que los mecanismos relacionados con gestión de potencia, logrando menores niveles de potencia de interferencia co-canal (CCI), con una diferencia de hasta 9 dB.
- c. El mecanismo de control ideal de potencia logra mitigar más la interferencia que el mecanismo de control de potencia discreto de 3 dB, reduciendo en 3 dB más la interferencia co-canal percibida por el macro-usuario (MU), sin embargo, es menos eficaz que el mecanismo de control de potencia discreto de 6 dB.
- d. Las femto estaciones base, indudablemente, ofrecen mejores condiciones de uso tanto técnicas como económicas, permitiendo incrementar la velocidad de transmisión de datos, cobertura, movilidad y reduce los costos de capital y de operación para el operador.
- e. Las redes heterogéneas permitirán mayor conectividad en cualquier lu-

gar y en todo momento, equilibrar y dividir el tráfico en las macro estaciones y las diferentes pequeñas celdas, reducir costos de operación, mejor gestión y eficiencia de espectro.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca por apoyar la realización del presente artículo, el cual fue realizado con base en el trabajo de grado denominado “Análisis de Interferencia Co-canal en Redes Heterogéneas”.

REFERENCIAS

- [1] L. Min and X. Ruixue, “Broaden Your Way with Resilient WiMAX Network”, ZTE Technologies , Vol. 11. No. 1. pp. 21-23. Ene. 2010.
- [2] 4G Americas, *Developing and Integrating a High Performance HET-NET*, Oct. 2012.
- [3] J. Zhang and G. De la Roche, “Femto-cells: technologies and deployment”, John Wiley and Sons, 2010, pp. 1-4, 174-177.
- [4] 3GPP and ETSI, “TS 25.104 - Technical Specification Group Radio Access Network; Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD)”, version 9.2.0 Release 9, pp. 10-12, Dic. 2009.
- [5] I. Díaz Empananza, “Selección del número de repeticiones en una simulación”, *Estadística Española*, Vol. 32, 1995.
- [6] A. Goldsmith, “Wireless Communications”, Stanford University, Cambridge, 2005.

- [7] T. Rappaport, “Wireless Communications. Principles and Practice”, 2nd edition, Prentice Hall, 2001, pp. 100-150.
- [8] 3GPP and ETSI, “TR 136 920- LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); FDD Home eNode B (HeNB) Radio Frequency (RF) requirements analysis”, version 11.0.0 Release 11, Oct. 2012.
- [9] C. H. M. De Lima, M. Bennis and M. Latva-aho, “Coordination Mechanisms for Stand-Alone Femtocells in Self-Organizing Deployments”, Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), 2011.