



TELECOMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA

Título

Estrategias de reutilización de frecuencias en redes heterogéneas

Title

Frequency reuse strategies in heterogeneous networks

Marvin Feyt Leyva¹, Lisandra Bravo Álvarez², Samuel Montejo Sánchez³

1-Marvin Feyt Leyva. ETECSA, Cuba. E-mail: marvin.feyt@cubacel.cu

2- Lisandra Bravo Álvarez. ETECSA, Cuba. E-mail: lisandra.bravo@etecsa.cu

3-Samuel Montejo Sánchez. Programa Institucional de Fomento a la I+D+I, Universidad Tecnológica Metropolitana, Chile. E-mail: smontejo@ing.uchile.cl

Resumen: El espectro radioeléctrico es un recurso natural limitado en algunas regiones parcialmente agotado, para combatir esta escasez espectral se han investigado novedosas técnicas orientadas a hacer un uso más inteligente del mismo, como son la tecnología radio cognitiva y las técnicas de reutilización de frecuencias. Al utilizar estas técnicas en redes heterogéneas compuestas por macroceldas y femtoceldas se comparte el espectro de radio frecuencias entre ambos tipos de celdas, provocando efectos indeseables de interferencia que afectan grandemente la calidad en las comunicaciones. En la presente investigación se proponen estrategias a nivel de femtoceldas acordes a la técnica de reutilización de frecuencias utilizada, que permitan mitigar la interferencia y elevar el rendimiento del sistema. El desempeño de las estrategias propuestas es evaluado mediante la simulación de las mismas en un entorno heterogéneo. A partir de los resultados obtenidos se constata que el uso de estrategias cognitivas a nivel de femtoceldas en cooperación con las técnicas de reutilización de frecuencias permite mitigar la interferencia y mejorar el desempeño de las redes heterogéneas.

Abstract: The radio-electric spectrum is a limited natural resource in some partially exhausted regions. To combat this spectral scarcity, new techniques aimed at making a more intelligent use of it have been investigated, such as radio cognitive technology and frequency reuse techniques. When using these techniques in heterogeneous networks composed of macrocells and femtocells, the spectrum of radio frequencies is shared between both types of cells, causing undesirable interference effects that greatly affect the quality of communications. In the present investigation, strategies are proposed at the level of femtocells according to the frequency reuse technique used, which will mitigate interference and increase the system's performance. The performance of the proposed strategies is evaluated by simulating them in a heterogeneous environment. Based on the results obtained, it is observed that the use of cognitive strategies at



femtocell level in cooperation with frequency reuse techniques allows mitigating the interference and improving the performance of heterogeneous networks.

Palabras Clave: Fractional Frequency Reuse (FFR); Interferencia Intercedas (ICI); Interferencia Cruzada (CTI)

Keywords: Fractional Frequency Reuse (FFR); Inter Carrier Interference (ICI); Cross-tier interference (CTI)

1. Introducción

El surgimiento de las redes sociales y la capacidad para interactuar con terminales móviles propició que para el año 2014 el número de usuarios que accedían a los servicios móviles ascendiera al 94% de los 7 mil millones de habitantes del planeta para triplicarse con respecto a 2005 [1]. Las aplicaciones y servicios emergentes requieren una mayor tasa de transmisión de datos, esto constituye un gran reto tecnológico dado que el espectro de radio es un recurso limitado. Por lo que la asignación exclusiva de mayor ancho de banda a dicha tecnología no parece una solución viable. Para darle solución a este problema la comunidad científica comenzó a estudiar el método de reutilización de frecuencias.

En [2] se realiza un estudio de las ventajas que brinda la reutilización de frecuencias para el uso eficiente de los recursos espectrales en redes LTE. Existen varios factores de reutilización de frecuencias en función de las características del sistema, pero mientras mayor sea la eficiencia en el reuso de frecuencias mayor va a ser la interferencia intercelda. De aquí la necesidad de plantear estrategias de reutilización de frecuencias fraccionarias que ayudaran a mitigar la interferencia. En [3] se hace un análisis del impacto que produce el uso de la estrategia de Reutilización Estricta de Frecuencias (FFR) en la mitigación de la interferencia intercelda y del rendimiento del sistema. En [4] se presenta una caracterización estadística de FFR y algunas de sus ventajas.

