

**DETERMINACIÓN DE LA COBERTURA DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES
INALÁMBRICO QUE UTILIZA CONTROL DE POTENCIA BASADO EN EL ALGORITMO
DE FOSCHINI**



**Dora Lucia Ibarra Robledo
Paola Andrea Morales Anacona**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación de Gestión Integrada de Redes, Servicios y
Arquitecturas de Comunicaciones
Popayán, Agosto de 2014**

**DETERMINACIÓN DE LA COBERTURA DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES
INALÁMBRICO QUE UTILIZA CONTROL DE POTENCIA BASADO EN EL ALGORITMO
DE FOSCHINI**



Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en electrónica y telecomunicaciones

**Dora Lucia Ibarra
Paola Andrea Morales**

Director: Víctor Fabián Miramá Pérez

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación de Gestión Integrada de Redes, Servicios y
Arquitecturas de Comunicaciones
Popayán, Agosto de 2014**

CONTENIDO

pág.

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABLAS	v
LISTA DE ACRÓNIMOS	vii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 GENERALIDADES	3
1.1. SISTEMA DE COMUNICACIONES INALÁMBRICO	3
1.1.1. Transmisor.....	3
1.1.2. Canal Inalámbrico.....	5
1.1.3. Receptor	5
1.2. ESTRUCTURA CELULAR	6
1.2.1. Jerarquía Celular	7
1.2.2. Interferencia en un Sistema Celular	8
1.2.3. Capacidad y Cobertura.....	8
1.3. MODELO DE PROPAGACIÓN	9
1.4. CONTROL DE POTENCIA	10
1.4.1. Clasificación de Esquemas de Control de Potencia	11
1.5. FOSCHINI ALGORITMO DE CONTROL DE POTENCIA DISTRIBUIDO	15
CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN	19
2.1. PROCESO DE DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN	19
2.2. FASE 1: DEFINICIÓN DEL SISTEMA	19
2.3. FASE 2: ANÁLISIS DEL SISTEMA	20
2.4. FASE 3: FORMULACIÓN DEL MODELO	23
2.5. FASE 4: SELECCIÓN DEL LENGUAJE	29
2.6. FASE 5: CODIFICACIÓN DEL MODELO	30
2.6.1. Estructuras de información.....	30
2.6.2. Funciones	34
2.7. FASE 6: VALIDACIÓN	36
2.8. FASE 7: EXPERIMENTACIÓN	37
2.9. FASE 8: IMPLANTACIÓN	38
2.10. FASE 9: MONITOREO Y CONTROL.....	38

CAPÍTULO 3 PRUEBAS Y RESULTADOS.....	39
3.1. RESULTADOS PARA SINR DE -20 dB	41
3.1.1. Radio de Celda de 0.3 Km	41
3.1.2. Otros Radios de Celda	53
3.2. RESULTADOS PARA SINR DE -14 dB	55
3.2.1. Radio de Celda de 0.3Km	55
3.2.2. Otros Radios de Celda	65
3.3. RESUMEN DE RESULTADOS	67
CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	69
4.1. CONCLUSIONES.....	69
4.2. TRABAJOS FUTUROS	70
REFERENCIAS.....	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama de Bloques Simplificado de un sistema de Comunicaciones.....	3
Figura 1.2. Representación General de Transmisores.	4
Figura 1.3. Dos Tipos de Ruido en el Canal de Comunicación Inalámbrico.	5
Figura 1.4. Contribuciones de Ruido en el Canal Inalámbrico.....	6
Figura 1.5. Estructura Simplificada de un Receptor Inalámbrico.....	6
Figura 1.6. Uso de hexágonos para Representar Cobertura Celular	7
Figura 1.7. Áreas de Cobertura para Diferentes Tamaños de Celdas.....	8
Figura 1.8. Control de Potencia en Lazo Abierto y Lazo Cerrado	12
Figura 1.9. Control de Potencia de Lazo Cerrado en Enlace de Subida	13
Figura 2.1. Proceso de desarrollo de una simulación	20
Figura 2.2. Escenario de Simulación	21
Figura 2.3. Diagrama en bloques del Sistema	24
Figura 2.4. Diagrama de Flujo General de Simulación Simple	26
Figura 2.5. Diagrama de Flujo General Simulación Iterada	27
Figura 2.6. Diagrama de Flujo de Control de Potencia Nulo	28
Figura 2.7. Diagrama de Flujo Control Ideal	28
Figura 2.8. Diagrama de Flujo Algoritmo de Control de Potencia de Foschini	29
Figura 2.9. Estructura Celdas.....	31
Figura 2.10. Estructura Transmisión	31
Figura 2.11. Estructura Específico Celda.....	33
Figura 2.12. Vector Enlaces	33
Figura 3.1 Interfaz Principal de la Herramienta de Simulación.....	39
Figura 3.2. Interfaz de Configuración de Escenario.....	40
Figura 3.3. Interfaz de Inicio de Simulación.	40
Figura 3.4 Resultados Simulación Simple	41
Figura 3.5. Radio de Cobertura Relativo Contra Número de Usuarios por Celda para Control Ideal, Foschini y Sin Control de Potencia	42
Figura 3.6. Porcentaje de Degradación Relativo Contra Número de Usuarios por Celda para Control Ideal, Foschini y Sin Control de Potencia para un Radio de Celda de 0.3Km y SINR mínima de -20dB.	43
Figura 3.7. Porcentaje de Usuarios con Degradación Contra Radio de Cobertura para Foschini, para un Radio de Celda de 0.3 Km y SINR mínima de -20 dB.	44
Figura 3.8. Usuarios con Cobertura Contra Número de Usuarios por Celda para Control Ideal, Foschini y Sin Control de Potencia para un Radio de Celda de 0.3 Km y SINR mínima de -20 dB.	45
Figura 3.9. Potencia de Transmisión para el Primer y Último usuario Con y Sin Cobertura para Radio de Celda 0.3 Km y SINR mínima -20 dB.....	47

Figura 3.10. SINR para el Primer y Último Usuario Con y Sin Cobertura para Radio de Celda 0.3 Km y SINR mínima -20 dB.....	48
Figura 3.11. Histogramas de Potencia para IPC y Foschini para un Radio de Celda de 0.3 Km y SINR mínima de -20 dB	50
Figura 3.12. Histogramas de SINR para Foschini y sin Control de Potencia para un Radio de Celda 0.3Km y SINR mínima -20 dB	51
Figura 3.13. Comparación Radios de Cobertura Relativos Obtenidos para Distintos Radios de Celda para una SINR mínima de -20 dB.	53
Figura 3.14. Comparación Porcentajes de Degradación Obtenidos para Distintos Radios de Celda para una SINR mínima de -20 dB.	54
Figura 3.15. Comparación Porcentajes De Usuarios con Cobertura Obtenidos para Distintos Radios de Celda para una SINR mínima de -20 dB.	54
Figura 3.16. Comparación Promedio De Usuarios con Cobertura para Distintos Radios de Celda para una SINR mínima de -20 dB.....	55
Figura 3.17. Radio de Cobertura Relativo Vs Número de Usuarios por Celda para Control Ideal, Foschini y Sin Control de Potencia, Radio de Celda 0.3 Km y SINR mínima -14 dB.	56
Figura 3.18. Porcentaje de Degradación Relativo Vs Número de Usuarios por Celda para Control Ideal, Foschini y Sin Control de Potencia, Radio de Celda 0.3 Km y SINR mínima de -14 dB	56
Figura 3.19. Porcentaje de Usuarios con Degradación Contra Radio de Cobertura para Foschini para un Radio de Celda de 0.3 Km y SINR mínima de -14 dB.	57
Figura 3.20. Usuarios con Cobertura Vs Número de Usuarios por Celda para Control Ideal, Foschini y Sin Control de Potencia, Radio de Celda 0.3 Km y SINR mínima de -14 dB.	58
Figura 3.21. Potencia de Transmisión para el Primer y Último Usuario con y sin Cobertura para un Radio de Celda 0.3 Km y SINR mínima -14 dB.	60
Figura 3.22. SINR para el Primer y Último Usuario con y sin Cobertura para Radio de Celda 0.3 Km y SINR mínima -14 dB.....	61
Figura 3.23 Histogramas de Potencia para IPC y Foschini para un Radio de Celda de 0.3 Km y SINR mínima de -14 dB	63
Figura 3.24. Histogramas de SINR para Foschini y Sin Control de Potencia para Radio de Celda 0.3Km y SINR mínima -14 dB	64
Figura 3.25. Comparación Radios de Cobertura Relativos Obtenidos para Distintos Radios de Celda para una SINR mínima de -14 dB	65
Figura 3.26. Comparación Porcentajes de Degradación Obtenidos para Distintos Radios de Celda para una SINR mínima de -14 dB.	65
Figura 3.27. Comparación Porcentajes De Usuarios con Cobertura Obtenidos para Distintos Radios de Celda para una SINR mínima de -14 dB.	66
Figura 3.28. Comparación Promedio De Usuarios con Cobertura para Distintos Radios de Celda para una SINR mínima de -14 dB.....	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Características del Escenario de Simulación.....	22
Tabla 2.2. Configuración Escenario de Simulación	38
Tabla 3.1. Distancia desde la Estación Base del Primer y Último Usuario con Cobertura y sin Cobertura para un Radio de Celda de 0.3Km y una SINR mínima de -20 dB.....	46
Tabla 3.2. Distancia desde la Estación Base del Primer y Último Usuario con Cobertura y sin Cobertura para un Radio de Celda de 0.3Km y una SINR mínima de -14 dB.....	59
Tabla 3.3. Tabla Resumen de Resultados para el Algoritmo de Foschini.	68