Por otro lado, el crecimiento en la demanda de recursos de radio ha propiciado que el mundo evolucione hasta la 5G (Quinta Generación) [5], [6]. Esta tecnología introduce mejoras significativas en el ancho de banda, además de la capacidad de tomar ventaja de las redes optimizadas heterogéneas. Una red heterogénea es aquella donde conviven junto a las macroceldas (MBS) otros tipos de celdas más pequeñas como pueden ser las picoceldas y/o femtoceldas (FBS). En [7] después de realizar un estudio sobre la arquitectura cognitiva de las femtoceldas en las redes heterogéneas, se llegó a la conclusión de que la ventaja que tiene el uso de femtoceldas es la capacidad de minimizar el rango de transmisión de cada una de ellas, propiciando maximizar eficientemente el rendimiento del sistema. La coexistencia de femtoceldas en macroceldas reveló nuevos retos al traer consigo la disyuntiva de qué sistema de femtoceldas usar. Sin embargo, aparejado a la utilización de estas modernas redes móviles se ha desarrollado una novedosa técnica encaminada a un mayor aprovechamiento del espectro de radio frecuencias como es la tecnología radio cognitiva [8], [9].

Cuando se utilizan las técnicas de reutilización de frecuencias fraccionarias en redes heterogéneas compuestas por macroceldas y femtoceldas se comparte el espectro de



radio frecuencias entre ambos tipos de celdas, provocando efectos indeseables de Interferencia Interceldas (ICI, Inter Carrier Interference) y de interferencias cruzadas entre macroceldas y femtoceldas (CTI, Cross-tier Interference) que afectan grandemente la calidad en las comunicaciones de una y otra. Las técnicas de reutilización de frecuencias podrían ser utilizadas para lograr estrategias a nivel de las FBS que mitiguen la interferencia y eleven el rendimiento en redes heterogéneas.

¿Cuáles estrategias a nivel de femtoceldas podrían ayudar a la técnica FFR a mitigar la interferencia y elevar el rendimiento de las redes heterogéneas?

Objetivos:

- Proponer estrategias que ayuden a la técnica FFR a mitigar la interferencia y elevar el rendimiento en redes heterogéneas.
- Evaluar comparativamente las estrategias propuestas para la técnica FFR en redes heterogéneas.

2. Metodología

Un importante método utilizado para maximizar las prestaciones de las redes inalámbricas y aprovechar el espectro de frecuencias es la reutilización de frecuencias. Se define la reutilización de frecuencias como la división del espectro total del sistema en bloques y la asignación de estos para la transmisión de los nodos, de forma tal que los nodos que transmiten con la misma frecuencia se encuentren espaciados lo suficiente como para no interferirse mutuamente de forma significativa. De este modo se puede reutilizar el mismo segmento de frecuencias cada determinado número de nodos, garantizando la expansión del sistema.

El factor de reutilización de frecuencia es, que tan seguido se puede utilizar la misma frecuencia en una red. A mayor eficiencia en el reuso de frecuencias, mayor es la interferencia. En la Figura 1 se muestra un sistema compuesto por 19 macroceldas con un factor de reuso de 3.

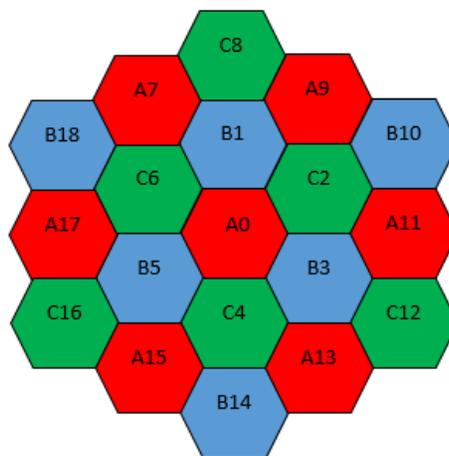


Figura 1. Sistema de 19 macroceldas con un factor de reuso de frecuencia de 3 [3].



La función de la reutilización de frecuencias es la de disminuir el SINR de forma tal que se logren altas tasas de transmisión. La fórmula del SINR se muestra en la ecuación 1.

$$SINR = \frac{S}{\sum_{i=0}^n I + R} \quad (1)$$

Donde S es la potencia de la señal en Watts, I es la potencia de la señal interferente de los n móviles que transmiten de forma simultánea en ese bloque de recursos en Watts y R es la potencia de ruido en Watts.

El sistema heterogéneo que se va a simular está compuesto por 19 macroceldas con un factor de reuso de 3 (Figura 1) y femtoceldas que se encuentran uniformemente distribuidas en cada una de las macroceldas. Se asumió para la simulación que las femtoceldas operan en modo *indoor*. Los usuarios macros y femtos están aleatoriamente distribuidos en el área (πR^2) de la macrocelda con sub-canales disponibles desde las bandas de frecuencias designadas para cada estrategia.

El canal de bajada (*down link*) está sujeto a las pérdidas por propagación. Las pérdidas de propagación que caracterizan el enlace entre las estaciones bases macro/femto y los usuarios macros pueden ser modeladas por la ecuación 2:

$$L_B(d) = K + 10\alpha \log_{10}(d) \quad (2)$$

Donde K y α son la constante y el exponente de las pérdidas por propagación, respectivamente; d es la distancia en metros de un usuario macro o femto respecto a la estación base de la macrocelda central de la topología de estudio utilizada. Las pérdidas por propagación pueden identificarse como L_{Bm} para los usuarios macros y como L_{Bf} para los usuarios femtos. Como se considera que las femtoceldas operan en modo *indoor*, se tiene en cuenta las pérdidas por penetración (W) al calcular las pérdidas por propagación de un usuario femto, como se muestra en la ecuación 3. En la tabla 1 se muestran los principales parámetros de las pérdidas por propagación.

$$L_{Bf}(d) = K_f + W + 10\alpha \log_{10}(d) \quad (3)$$

La SINR instantánea de un usuario x ubicado en la macrocelda central puede ser expresada por la ecuación 4.

$$SINR_x = \frac{P_B L_B(d) |h|^2}{N_o \Delta f + I_x} \quad (4)$$

Donde P_B es la potencia de transmisión de la estación base, esta se divide en P_m y P_f para las estaciones bases macros y femtos respectivamente. La respuesta de frecuencia resultante del desvanecimiento de pequeña escala está dada por $|h|$. N_o es la densidad espectral de potencia de ruido e I_x es la Interferencia percibida por un usuario x, la cual es modelada por la ecuación 5.

$$I_x = \sum_{i=1}^n P_m L_B(d) |H|^2 + \sum_{i=1}^n P_f L_B(d) |H|^2 \quad (5)$$

Enlace de bajada	Constante de L_B (K)	Exponente α	Pérdidas por penetración (W)
Estación macro – usuario macro	15.3	3.76	0



Estación femto – usuario macro	$15.3 + W$	3.76	10
Estación macro – usuario femto	$15.3 + W$	3.76	10

Tabla 1. Parámetros de las pérdidas por propagación.

Las técnicas de reutilización de frecuencias fraccionarias son mecanismos de coordinación de interferencias interceldas utilizadas para minimizar las interferencias entre las transmisiones de las celdas vecinas. Consisten en la división del espectro electromagnético en determinadas bandas que se asignan entre los nodos evolucionados B (eNB) vecinos de forma tal que no se interfieran las transmisiones. Las bandas pueden dividir el eNB en diferentes áreas interiores o exteriores, provocando que los UE más cercanos al eNB transmitan en bandas distintas a las de los UE más alejados del eNB. En comparación con las técnicas de reuso de frecuencias tradicionales, se logran mayores tasas de transferencia de datos con las técnicas de reuso fraccional de frecuencias.

2.1 Reutilización Estricta de Frecuencias (FFR)

En FFR la banda total se divide entre una banda central común para todas las macroceldas donde se aplicará reutilización total de frecuencias y una cantidad de sub-bandas N que se utilizarán en cada uno de los bordes de las macroceldas y en las que se aplicará reutilización fraccional de frecuencias. En total se requiere dividir el espectro en N+1 sub-bandas [10].