LISTA DE ACRÓNIMOS

ACI	: <i>Adjacent Channel Interference</i> , Interferencia de Canal Adyacente
BER	: <i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
CCI	: <i>Co-Channel Interference</i> , Interferencia Co-Canal
CDMA	: <i>Code Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Código.
CIR	: <i>Carrier to Interference Ratio</i> , Relación Portadora a Interferencia.
CPC	: <i>Centralized Power Control</i> , Control de Potencia Centralizado.
DPC	: <i>Distributed Power Control</i> , Control de Potencia Distribuido.
ETSI	: <i>European Telecommunications Standards Institute</i> , Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones.
FDMA	: <i>Frequency Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia.
FER	: <i>Frame Error Rate</i> , Tasa de Error de Trama.
ICI	: <i>Intercarrier Interference</i> , Interferencia Intercelda
IPC	: <i>Ideal Power Control</i> , Control Ideal de Potencia.
MSB	: <i>Micro Base Station</i> , Micro Estación Base.
NLOS	: <i>Non-Line-of-Sight</i> , Línea de Vista.
PC	: <i>Power Control</i> , Control de Potencia.
QoS	: <i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio.
RF	: <i>Radio Frequency</i> , Radio Frecuencia.
RRM	: <i>Radio Resource Management</i> , Gestión de Recursos Radio.
SDMA	: <i>Spatial Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Espacio.
SINR	: <i>Signal to Interference Plus Noise Ratio</i> , Relación Señal a Interferencia más Ruido.
SIR	: <i>Signal to Interference Ratio</i> , Relación Señal a Interferencia.
TDMA	: <i>Time Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Tiempo.
UE	: <i>User Equipment</i> , Equipo de Usuario.
UL	: <i>Up Link</i> , Enlace de Subida.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha presentado un crecimiento en el campo de las comunicaciones inalámbricas, evolucionando constantemente a través de diferentes tecnologías para brindar una mayor cobertura y capacidad, en un espectro y potencia de transmisión limitados; debido a éstas y otras limitaciones inherentes del canal de transmisión, la Gestión de Recursos Radio (RRM, *Radio Resource Management*) es imprescindible para utilizar los recursos y la infraestructura de red eficientemente entre todos los terminales del sistema de comunicaciones [1].

El principal propósito del Control de Potencia (PC, *Power Control*) es encontrar una relación adecuada de equilibrio entre la obtención de una alta Relación Señal a Interferencia (SIR, *Signal to Interference Ratio*) y bajo consumo de energía [2], de esta forma un Control de Potencia (PC) adecuado permite aumentar el tiempo de vida útil de las baterías de los dispositivos móviles y reducir la interferencia, a la vez que mejora la cobertura y capacidad de los usuarios en el sistema, sin disminuir la Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) para los mismos [3]. En este contexto, el interés de este trabajo de grado se centra en evaluar la cobertura o alcance (espacio geográfico) en un modelo de simulación de un sistema celular, con única portadora, empleando el Control de Potencia de Transmisión (TPC, *Transmit Power Control*).

El trabajo de grado propuesto modela el proceso de Control de Potencia (PC) a nivel de sistema, mediante el algoritmo distribuido de Foschini, centrándose en el enlace de subida el cual presenta mayores retos, puesto que el consumo de potencia en el dispositivo móvil es mucho más importante que en la base y la interferencia intracelular de un enlace descendente es mucho más pequeña en comparación con la del enlace ascendente, ya que el mantenimiento de la ortogonalidad de la asignación de recursos¹ para un dispositivo móvil en el enlace descendente se logra fácilmente desde la estación base [4]

Este documento se divide en cuatro capítulos estructurados de la siguiente manera: el capítulo 1 presenta los aspectos generales del sistema de comunicación modelado y la

¹Por ejemplo, asignación de código en Acceso Múltiple por División de Código (CDMA, *Code Division Multiple Access*), asignación de tono en Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), o la frecuencia y asignación de ranura de tiempo en el Sistema Global de Comunicaciones móviles (GSM, *Global System for Mobile*).



teoría introductoria sobre Control de Potencia (PC) y el algoritmo de Foschini. En el capítulo 2 se describe la metodología de desarrollo empleada para la realización de este trabajo de grado, donde se plantea el diseño del modelo, los diagramas de bloques y diagramas de flujo del sistema. El Capítulo 3 muestra los resultados y el análisis de los datos obtenidos después de implementar a nivel de simulación el algoritmo de Foschini y su validación con el Control Ideal de Potencia (IPC, *Ideal Power Control*) y la supresión de cualquier técnica de Control de Potencia en el sistema. Finalmente, el capítulo 4 presenta las conclusiones del trabajo de grado y posibles trabajos futuros a desarrollar en esta área.

CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

1.1. SISTEMA DE COMUNICACIONES INALÁMBRICO

Comunicación inalámbrica expresa la transmisión de información de un lugar a otro suprimiendo el uso de cables, esta comunicación puede ser en un sentido como los sistemas *broadcast* (por ejemplo televisión y radio) o en dos sentidos (por ejemplo sistemas celulares). La comunicación inalámbrica puede ser vía radio frecuencia (RF, *Radio Frequency*), microondas o infrarrojo. En general las redes inalámbricas usan ondas electromagnéticas para transportar la información [5].

El diagrama de bloques general de un sistema de comunicaciones está representado por la figura 1.1, esta representación descrita originalmente por Shannon (1948) aplica a todos los tipos de sistema de comunicación, incluyendo inalámbricos [6]. A continuación se describen sus componentes.

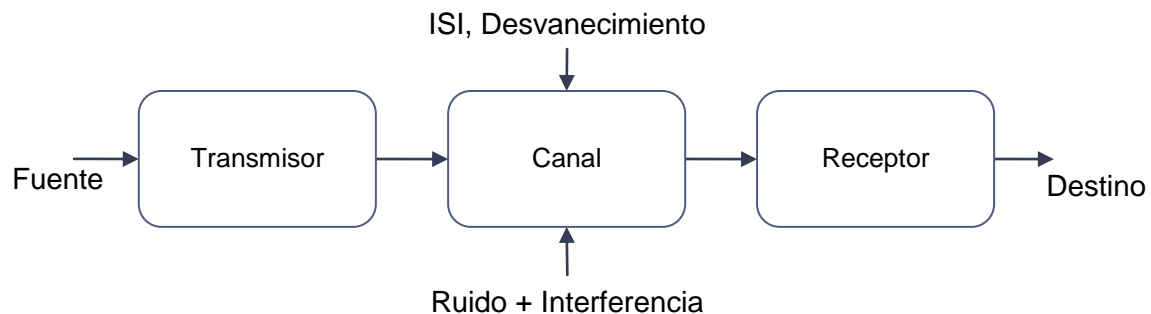


Figura 1.1. Diagrama de Bloques Simplificado de un sistema de Comunicaciones. Adaptado de [7]

1.1.1. Transmisor

Es la unidad encargada de procesar la señal de información para que sea apta para su transmisión en el medio (canal). Básicamente el transmisor está compuesto de tres unidades: procesamiento de datos de origen, robustez de los datos y modulación de la señal, como se observa en la figura 1.2 [7].

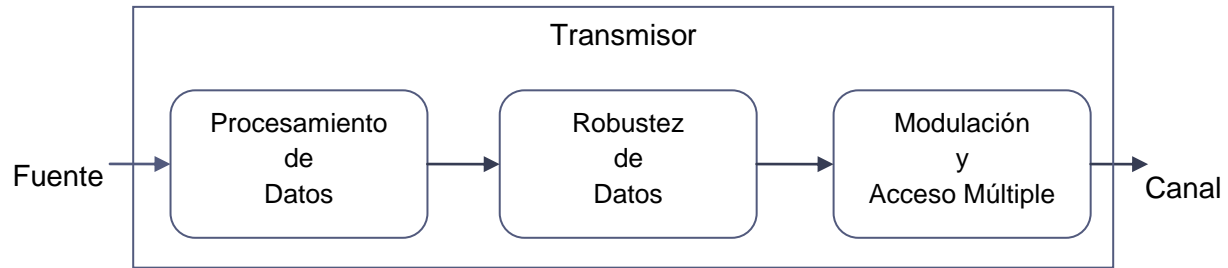


Figura 1.2. Representación General de Transmisores. Adaptado de [3]

En el procesamiento de datos de origen se encuentran los filtros que determinan el ancho de banda de la señal. Para una fuente analógica y un sistema de comunicación digital existirían un muestreo, una conversión análoga a digital y posiblemente compresión de los datos.

La robustez de los datos representa todos los procesos realizados en la señal de información para incrementar su inmunidad ante el comportamiento impredecible y ruido presentes en el medio de transmisión, con la finalidad de lograr la recepción exitosa en el receptor. Ya que en las comunicaciones inalámbricas la información es transmitida mediante ondas electromagnéticas en el espacio, el cual contiene un número casi infinito de diferentes señales, el receptor debe ser capaz de captar la señal emitida y filtrarla del ruido y las interferencias asociadas, como también de la distorsión. En sistemas de comunicación digital, la unidad de robustez puede consistir en codificación de canal y procesos de pre-filtrado.

La unidad de modulación se encarga de transportar las señales de información sobre una señal portadora, la cual es usualmente una señal sinusoidal. Cualquier señal sinusoidal está definida por tres parámetros: amplitud, frecuencia y fase. Esto hace posible transportar la señal de información representada sobre cualquiera de esos parámetros, por tanto, se tienen tres tipos de técnicas de modulación: modulación de amplitud (o modulación por desplazamiento de amplitud en terminología de comunicaciones digitales), modulación de frecuencia (o modulación por desplazamiento de frecuencia) y modulación de fase (o modulación por desplazamiento de fase). Es posible también el uso de diferentes métodos de modulación juntos como por ejemplo modulación de amplitud y fase.