Las sub-bandas externas solamente se asignarán a los usuarios del borde de la celda, por esta razón es necesario definir el radio umbral a partir del cual el UE será tratado como de borde por el eNB. A pesar de no utilizarse todo el ancho de banda disponible por la celda, mejora el SINR con lo que se obtiene un rendimiento elevado para los usuarios del borde de la celda. En la Figura 2 se muestra el esquema de la potencia y el ancho de banda de FFR con un factor de reutilización de frecuencia de 3.

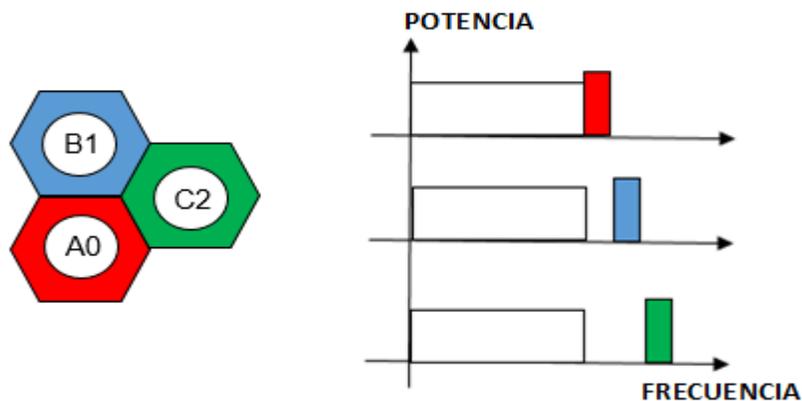


Figura 2. Reutilización de frecuencias FFR3 [10].

2.2 Estrategias de reutilización de frecuencia basadas en FFR

En esta sección son descritas dos estrategias que hemos propuesto con el fin de incrementar el desempeño de un sistema heterogéneo donde a nivel macro se utilizan técnicas FFR. Estas propuestas pretenden mitigar el impacto de la interferencia producida entre ambos tipos de celdas.

2.2.1 Estrategia Edge

En la estrategia *Edge* se aprovecha la característica de FFR de separar las sub-bandas externas de las macroceldas de la sub-banda común central, separando de esta forma las estaciones femtos que se encuentran en el borde de la macrocelda de aquellas estaciones femtos que se encuentran en el centro de la macrocelda.

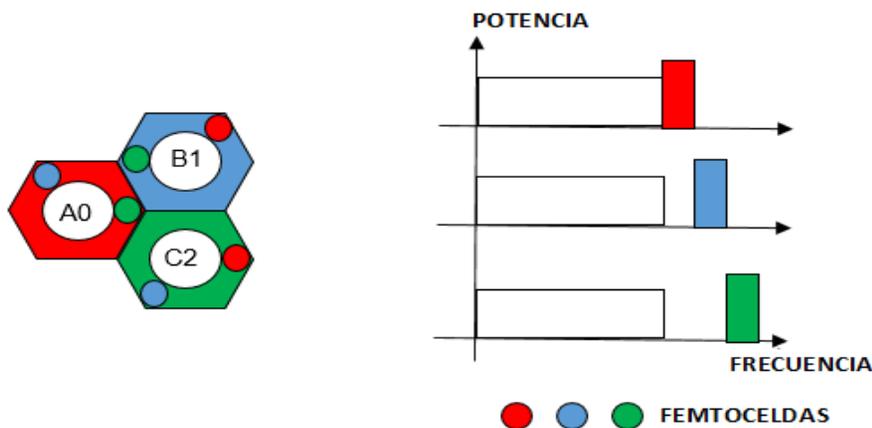


Figura 3. Estrategia *Edge* usando FFR3. Elaboración propia.

Esta estrategia solo se aplica a aquellas estaciones femtos que se encuentren en el borde de las macroceldas, y se les asignan para la transmisión las dos sub-bandas de frecuencias externas que no está utilizando el borde de la macrocelda donde se encuentran, como se muestra en la figura 3. De esta forma, las estaciones femtos que se encuentran en el borde la macrocelda que transmite con la sub-banda externa roja, transmitirán con las sub-bandas externas azul y verde (Figura 3), elevando el rendimiento de los usuarios femtos que se encuentran en el borde de la macrocelda y disminuyendo la interferencia recibida por los usuarios macros de borde.