Otro aspecto importante de la unidad de modulación es la posibilidad de acceso múltiple, lo cual significa multi-uso del canal entre varios operadores, usuarios, servicios, etc. Existen diferentes clases de métodos de acceso múltiple tales como: acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA, *Frequency Multiple Access*), acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*), acceso múltiple por división de código (CDMA, *Code Division Multiple Access*), acceso múltiple por división de espacio (SDMA, *Spatial Division Multiple Access*) y acceso múltiple por detección de portadora (CSMA, *Carrier Sense Multiple Access*) [7].

1.1.2. Canal Inalámbrico

El medio para las comunicaciones inalámbricas es el espacio abierto, el cual se encuentra conformado por la interacción de las ondas electromagnéticas con objetos naturales como las capas atmosféricas, nubes, niebla, lluvia, árboles, montañas y objetos hechos por el hombre, por ejemplo, edificios y carros [8]. Específicamente en el canal inalámbrico las fuentes de ruido pueden ser subdivididas en efectos multiplicativos y aditivos como se muestra en la figura 1.3 [6]. El ruido aditivo proviene del ruido generado en el receptor (ruido térmico y de disparo) y el generado por fuentes externas como los efectos atmosféricos, radiación cósmica e interferencia de otros transmisores u objetos electrónicos. Algunas de estas interferencias pueden ser intencionalmente introducidas y cuidadosamente controladas, como cuando los canales son reusados a fin de maximizar la capacidad de un sistema.

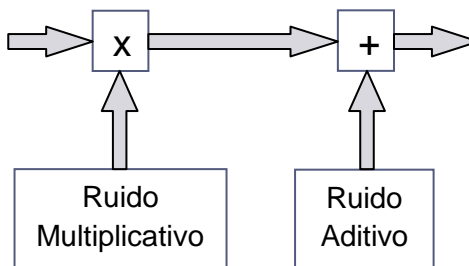


Figura 1.3. Dos Tipos de Ruido en el Canal de Comunicación Inalámbrico. Adaptado de [6]

El ruido multiplicativo es generado por diferentes procesos que ocurren en la onda transmitida desde la antena transmisora a la receptora, algunos de ellos son: las características direccionales de ambas antenas, reflexión (de superficies lisas de muros y colinas), absorción (de muros, árboles y atmósfera), dispersión (de superficies desiguales como el mar, tierra desigual y las hojas y ramas de árboles), refracción (debido a las capas atmosféricas) y difracción (de bordes como tejados de edificios) [6].

Es usual dividir los procesos multiplicativos en el canal en tres tipos de desvanecimientos: pérdidas de trayecto, desvanecimiento sombra (o lento) y desvanecimiento rápido (ó multitrayecto), los cuales aparecen como procesos variantes entre las antenas como se muestra en la figura 1.4. Todos estos procesos varían relativamente con el cambio de posición del transmisor y el receptor y cuando algunos objetos contribuyentes o materiales entre las antenas son movidos [6].

1.1.3. Receptor

El receptor es el circuito encargado de recuperar la señal original de las modificaciones intencionales (modulación, codificación, etc.) y las distorsiones inherentes al canal (ruido,



interferencias, etc.). El receptor puede ser simplificado en tres unidades como se muestra en la figura 1.5. Como primer paso se encuentran los filtros pasa-banda a fin de rechazar todas las señales diferentes a la banda de interés y seguido se tiene el proceso de demodulación. La recuperación de datos es la unidad que usa todo el procesamiento de datos inverso del transmisor para mejorar la confiabilidad de la recepción. Finalmente, en la parte de procesamiento de datos se recupera la señal aproximándola tanto como sea posible a su forma original. Por último la señal es entregada al dispositivo (pantalla, altavoz, puerto de entrada computador, etc.) [7].

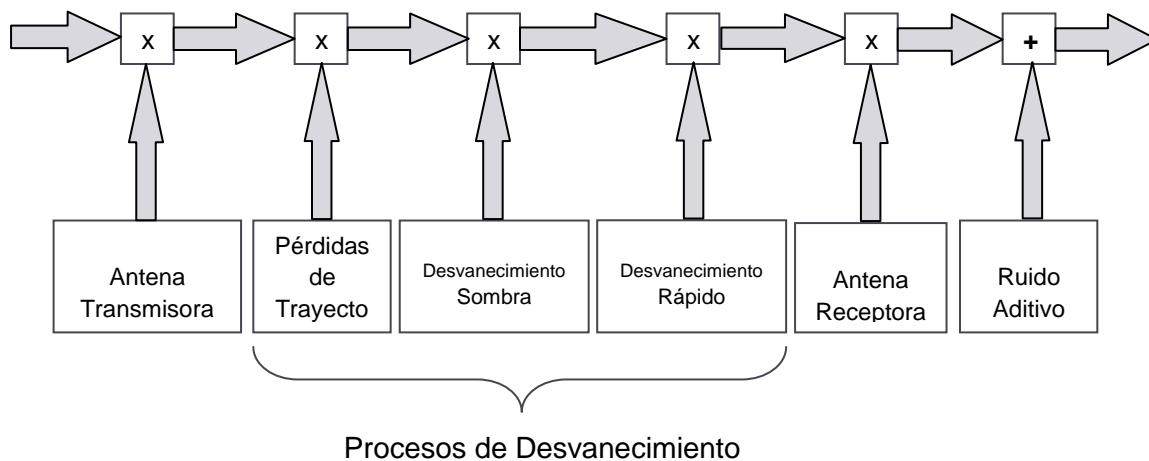


Figura 1.4. Contribuciones de Ruido en el Canal Inalámbrico. Adaptado de [6]

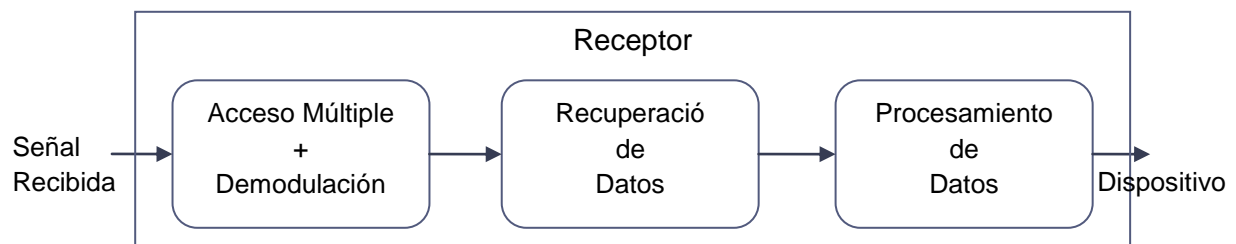


Figura 1.5. Estructura Simplificada de un Receptor Inalámbrico. Adaptado de [7]

1.2. ESTRUCTURA CELULAR

La comunicación celular está diseñada para mejorar la eficiencia del espectro como también la capacidad y cobertura del sistema mientras se mantiene la calidad de la señal deseada. El principio central de la comunicación celular es dividir una extensa área geográfica en un número de pequeñas áreas geográficas contiguas llamadas celdas (ó células) [9]. La forma y los límites de una celda están determinados por su estación base (localizada

aproximadamente en el centro de la celda), la cual provee el radio de cobertura. Usualmente la cobertura celular es representada por una estructura hexagonal, sin embargo, en la práctica la forma de las celdas se encuentra determinada por restricciones como la topografía local y el nivel deseado en la señal recibida [10].

Aunque en la práctica las celdas son de forma arbitraria y similar a un círculo (patrón ideal de radiación de una antena omnidireccional), el modelo de celda hexagonal, es la aproximación más cercana a una circunferencia, dado que para un determinado radio (la mayor distancia posible entre los puntos del perímetro y el centro de un polígono), el hexágono tiene mayor área [11], además ésta forma permite subdividir una región extensa en hexágonos de igual tamaño no traslapados entre sí, figura 1.6. Octágonos y decágonos son formas más cercanas a un círculo pero no son usados para modelar celdas porque no permiten subdividir un área mayor en subáreas del mismo tamaño no traslapadas.

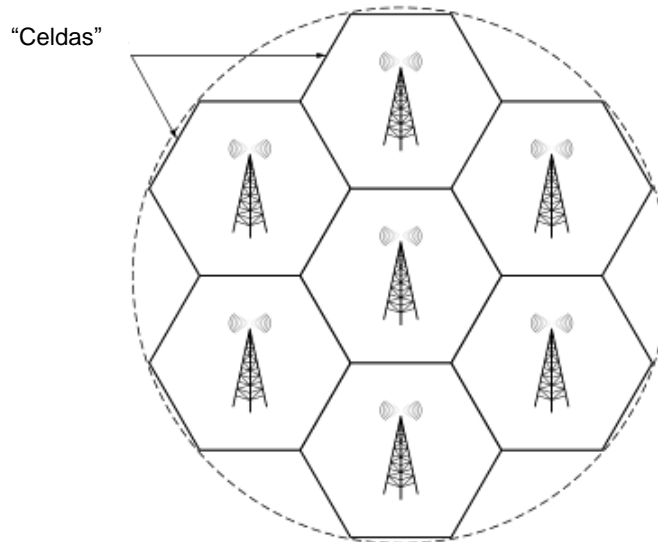


Figura 1.6. Uso de hexágonos para Representar Cobertura Celular. Adaptado de [12]

1.2.1. Jerarquía Celular

En la práctica, en un sistema celular existen diferentes tamaños de celdas los cuales son desplegados en una red celular a fin de proporcionar un área de cobertura exhaustiva y adaptarse a la Calidad de Servicio (QoS), y aplicaciones demandadas por diferentes áreas geográficas. La red es distribuida en forma jerárquica con diferentes tamaños de celdas como son, femtoceldas, picoceldas, microcelda, macroceldas y megaceldas como se aprecian en la figura 1.7.