2.2.2 Estrategia Switching

En la estrategia *Switching* las femtoceldas ubicadas en el centro de las macroceldas transmitirán con las tres sub-bandas de frecuencias externas, teniendo una mayor opción para seleccionar el sub-canal de transmisión, lo que permite que la interferencia co-canal sea mitigada. Por otro lado, las femtoceldas ubicadas en el borde de las macroceldas transmitirán con la banda de frecuencias centrales, como se muestra en la Figura 4. En esta estrategia los usuarios femtos y los usuarios macros ubicados en la



misma zona de la macrocelda no se interfieren mutuamente, mitigando la interferencia percibida por los usuarios y elevando el rendimiento de los mismos.

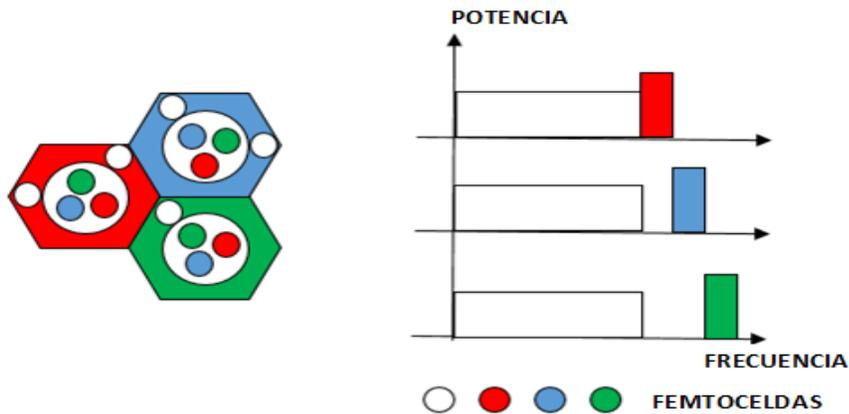


Figura 4. Estrategia *Switching* usando FFR3. Elaboración propia.

3. Resultados y discusión

Se evalúa el desempeño de las diferentes estrategias en un escenario heterogéneo utilizando la herramienta matemática MatLab, en función del rendimiento, la interferencia co-canal y la CTI.

La interferencia puede separarse en I_m para los usuarios macros y en I_f para los usuarios femtos. Una vez calculada las pérdidas por propagación y la interferencia percibida por un usuario, se puede modelar la tasa de transmisión normalizada respecto al ancho de banda de un usuario macro y femto ubicado en la macrocelda central, por la ecuación 6 y 7, respectivamente. Las constantes y parámetros a simular se muestran en la tabla 2.

$$R_m = \log_2[1 + ((P_m - L_{Bm})/I_m)] \quad (6)$$

$$R_f = \log_2[1 + ((P_f - L_{Bf})/I_f)] \quad (7)$$

Radio de la macrocelda	500m
Mínima distancia entre un usuario y la estación macro	35m
Radio de la femtocelda	20m
Mínima distancia entre un usuario y la estación femto	0.2m
Potencia de transmisión de la estación macro	46 dBm
Potencia de transmisión de la estación femto	20 dBm
Ancho de banda Total	20 MHz
Cantidad de usuarios (n)	1000
Cantidad de femtoceldas (Nf)	100
Cantidad de sub-canales (f)	600
Mecanismo de asignación de recursos	Round Robin

Tabla 2. Parámetros para la simulación.



3.1 Resultados de la estrategia *Edge*

En la Figura 5 se muestra la media de la interferencia equivalente percibida por los usuarios macros (I_{meq}) y los usuarios femtos (I_{feq}) en la estrategia *Edge* en función del radio umbral (R_{th}). Esta es una estrategia en donde se favorece a aquellos usuarios ya sean femtos o macros, que se encuentran en la zona borde de la macrocelda, por esta razón se puede apreciar un aumento de la interferencia equivalente percibida por los usuarios a medida que aumenta el radio umbral, ya que con el aumento de R_{th} crece la zona central y disminuye la cantidad de usuarios que son tratados como usuarios de borde. A pesar de esto, la interferencia equivalente percibida por los usuarios femtos es baja, lo que permite un elevado rendimiento equivalente (R_{feq}) para estos usuarios, tal y como se observa en la Figura 6. El rendimiento equivalente de los usuarios macros (R_{eq}) se ve afectado por la interferencia equivalente percibida en la zona central de la macrocelda, donde los usuarios macros y las estaciones femtos utilizan la misma banda de frecuencias de transmisión.

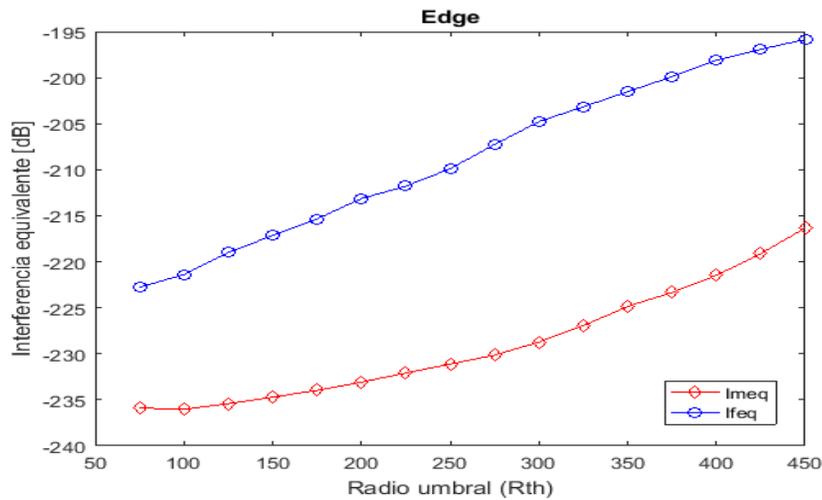


Figura 5. Interferencia equivalente de los usuarios macros y femtos en la estrategia *Edge*. $W=10$ dB y $N_f=100$.

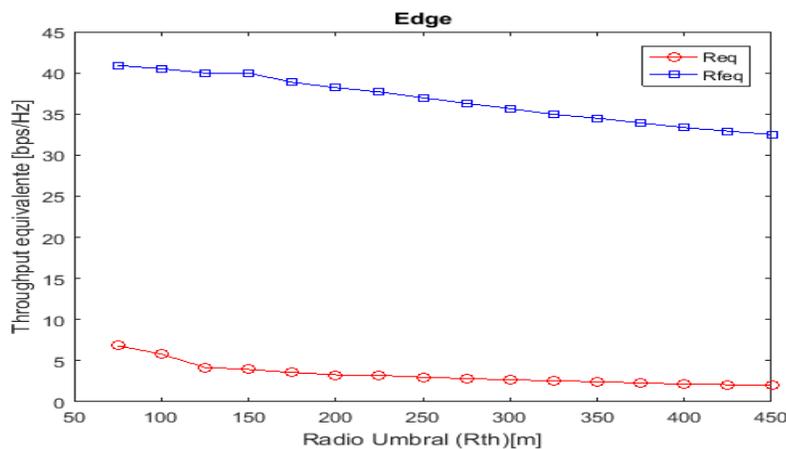


Figura 6. Razón de transmisión normalizada con respecto al ancho de banda para la estrategia *Edge*. $W=10$ dB y $N_f=100$.



3.2 Resultados de la estrategia *Switching*

En la Figura 7 se muestra la interferencia equivalente de los usuarios macros (I_{meq}) y femtos (I_{feq}) de la estrategia *Switching* en función del radio umbral (R_{th}). La interferencia equivalente percibida por los usuarios macros tiene un comportamiento similar a la de la estrategia *Edge* debido a que ambas estrategias pertenecen a la misma técnica de reutilización de frecuencias (FFR), donde los usuarios macros son atendidos de la misma manera. A diferencia de la estrategia *Edge*, en esta estrategia la interferencia equivalente percibida por los usuarios femtos disminuye notablemente a medida que aumenta R_{th} , ya que los usuarios que más se favorecen son los ubicados en la zona central de la macrocelda porque tienen mayor opción para seleccionar el sub-canal de transmisión.