Las femtoceldas son las celdas más pequeñas, desarrolladas con estaciones base de baja potencia, bajo costo y fácil integración; son usadas para interconectar dispositivos



inalámbricos personales como celulares, portátiles y tabletas, dentro de unos pocos metros, brindan cobertura en escenarios interiores como pequeñas oficinas y hogares. Las pico celdas son celdas pequeñas dentro de edificios que soportan redes de área local (WLANs, *wireless local area network*), su diámetro varía entre 20 m y 100 m. Las microceldas son celdas con un diámetro entre 100 y 1000 metros, usadas para peatones en las calles y edificios residenciales o de oficinas en áreas urbanas densas. Las macroceldas cubren áreas metropolitanas de varios kilómetros, se encuentran en ambientes vehiculares y de antenas altas como áreas rurales y suburbanas. Por último se encuentran las megaceldas usadas en sistemas satelitales para cubrir áreas a nivel nacional o global. El sistema seleccionado estará conformado por microceldas.

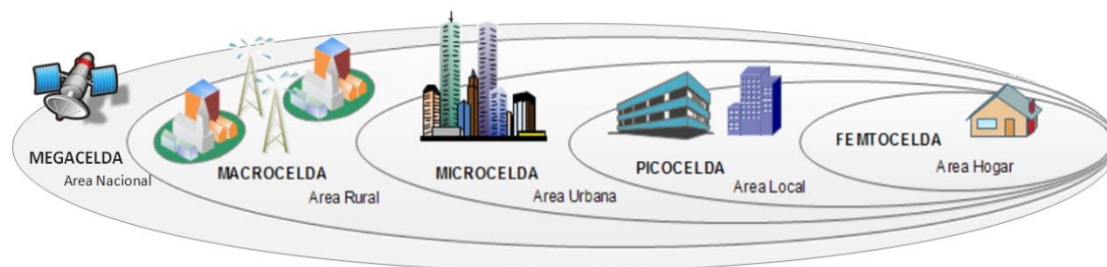


Figura 1.7. Áreas de Cobertura para Diferentes Tamaños de Celdas. Adaptado de [13]

1.2.2. Interferencia en un Sistema Celular

La interferencia es el mayor factor limitante del desempeño de los sistemas celulares. La interferencia cocanal (CCI, *Co-Channel Interference*) y la interferencia adyacente (ACI, *Adjacent Channel Interference*) son los dos tipos de interferencias principales de los sistemas celulares [14]. Los sistemas multiusuario (por ejemplo CDMA) son limitados en interferencia, lo cual significa que los usuarios en el sistema no son limitados por los parámetros del canal como desvanecimiento y ruido en el receptor, pero sí seriamente limitados por interferencia [12]. Otras interferencias como son: interferencia de intermodulación, interferencia intercelda (ICI, *intercarrier Interference*) e Interferencia intersímbolo pueden también originarse.

1.2.3. Capacidad y Cobertura

La capacidad de un sistema puede entenderse como el número máximo de usuarios por celda a los que el sistema puede atender simultáneamente [15], la capacidad de los sistemas celulares es negativamente afectada debido a la imposibilidad de reutilizar todos los canales en células contiguas, esto dado que varios usuarios utilizan el mismo canal de frecuencia en el mismo instante generando interferencia lo cual disminuye la SINR y la sensibilidad de los



receptores, lo que a su vez disminuye la máxima pérdida de trayecto permitida en el enlace, desencadenando en la disminución de la cobertura o alcance del sistema [16]. Lo anterior explica la estrecha relación existente entre la capacidad y la cobertura de la celda, pues cuando una celda se encuentra muy congestionada, la interferencia es mayor, por consiguiente la cobertura es menor.

Los sistemas de cobertura zonal, como por ejemplo los sistemas celulares y sistemas móviles, tienen el objetivo de brindar servicio en cualquier punto de la zona de cobertura, lo cual no es siempre posible debido a las limitaciones del canal y las variadas situaciones de propagación presentes en el sistema, por ello la importancia de la predicción de cobertura y características de las estaciones para brindar una determinada cobertura.

Los enlaces entre la estación base y los equipos de usuario resultan afectados de forma variable por las características del terreno, por lo tanto las pérdidas de propagación tienen un carácter aleatorio, de forma que “únicamente puede hablarse de cobertura en un sentido estadístico” [17]. Se utilizan dos grados de calidad estadística de cobertura: el porcentaje de emplazamientos² y el porcentaje de tiempo³. En el porcentaje de emplazamientos debe distinguirse entre cobertura zonal y perimetral, dado que la primera se refiere a toda el área alrededor de la estación base y la segunda afecta a una zona anular situada en el límite de cobertura teórica.

Las estaciones base es común ubicarlas en lugares muy altos debido a la relación que existe entre el radio de cobertura de la misma y la altura de la antena respecto al terreno circundante, lográndose, en determinados casos, aumentar el alcance de forma similar o incluso mayor que si se incrementara la potencia de transmisión [17].

1.3. MODELO DE PROPAGACIÓN

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos utilizados para representar las características radio de un entorno determinado [18]. Los modelos de predicción para la pérdida básica de propagación pueden dividirse de forma general en empíricos (también llamados estadísticos) o teóricos (también llamados deterministas), o una combinación de estos dos llamados semi-empíricos. Mientras que los modelos empíricos están basados en mediciones, los modelos teóricos se basan en los principios fundamentales de los fenómenos de propagación de las ondas radio (leyes de maxwell). En los modelos empíricos, todas las influencias ambientales se toman en cuenta independientemente de si pueden ser reconocidas por separado, siendo ésta la principal ventaja de estos modelos [18].

² Porcentaje de emplazamientos es el porcentaje de lugares dentro de la zona de cobertura teórica en que se espera exista enlace radioeléctrico

³ Porcentaje de tiempo se refiere al tanto por ciento de tiempo en que se espera existirá el enlace.



Los modelos deterministas se basan en los principios de la física que pueden ser aplicados a diferentes entornos sin afectar la precisión, en la práctica, su aplicación por lo general requiere de extensas bases de datos de características ambientales, que es a veces poco práctico o imposible de obtener. Por esa razón, la implementación de los modelos deterministas comúnmente se limita a áreas más pequeñas de microceldas ó a ambientes interiores [18].

Basándose en el tipo de entorno, los modelos de predicción se pueden clasificar en dos categorías principales, modelos de propagación para interiores y exteriores. Además, en relación al tamaño del área de cobertura, los modelos de propagación se pueden subdividir en dos clases adicionales, modelos de predicción de macroceldas y microceldas.

Selección del modelo: para este estudio se escogió el modelo de pérdidas de trayecto para ambientes de prueba de transeúntes para exteriores a interiores (*Path loss model for outdoor to indoor and pedestrian test environment*) definido en la sección B.1.4.1.2 de la recomendación TR 101 112 V3.2.0 del Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*) [19]. El escenario al que se aplica este modelo se caracteriza por pequeñas celdas y baja potencia de transmisión. Las estaciones base con antenas a baja altura son localizadas en exteriores, los usuarios transeúntes son localizados en calles o dentro de edificios. Este modelo es válido para casos Sin Línea de Vista (NLOS, *Non-Line-of-Sight*) y describe el peor caso de propagación, es utilizado para evaluar la cobertura y permitir evaluaciones simples de capacidad. El desvanecimiento Log-normal o por sombra con una desviación estándar igual a 10 dB para exteriores y 12 dB para interiores es razonable [19], el cual se incorpora en el modelo mediante una variable aleatoria con distribución normal.

1.4. CONTROL DE POTENCIA

El Control de Potencia (PC), conocido como Control de Potencia de Transmisión (TPC) representa un papel fundamental en el diseño de redes, dado que comprende las técnicas y algoritmos que permiten manejar y ajustar la potencia transmitida con el objetivo de mejorar parámetros críticos en el desempeño de las redes de comunicaciones inalámbricas, permitiendo optimizar la Calidad de Servicio (QoS) para todos los usuarios [20]. El Control de Potencia (PC) es una de las técnicas más importantes de manejo de interferencia, parámetro que afecta negativamente la capacidad, cobertura y el rendimiento de las redes, por ende, el Control de Potencia (PC) desempeña un importante papel en la eficiencia de la red al mitigar la interferencia y permitir además minimizar el consumo de energía y a su vez prolongar el tiempo de vida de las baterías de los diferentes dispositivos móviles.

El objetivo principal de los algoritmos de Control de Potencia (PC) es mantener el nivel de potencia de transmisión del transmisor en la potencia mínima requerida para alcanzar la



Calidad de Servicio (QoS) deseada en cada enlace. La Calidad de Servicio (QoS) incluye una serie de requerimientos que deben ser cumplidos entre los que se encuentra la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*), velocidad de datos, probabilidad de interrupción y retraso, entre otros. Uno de los indicadores más utilizados de Calidad de Servicio (QoS) es la Relación Señal a Interferencia (SIR) o la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*) dado que la mayoría de los parámetros de Calidad de Servicio (QoS) pueden ser directa o indirectamente relacionados con la SINR [7].