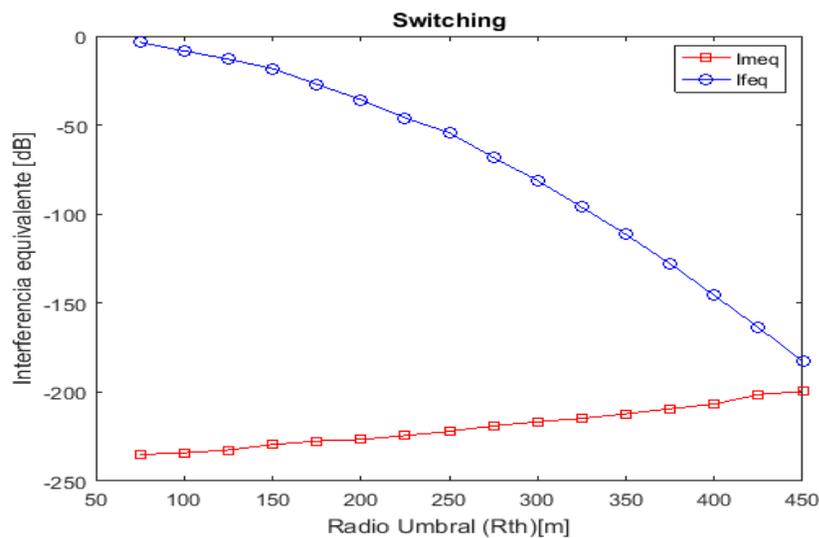


Figura 7. Interferencia equivalente de los usuarios macros y femtos en la estrategia *Switching*. $W=10$ dB y $N_f=100$.

En la Figura 8 se muestra el rendimiento equivalente de los usuarios macros (R_{eq}), el rendimiento de un usuario femto ubicado en la zona central (R_f zona central) y en la zona borde (R_f zona borde) de la macrocelda central y el rendimiento equivalente de los usuarios femtos (R_{feq}) en función del radio umbral (R_{th}). Como una consecuencia de la interferencia percibida por los usuarios macros, mostrada en la Figura 7, se puede apreciar una leve disminución del rendimiento equivalente de los usuarios macros. En esta estrategia, a los usuarios femtos ubicados en la zona centro y en la zona borde de la macrocelda se le asignan para su transmisión diferentes bandas de frecuencias y recursos de radio, por lo que el comportamiento del rendimiento es diferente para cada uno. Cuando el radio umbral está cerca de 350 metros se logra un equilibrio en el rendimiento de ambos tipos de usuarios femtos lo que consecuentemente eleva el rendimiento general del sistema heterogéneo.

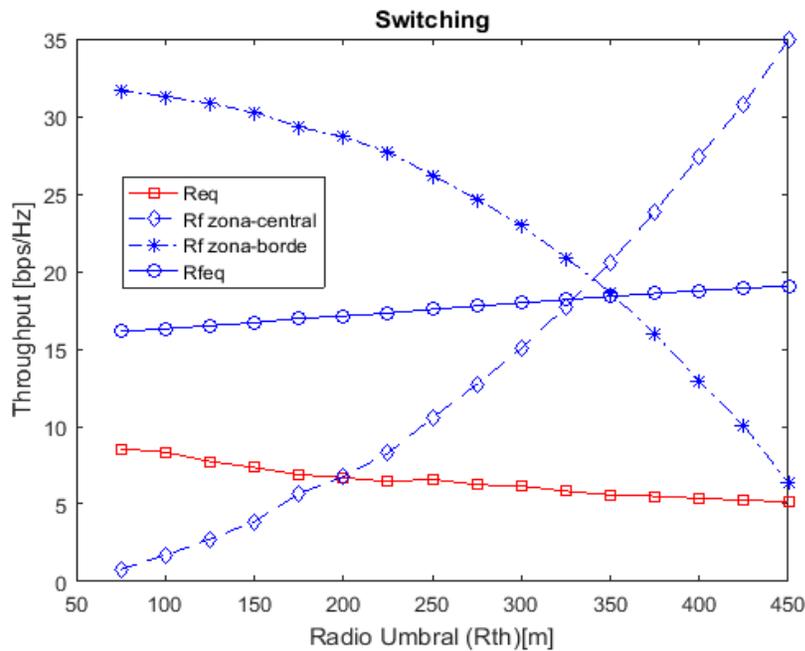


Figura 8. Razón de transmisión normaliza con respecto al ancho de banda para la estrategia Switching. $W=10\text{dB}$ y $N_f=100$.