Los primeros trabajos de Control de Potencia (PC) se enfocaron en la Relación Señal a Interferencia (SIR) de todos los radio enlaces mediante el Control de Potencia Centralizado (CPC, *Centralized Power Control*). Posteriormente se desarrollaron esquemas distribuidos de SIR-balanceada, ocupándose de mantener la Calidad de Servicio (QoS) requerida en cada enlace. En particular los primeros algoritmos descentralizados fueron aplicados en sistemas satelitales en los años 1970 [21]. Los estudios de Control de Potencia (PC) en redes celulares de forma centralizada comenzaron en los años 1990 con el trabajo de Zander [22] más adelante Foschini y Miljanic proponen un modelo más general y realista tomando en cuenta el ruido en receptor y un objetivo específico de relación Señal a Ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) [23], este trabajo desencadena en numerosas publicaciones de diversos autores que extendieron el algoritmo original para problemas adicionales. Algoritmos distribuidos para Control de Potencia (PC) han sido considerados desde diferentes aspectos como asignación de estación base, usando Tasa de Error de Bit (BER) como métrica e integración con receptores multiusuarios con protección de enlace activa [24]. Recientemente el Control de Potencia (PC) para nuevos tipos de redes inalámbricas están siendo extensamente estudiados por ejemplo redes ad hoc manet-vanet, redes radio cognitivas, redes de femtoceldas en dos niveles [25].

1.4.1. Clasificación de Esquemas de Control de Potencia

Según el sentido de la comunicación los esquemas de Control de Potencia (PC) pueden dividirse en Control de Potencia (PC) para el enlace de subida o Control de Potencia (PC) para el enlace de bajada.

- *En el enlace de subida*, es decir de las estaciones móviles a las estaciones base, el Control de Potencia (PC) enfrenta varios problemas, entre ellos se encuentra la potencia limitada por la batería de los dispositivos móviles y el problema cerca/lejos (near/far), efecto debido a que aunque los usuarios se encuentran localizados a diferentes distancias de la estación base, si un móvil cercano a la estación base transmite con un nivel de potencia muy elevado, causaría mucha interferencia a las estaciones móviles que se encuentran lejanas. Por ello se debe contar con algoritmos rápidos y eficientes de Control de Potencia (PC), para reducir el nivel de interferencia y maximizar la capacidad y evitar que los móviles que se encuentran cerca de la estación base interfieran demasiado y se disminuya considerablemente la capacidad y la cobertura del sistema.

- *En el enlace de bajada*, de la estación base a la estación móvil, entre los objetivos del Control de Potencia (PC) esta minimizar la interferencia que las estaciones móviles experimentan de diferentes estaciones base cercanas a los límites de la celda [26].

Acorde a si existe o no realimentación las técnicas de Control de Potencia (PC) pueden clasificarse en lazo cerrado y lazo abierto, representados en la figura 1.8.

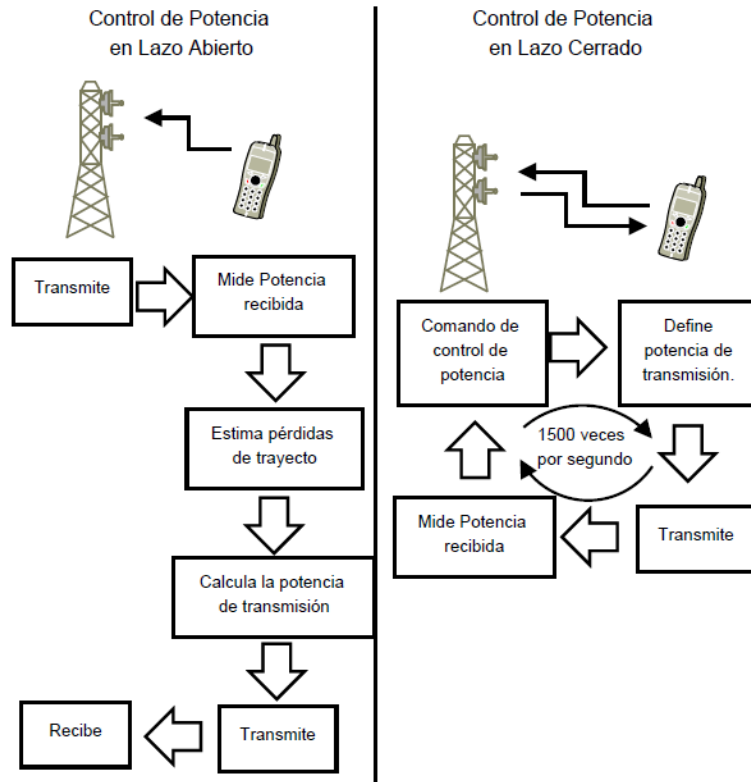


Figura 1.8. Control de Potencia en Lazo Abierto y Lazo Cerrado. Tomado de [16]

- *Lazo abierto*: el Control de Potencia (PC) de lazo abierto no requiere retroalimentación de la estación base; la estación móvil mide la intensidad de la señal piloto transmitida por la estación base y ajusta su nivel de potencia de transmisión de forma inversamente proporcional al nivel de potencia de la señal piloto, a mayor intensidad de la señal piloto recibida, menor será la potencia de transmisión de la estación móvil. Esta técnica permite compensar las pérdidas de propagación y variaciones a gran escala como desvanecimiento por sombra, pero no compensa el desvanecimiento multitrayecto dado que los enlaces de subida y de bajada no se encuentran totalmente correlacionados [27].
- *Lazo cerrado*: en la técnica de Control de Potencia (PC) de lazo cerrado las mediciones se realizan en la estación base y los resultados se envían de nuevo a la estación móvil



transmisora de modo que pueda ajustar su nivel de potencia de transmisión. Este método da mejores resultados que el método de lazo abierto, pero no puede reaccionar a los cambios rápidos de las condiciones del canal.

Existe una técnica llamada Control de Potencia (PC) de lazo cerrado rápido, utilizada por sistemas CDMA, en esta técnica la SIR es medida en cada ranura de tiempo y basado en ese valor se decide si aumentar o disminuir la potencia de transmisión en el otro lado del enlace. Los bits de Control de Potencia de Transmisión (TPC) son enviados en cada ranura de tiempo en los enlaces ascendente y descendente donde no existen señales neutras, todas las señales de Control de Potencia (PC) contienen una orden, la cual puede ser de reducción o aumento. El Control de Potencia (PC) de lazo cerrado rápido es también llamado Control de Potencia de lazo interno (*inner loop*), el mecanismo en el enlace de subida contiene también otro lazo llamado lazo exterior (*outer loop*), cuya función dentro de la estación base es ajustar el valor de SIR requerida (SIR objetivo), el cual es usado después por el lazo interno [1]. Diferentes tipos de canal, caracterizados por parámetros de canal (por ejemplo. codificación) pueden requerir diferentes valores de SIR objetivo. El resultado final del proceso de transmisión sólo es conocido después de la codificación, y el parámetro de calidad es después usado para ajustar el valor de la SIR requerida. Si el valor de SIR utilizada ofrece un flujo de bits bajo, entonces el lazo exterior debe incrementar el valor de la SIR objetivo. Éste cambio en el lazo exterior obliga al lazo interno a incrementar la potencia de transmisión de la estación móvil consecuentemente. Este proceso se representa en la figura 1.9. En el enlace de bajada el proceso es similar al del enlace de subida; el valor de SIR de la señal recibida se mantiene tan cerca como sea posible al valor de la SIR objetivo, enviando comandos de Control de Potencia (PC), realizados por el lazo interno. El lazo exterior en la estación móvil se encarga de ajustar el valor de la SIR objetivo [28].

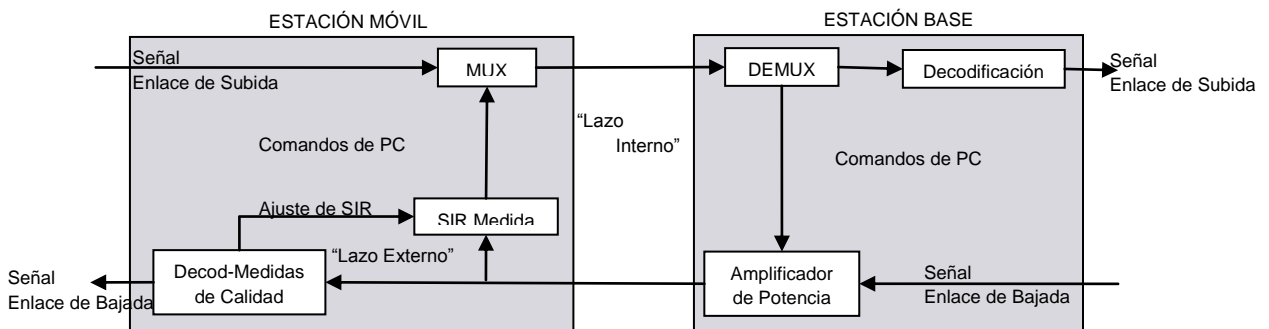


Figura 1.9. Control de Potencia de Lazo Cerrado en Enlace de Subida. Adaptado de [28]

Conforme a qué medida es utilizada para realizar el Control de Potencia (PC), las técnicas de Control de Potencia (PC) pueden clasificarse en:



- *Intensidad de potencia:* en los esquemas basados en la intensidad de potencia se mide la intensidad de la señal proveniente de un móvil al llegar a la estación base, a fin de determinar si la intensidad es mayor o menor a la deseada, en consecuencia, se envía el orden de aumentar o disminuir la potencia [20].
- *Basado en SINR:* en estos esquemas la cantidad medida es la SINR, donde la interferencia está conformada por ruido de canal e interferencia multiusuario. Este tipo de esquemas reflejan mejor el rendimiento del sistema (como capacidad y QoS) que los esquemas basados en intensidad de potencia, pero es importante tener en cuenta que asociado a los esquemas basados en SINR, se encuentra el problema de realimentación positiva, el cual surge en situaciones donde una estación móvil bajo instrucciones de la estación base aumenta el nivel de potencia de transmisión a fin de lograr la SINR requerida en la estación base, este incremento de nivel de potencia incrementa igualmente la interferencia a otros móviles, viéndose obligados a incrementar también su nivel de potencia de transmisión a fin de mantener la calidad del enlace, por tanto la interferencia también incrementa dando como resultado la realimentación positiva [20], [27].
- *Basado en BER:* en esta técnica la tasa de error de bit es utilizada como un número promedio de error de bits comparados con la secuencia original. Dado que la codificación de canal es implementada en todos los sistemas prácticos, el Control de Potencia (PC) también puede estar basado en un número promedio de tramas erróneas, la tasa de error de trama (FER, *Frame Error Rate*) puede ser utilizada para medir la calidad de usuario (QoS) y evaluar las condiciones de los usuarios. Para medir la BER exacta el sistema debe tener algo de retraso para acumular un número suficiente de muestras [20].

Como se mencionó anteriormente la clasificación principal de los algoritmos de Control de Potencia (PC) pueden ser acorde a la señalización y la arquitectura de control empleada en dos grandes grupos: algoritmos centralizados y descentralizados (o distribuidos) cuyas características se explican a continuación [8] :

- *Control de potencia centralizado:* en un esquema de CPC, un controlador central, la estación base controladora o centro de conmutación móvil tiene conocimiento de todos los radioenlaces en el sistema, es decir, las potencias de transmisión, potencias de recepción y tasas de error de bit en todas las combinaciones estación base - estación móvil. Asumiendo que el sistema tiene interferencia, un algoritmo de optimización puede ser implementado para maximizar la SIR en el sistema igualándola en todos los radioenlaces. Este esquema es difícil de implementar dado que el controlador centralizado tiene que mantener dinámicamente guardados todos los enlaces en el sistema y estimar las potencias de transmisión de cada terminal móvil [29], [30], [8].



Entre las ventajas del Control de Potencia Centralizado (CPC) se encuentra que es síncrono y no iterativo, entre las desventajas, que la complejidad computacional y los costos de la estimación de canal incrementa rápidamente cuando el número de usuarios es grande, especialmente para las redes inalámbricas con topología distribuida como en los casos multicelular [20].

- *Control de potencia distribuido*: opuesto al Control de Potencia centralizado (CPC), en la implementación distribuida se emplean varios controladores descentralizados, donde cada uno de forma individual controla la potencia de los transmisores bajo su administración; el control de potencia distribuido (DPC, *Distributed Power Control*) debe ser capaz de ajustar de forma iterativa los niveles de potencia de transmisión de cada señal usando únicamente medidas locales, como la relación señal a ruido o la ganancia de canal del usuario específico. En el DPC los receptores miden la interferencia en el enlace y comunican esta información a su transmisor, de tal forma que cada enlace decide autónomamente cómo ajustar su potencia con base en la información encontrada exclusivamente en él, realizándose la toma de decisiones totalmente a nivel de enlace [23], [8], [31], [32].

Una función clave para los algoritmos distribuidos es el tiempo de convergencia, si la situación es estacionaria, entonces el tiempo de convergencia no importa; sin embargo, si la condición de la red está cambiando, entonces el tiempo de convergencia del algoritmo de Control de Potencia (PC) tiene que ser más rápido que la tasa de cambio. Otra función es ocuparse de la posibilidad de inestabilidad; específicamente, eventos repentinos que den lugar a interrupciones temporales en la red y que tan rápido este tipo de situación puede ser detectada y mitigada por el algoritmo de Control de Potencia (PC) [1].

1.5. FOSCHINI ALGORITMO DE CONTROL DE POTENCIA DISTRIBUIDO

El algoritmo de Control de Potencia Distribuido (DPC) Foschini mejor conocido como Foschini Miljanic (FM) [33], se describe como un algoritmo distribuido y autónomo porque se basa sólo en información local, utiliza la SIR ó la SINR medida instantáneamente en el receptor, sin necesidad de comunicación (y cooperación) entre enlaces [34], [35], cada receptor retroalimenta ajustes de potencia a su respectivo transmisor [36]. El objetivo del algoritmo es ajustar las potencias de transmisión de tal forma que la SINR en cada receptor alcance un determinado umbral requerido para un rendimiento aceptable [34].

La red inalámbrica se encuentra conformada por N usuarios, a cada enlace le corresponde un transmisor y un receptor, o en otras palabras una base y un usuario. Donde: p_i es la potencia de transmisión del usuario i , $g_{ii}p_i$ es la intensidad de la señal recibida en el enlace i . g_{ij} Corresponde a la ganancia del sistema en el transmisor j al receptor del enlace (usuario) i . La potencia de interferencia recibida en el usuario i , causada por otros transmisores en la



red es $g_{ij}p_j$ y v el ruido térmico en el receptor i . La calidad de cada enlace es determinada por la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) en el receptor [33]

$$SINR \text{ del enlace } i = R_i = \frac{g_{ii}p_i}{\sum_{j \neq i} g_{ij}p_j + v} \quad (1.1)$$

Cada enlace tiene una SINR umbral mínima que debe cumplirse para satisfacer los requisitos de Calidad de Servicio (QoS) y cobertura, la SINR objetivo en el enlace i se denota como $\gamma_i > 0$, por consiguiente se requiere,

$$\frac{g_{ii}p_i}{\sum_{j \neq i} g_{ij}p_j + v} \geq \gamma_i \quad (1.2)$$

La ecuación (1.2) después de manipulación matemática es equivalente a la ecuación 1.3.

$$p_i \geq \gamma_i \left(\sum_{j \neq i} \frac{g_{ij}}{g_{ii}} p_j + \frac{v}{g_{ii}} \right) \quad (1.3)$$

En forma matricial, para una red compuesta de N pares de comunicación, la ecuación (1.3) es escrita y expresada como lo muestra la ecuación (1.4),

$$p \geq RGp + \eta \quad (1.4)$$

Dónde R es una matriz con los elementos del vector γ_i en su diagonal y sus otros elementos con ceros (Es la matriz diagonal γ_i), $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ el vector columna de potencias de tamaño N, la matriz G de tamaño N x N con ceros en su diagonal y la relación $\frac{g_{ij}}{g_{ii}}$ en sus otros elementos como se expresa en la ecuación (1.5). Finalmente el vector columna η de tamaño N se denota en la ecuación (1.6)

$$G_{ij} = \begin{cases} 0, & i = j, \\ \frac{g_{ij}}{g_{ii}}, & i \neq j. \end{cases} \quad (1.5)$$

$$\eta_i = \frac{\gamma_i v}{g_{ii}} \quad (1.6)$$

A fin de reducir la ecuación (1.4), se expresa el producto de las matrices RG como una matriz C en la ecuación (1.7)

$$C = RG \quad (1.7)$$

Entonces al despejar η , factorizando p y reemplazando la ecuación (1.7) en (1.4), se obtiene la ecuación (1.8)

$$(I - C)p \geq \eta \quad (1.8)$$



La matriz C tiene elementos no negativos y es irreducible [37], por el teorema de Perron-Frobenius, el máximo valor propio de C , ρC , es real, positivo y su correspondiente vector propio es componente a componente positivo. Por otra parte, la existencia de un vector $p \geq 0$ que satisface la ecuación (1.8) es equivalente a $\rho C < 1$ y también al hecho de que la matriz inversa $(I - C)^{-1}$ existe y es positiva. Si alguna de estas condiciones se cumplen, entonces el vector de potencia p^* indicado en la ecuación (1.9) es la solución que satisface todos los umbrales mínimos SINR simultáneamente, es decir, es la solución que minimiza la potencia de transmisión de cada usuario, una situación claramente deseable. Esta asignación de potencias es conocida como Control Ideal de Potencia (IPC, *Ideal Power Control*) [38]. En la práctica no siempre es posible obtener las potencias óptimas para todos los enlaces

$$p^* = (I - C)^{-1}\eta \quad (1.9)$$

Foschini y Miljanic describen el algoritmo de la siguiente forma: "Cada usuario restablece de forma iterativa su nivel de potencia al valor necesario para tener un rendimiento aceptable, como si los otros usuarios no fueran a cambiar su nivel de potencia. Sin embargo, los otros usuarios están siguiendo el mismo algoritmo y, por lo tanto, están cambiando sus niveles de potencia" [33]. El algoritmo Foschini-Miljanic tiene éxito al alcanzar la SINR requerida para todos los nodos de la red si una solución existe y falla si no existe una solución [37].

La ecuación diferencial (1.10) es definida por Foschini y Miljanic en [33] para modelar la dinámica de potencia en tiempo continuo.

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \beta_i \left(-p_i(t) + \gamma_i \left(\sum_{j \neq i} \frac{g_{ij}}{g_{ii}} p_j(t) + \frac{v}{g_{ii}} \right) \right) \quad (1.10)$$

Donde $\beta_i > 0$, denota la constante de proporcionalidad⁴, g_{ij} denota la ganancia del canal en el enlace entre el transmisor j y el receptor i y γ_i denota la SINR deseada. Se supone que cada transmisor i tiene conocimiento de la interferencia en su receptor solamente definida en la ecuación (1.11)

$$I_i(t) = \sum_{j \neq i} \frac{g_{ij}}{g_{ii}} p_j(t) + \frac{v}{g_{ii}} \quad (1.11)$$

En forma matricial la ecuación (1.10) es escrita como lo muestra la ecuación (1.12)

$$\dot{p}(t) = -\beta H p(t) + \beta \eta \quad (1.12)$$

Donde β = matriz diagonal de β_i y H la matriz descrita por la expresión (1.13)

⁴ β_i es un parámetro de ajuste propio del algoritmo Foschini Miljanic, el cual permite variar la convergencia del algoritmo, necesariamente positivo y menor o igual a 1 [30].



$$H_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ -\gamma_i \frac{g_{ij}}{g_{ii}}, & i \neq j. \end{cases} \quad (1.13)$$

Para esta ecuación diferencial, el sistema convergerá para el conjunto de potencias soluciones del vector $p^* > 0$, para cualquier vector con potencia inicial positiva.