Cuando se utiliza la técnica de reuso de frecuencia FFR, la estrategia *Edge* favorece a los usuarios que se encuentran en la zona borde de las macroceldas, ya que la sub-banda de frecuencia de transmisión establecida para las femtoceldas es diferente a la de los usuarios macros, esto minimiza la interferencia co-canal y reduce la CTI en el borde de las macroceldas, elevando el rendimiento de los usuarios.

A diferencia de *Edge*, *Switching* tiene mejores prestaciones para aquellos usuarios ubicados en las zonas centrales de las macroceldas. En *Switching* las estaciones femtos centrales transmitirán con las tres sub-bandas de frecuencias externas, permitiéndoles tener una mayor opción para seleccionar el sub-canal de transmisión, reduciendo de esta forma la interferencia co-canal intracelda, así como la CTI y elevando el rendimiento de los usuarios centrales. Otra ventaja importante de *Switching* es que los usuarios macros ubicados en el borde de la macrocelda no podrán interferir con ninguno de los usuarios de borde de las macroceldas vecinas, como resultado de esto, los usuarios macros de borde recibirán un nivel aceptable de señal que consecuentemente reducirá la probabilidad de que la SINR instantánea de los usuarios equipados sea menor que el umbral del SINR esperado y aumentará la capacidad del sistema. La desventaja que presenta esta estrategia con respecto a *Edge*, está dada por las estaciones femtos centrales que transmiten con la misma sub-banda de frecuencias externas establecida para el borde de la macrocelda donde se encuentran, recibiendo niveles de CTI más altos a medida que se acercan más al radio umbral que separa el centro del borde de las macroceldas. Igual sucede para las estaciones femtos de borde, a medida que estén más cerca del radio umbral sentirán mayor interferencia proveniente de la estación macro central, por esta razón es sumamente importante definir el radio umbral en esta estrategia.



4. Conclusiones

Con la culminación de la investigación se arribaron a las siguientes conclusiones. En un escenario heterogéneo de dos niveles compuesto por macroceldas y femtoceldas es posible la aplicación de estrategias de reutilización de frecuencias a nivel de femtoceldas en conjunto con las técnicas de reutilización de frecuencias fraccionarias, debido a las ventajas que presupone la mitigación de la interferencia y la elevación del rendimiento de los usuarios. Cuando se desea dividir el área de transmisión en dos zonas, una central y otra en el borde, la estrategia Switching en conjunto con la técnica FFR es la mejor elección para beneficiar a aquellos usuarios que se encuentran en la zona central y la estrategia Edge en conjunto con la técnica FFR es la mejor opción para beneficiar a los usuarios ubicados en la zona borde.



5. Referencias bibliográficas

- [1] Cisco Visual Networking Index, "Global Mobile Data Traffic Forecast Update," 2015.
- [2] Raymond Kwan and Cyril Leung, "A Survey of Scheduling and Interference Mitigation in LTE," *J Electr Comput Eng*, 2010.
- [3] Jan García-Morales, Guillem Femenias, and Felip Riera-Palou, "Analytical Performance Evaluation of OFDMA-based Heterogeneous Cellular Networks Using FFR," *IEEE*, 2015.
- [4] Jan García-Morales, Guillem Femenias, and Felip Riera-Palou, "STATISTICAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF FFR/SFR-AIDED OFDMA-BASED MULTI-CELLULAR NETWORKS," *IEEE Stat Signal Process Workshop*, 2016.
- [5] ADSLZone.net, "Varias marcas anuncian sus primeros móviles 5G para 2019," 2019.
- [6] Noticias Tecnológicas, "Lista la generación 5G de smartphones," 2019.
- [7] John Paul M. Torregoza, Rentsen Enkhbat, and Won-Joo Hwang, "Joint Power Control, Base Station Assignment, and Channel Assignment in Cognitive Femtocell Networks," *J OnWireless Commun Netw*, 2010.
- [8] Schmelz L.C, Van Den Berg J.L, and Litjens R., "Self-organisation in wireless networks use cases and their interrelation," *Wirel World Res Forum Meet*, 2012.
- [9] Mitola J., *Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio*. Royal Institute of Technology (KTH), Sweden. 2010.
- [10] T. D. Novlan, R. K. Ganti, and J. G. Andrews, "Analytical evaluation of fractional frequency reuse for heterogeneous cellular networks," *IEEE Trans Commun*, 2012.