Foschini y Miljanic definen el algoritmo en tiempo discreto como lo muestra la ecuación (1.14) donde la unidad es el tiempo entre iteraciones consecutivas del vector de potencias. Empleando la notación $p(k)$ como el vector de potencia en el momento $k= 0, 1, 2, 3, \dots$

$$p(k + 1) - p(k) = -\beta H p(k) + \beta \eta \quad (1.14)$$

Por lo tanto el algoritmo de forma distribuida está dado por la ecuación (1.15)

$$p_i(k + 1) = (1 - \beta_i) p_i(k) + \beta_i \gamma_i \left(\sum_{j \neq i} \frac{g_{ij}}{g_{ii}} p_j(t) + \frac{v}{g_{ii}} \right) \quad (1.15)$$

Con el mayor valor universal de β determinado para ser $\beta = 1^5$, la ecuación (1.15) se convierte en la ecuación (1.16)

$$p_i(k + 1) = \frac{\gamma_i}{R_i(k)} p_i(k) \quad (1.16)$$

Es importante observar que cada enlace toma su decisión de potencia para el siguiente paso de forma autónoma, el siguiente nivel de potencia elegido es simplemente una función de la SINR objetivo individual del enlace, de su nivel de potencia actual, y de su propia SINR observada. Si no existe un vector p^* que resuelve la ecuación (I-C) $P \geq \eta$ acorde a los requisitos anteriores, entonces el algoritmo dará como resultado todas las potencias de los transmisores tendiendo a potencias infinitas [38].

⁵ En [30] los autores demuestran un ajuste universal de β , "de manera que, cada vez que se tiene una solución, mediante el uso de 1.14, $p(k)$ convergerá a p^* sin importar los valores de la matriz de propagación dado que los usuarios no la conocen, ni conocen el número de usuarios que interfieren. $\beta = 1$ es la constante universal más grande posible, de la que resulta inmediatamente que cualquier valor de β en el intervalo $(0, 1]$ es universal".

CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN

En este capítulo se presenta el modelo para el análisis de la cobertura de un sistema de comunicaciones inalámbrico que utiliza Control de Potencia (PC) basado en el algoritmo de Foschini, mediante simulación a nivel de sistema⁶. Para la definición del modelo se adoptó la metodología para la simulación de sistemas de telecomunicaciones [39], la cual define una serie de pasos para la obtención del mismo, teniendo en cuenta los objetivos de simulación, el plan de pruebas, el proceso de desarrollo y el análisis de la simulación.

2.1. PROCESO DE DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN

La metodología utilizada es iterativa y consta de nueve fases: Definición del Sistema, Análisis, Formulación del Modelo, Selección del Lenguaje, Codificación del Modelo, Validación, Experimentación, Implantación y Monitoreo y Control, como se aprecia en la figura 2.1 esta metodología es progresiva dado que permite entrar en un modo cíclico si en la fase de validación se determina que los resultados no son correctos, regresando en primera instancia a la fase de codificación del modelo y escalando en las diferentes etapas si el error o los resultados incoherentes son persistentes en cada una de ellas.

A continuación se realiza una descripción de cada fase.

2.2. FASE 1: DEFINICIÓN DEL SISTEMA

El sistema a desarrollar es un sistema de comunicaciones limitado por interferencia de única portadora, en el cual se tiene un escenario conformado por nueve micro celdas (3x3) de radio 1 km, 0.6 Km ó 0.3 km, con un número de usuarios que puede variar entre 20 y 200, posicionados aleatoriamente, de manera uniforme en el interior de cada celda. En dicho escenario se analiza el Enlace de Subida (UL, *Up Link*), es decir, los usuarios tendrán el

⁶ A diferencia de la simulación a nivel de enlace no se considera aspectos como la modulación, codificación, bucle cerrado de control de potencia, estimación de canal y diversidad, el enfoque del problema de control de potencia en el nivel de sistema consiste en analizar cuáles son los valores adecuados de potencia transmitida en función del estado de la red.



papel de transmisor y la Micro Estación Base (MBS, *Micro Base Station*), ubicada en el centro de la celda será el receptor.

A fin de analizar la cobertura vista como el área geográfica en que la probabilidad de degradación de usuarios máxima es el del 5% y la capacidad como el número de usuarios atendidos simultáneamente en una celda, se utilizan dos relaciones SINR objetivo de -14 dB y -20 dB.

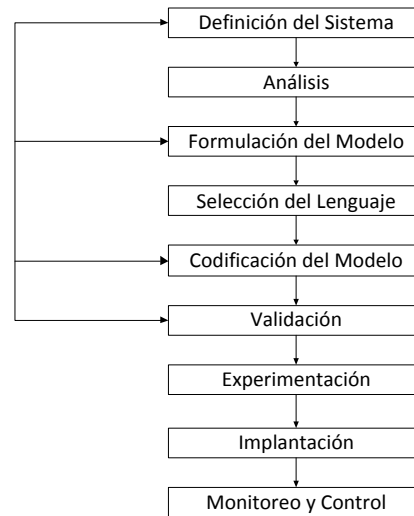


Figura 2.1. Proceso de desarrollo de una simulación. Tomado de [39]

2.3. FASE 2: ANÁLISIS DEL SISTEMA

En esta etapa se realiza la descripción analítica de los elementos que conforman el sistema. Se considera al interior de cada micro celda el conjunto de Equipos de Usuario (UE, *User Equipment*) asociados a la MBS de cada celda, las cuales operan sobre una frecuencia de portadora única. El escenario de simulación se encuentra representado en la figura 2.2.

Tanto el transmisor como el receptor, UE y MBS respectivamente, tendrán un conjunto de parámetros relacionados con la comunicación. Los parámetros requeridos para la estación base son:

- SINR objetivo: es el mínimo valor que debe tener la relación señal a interferencia más ruido de un enlace para considerar que el enlace se ha establecido exitosamente.
- Ruido térmico: corresponde a la potencia de ruido generada en el receptor. Su valor depende del ancho de banda.

- Ganancia de antena: es la ganancia relativa de la antena receptora, respecto a la antena isotrópica.
- Pérdidas en la Línea de transmisión: se refiere a las pérdidas generadas por la línea de transmisión que transporta la señal recibida por la antena hasta el equipo receptor.

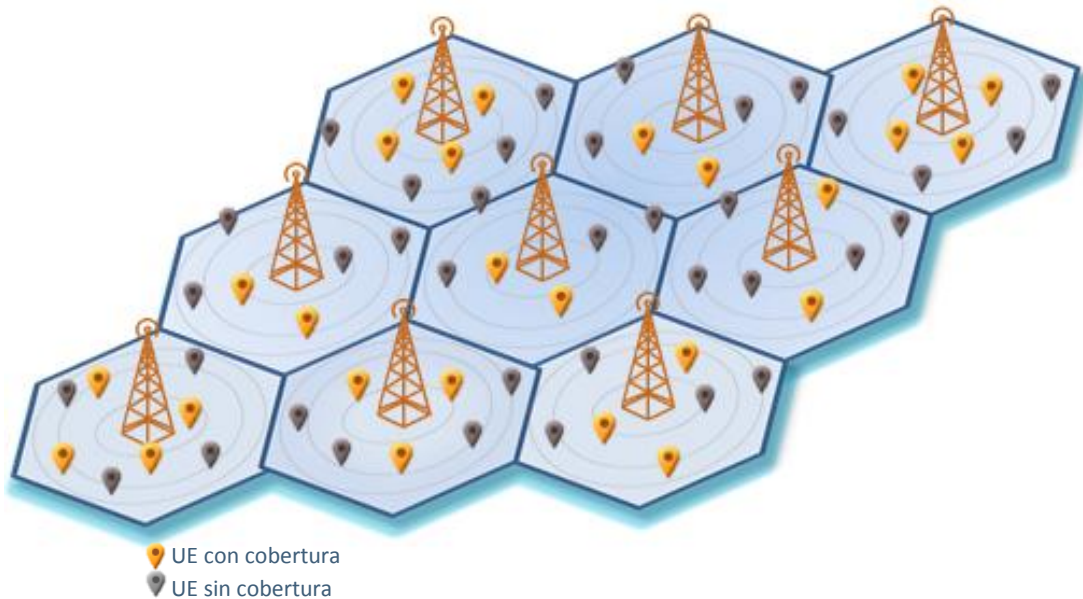


Figura 2.2. Escenario de Simulación

Por otra parte la configuración de usuarios constará de unos parámetros generales para todos los usuarios de una misma celda y de unos parámetros específicos que serán propios de cada usuario. Los parámetros que se han elegido como generales en la configuración de usuario son:

- Ganancia de antena: es la ganancia relativa de la antena transmisora, respecto a la antena isotrópica.
- Potencia Máxima: el máximo nivel de potencia que el transmisor puede generar.
- Potencia Mínima: el mínimo nivel de potencia que el transmisor puede generar.

Aunque los parámetros podrían definirse de manera individual para cada usuario, se ha elegido, por simplicidad, considerarlos iguales para todos los usuarios dentro de una misma celda, sin embargo podrán ser distintos para usuarios en distintas celdas si así se desea. Por último, cada usuario tiene un parámetro que será individual, la posición, la cual será asignada en forma normalizada con un factor de desnormalización igual a $\sqrt{3}R_{celda}$, donde R_{celda} es el radio real de cada celda.



El canal de comunicación se modela mediante el modelo de pérdidas de trayecto para ambientes de prueba de transeúntes para exteriores a interiores (*Path loss model for outdoor to indoor and pedestrian test environment*) y una variable aleatoria con distribución normal, que representa el desvanecimiento por sombra presente en el sistema, de modo que las pérdidas de propagación, quedan representadas por la ecuación 2.1.

$$L[dB] = 49 + 40 \log(d[Km]) + 30 \log(f[MHz]) + S \quad (2.1)$$

Donde d es la distancia dada en kilómetros desde un UE hasta una MBS, f es la frecuencia de operación del sistema en unidades de MHz y es S es variable aleatoria con distribución normal, con media cero y desviación estándar de 8^7 que representa el desvanecimiento por sombra, dado en decibeles.

De la ecuación 2.1 se deduce que los parámetros requeridos para estimarlas pérdidas de propagación son la frecuencia y el radio de la celda el cual permite realizar la desnormalización de las distancias entre los usuarios y las estaciones base.

Parámetro	Valor	Unidades
Radio de Celda	0.3, 0.6 y 1	Km
SINR mínimo	-20,-14	dB
Potencia de Ruido Térmico	-101	dBm
Frecuencia de Operación	2000	MHz
Ganancia antena transmisor	0	dBi
Ganancia antena receptor	16	dBi
Pérdidas línea transmisor	0	dB
Pérdidas línea receptor	3	dB
Potencia mínima	-30	dBm
Potencia máxima	20	dBm
Número de Usuarios	Entre 20 y 200	Ninguno

Tabla 2.1. Características del Escenario de Simulación

A partir de los parámetros descritos anteriormente y definidos en la tabla 2.1, el sistema establece los enlaces entre cada usuario y las MBS, aplica Control de Potencia (PC) mediante diferentes técnicas y determina si la SINR del enlace supera la SINR mínima definida para la estación base. En caso afirmativo, se considerará que el usuario de dicho enlace tiene cobertura. Las técnicas de Control de Potencia (PC) empleadas serán:

⁷En la recomendación ETSI (1998) El desvanecimiento Log-normal o por sombra con una desviación estándar igual a 10 y 12 dB es razonable para exteriores e interiores respectivamente. Las pérdidas por penetración en edificios se definen con una desviación estándar igual a 8 dB.



- Ningún control de potencia: en este caso se asigna un valor fijo a las potencias de transmisión de todos los usuarios y se procede a calcular el valor de la SINR resultante para cada enlace.
- Control Ideal de Potencia (IPC): esta técnica, explicada en la sección 1.5. procede a calcular los valores óptimos de potencia y a asignarlos a cada uno de los transmisores, garantizando que con estos valores todos los enlaces tendrán una SINR igual a la SINR mínima para que el establecimiento del enlace sea exitoso.
- Control de potencia basado en el algoritmo de Foschini: esta técnica actualiza iterativamente los valores de potencia siguiendo el algoritmo de Foschini, con el objetivo de que todos los usuarios alcancen la SINR mínima para el establecimiento del enlace. El proceso matemático del algoritmo está explicado en la sección 1.5.

Cada enlace hace un registro de la potencia asignada al transmisor y de la SINR obtenida en el receptor, para cada una de las técnicas de Control de Potencia (PC) empleadas.

A fin de evaluar el radio de cobertura se consideran uno a uno los usuarios comenzando con el más cercano hasta llegar al más alejado de la estación base, verificando si el usuario cumple con la SINR objetivo. A medida que se hace esta verificación, se realiza un conteo de los usuarios con cobertura y de los usuarios que no la tienen, una vez que el conteo de usuarios sin cobertura alcanza el cinco por ciento del total de usuarios en el interior de la celda, se considera que termina la zona de cobertura, por lo tanto, el radio de cobertura será la posición del usuario sin cobertura (usuario sin alcanzar el umbral de la SINR objetivo) que haya completado el cinco por ciento del total de usuarios. Adicionalmente, para determinar la dependencia que tienen el radio de cobertura y el porcentaje de usuarios con cobertura respecto a la cantidad total de usuarios se varía la cantidad de usuarios en cada celda.

2.4. FASE 3: FORMULACIÓN DEL MODELO

Teniendo en cuenta el análisis realizado, se modela el sistema mediante el diagrama de bloques de la figura 2.3. La formulación del modelo se complementa con diagramas de flujo que muestran el comportamiento de los algoritmos de Control de Potencia (PC). Debido a que la simulación a nivel de sistema es de tipo estático, el procedimiento que se describe a continuación se repite para cada uno de los UE presentes en el sistema.

Inicialmente la transmisión se da por parte de los UE presentes en el escenario del sistema, se aplican los efectos de atenuación y desvanecimiento del canal a la señal antes de llegar a la MBS, la MBS recibe la señal de los UE asociados a su celda y suma todas las señales provenientes de otros usuarios dentro y fuera de la celda como interferencia. La MBS implementa los procesos para el Control de Potencia (PC) con el algoritmo de Foschini, el Control Ideal de Potencia (IPC) y la supresión de cualquier técnica de Control de Potencia.

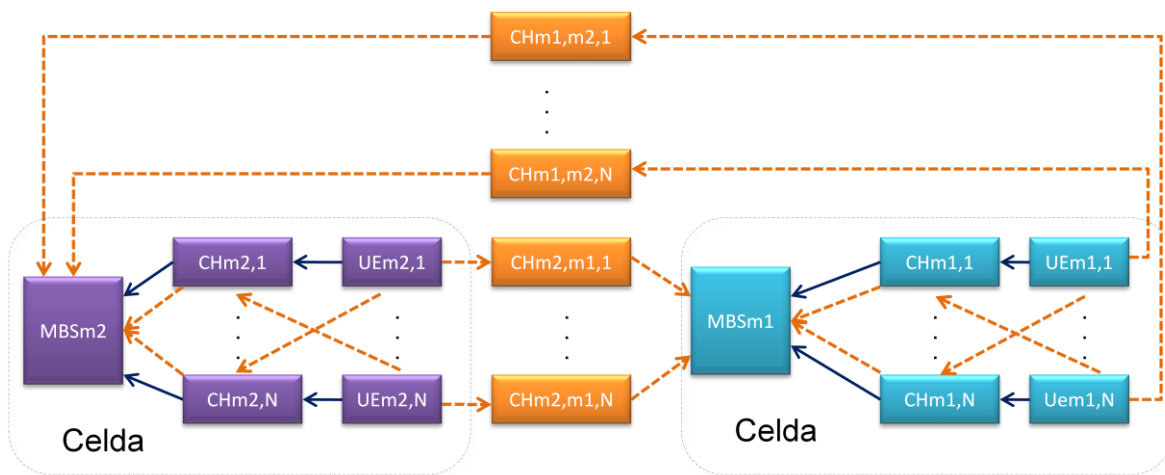


Figura 2.3. Diagrama en bloques del Sistema

Teniendo en cuenta la relación de los elementos que componen el diagrama de bloques mostrado en la figura 2.3, se genera un modelo lógico-matemático en el cual se definen las variables que forman parte del sistema y la interacción de estas mediante los procedimientos realizados, acorde a los diagramas de flujo mostrados en las figuras 2.4 y 2.5, los cuales corresponden a los dos modos de ejecución del sistema: simulación simple y simulación iterada.

La figura 2.4 muestra el diagrama de flujo general del modo de simulación simple, el cual inicia con la captura de los datos necesarios para la configuración y generación del escenario, los usuarios y los enlaces. A continuación procede a aplicar el Control de Potencia (PC) y a evaluar la cobertura del sistema, para finalmente generar un resultado gráfico en el que se muestran los radios de cobertura y los porcentajes de usuarios con cobertura para cada celda.

La Figura 2.5 muestra el diagrama de flujo general para el modo de simulación iterativo, este modo repite la simulación para un número **N** de usuarios por celda, el valor de N varía con un incremento fijo **Nincremento**. Para cada N se obtienen los resultados. A fin de garantizar la validez estadística de los resultados, la simulación es repetida 1000 veces para cada valor de N y los resultados de las mil repeticiones son promediados.

El procedimiento de Control de Potencia (PC) especificado en el diagrama de flujo que muestran las figuras 2.4 y 2.5, se realizó teniendo en cuenta los diagramas de no Control de Potencia (PC), Control Ideal de Potencia (IPC) y Control de Potencia (PC) con el algoritmo de Foschini mostrados en las figuras 2.6, 2.7 y 2.8 respectivamente.



El algoritmo cuando no se aplica Control de Potencia (PC), mostrado en el diagrama de flujo de la figura 2.6, realiza dos procesos sencillos: asigna valores iniciales de potencia y luego calcula la SINR en cada enlace.

En el Control Ideal de Potencia (IPC) el algoritmo calcula los valores óptimos de potencia para cada uno de los enlaces, si entre las potencias óptimas obtenidas existen valores fuera del rango permitido, los enlaces correspondientes son descartados y se repite el proceso para los enlaces restantes. La ejecución del algoritmo termina cuando ninguno de los enlaces restantes obtiene un valor de potencia fuera de rango o cuando todos los enlaces han sido descartados.

El diagrama de flujo de PC mediante el algoritmo de Foschini asigna un valor inicial a las potencias de los enlaces y ajusta reiteradamente el valor de la potencia siguiendo el algoritmo explicado en el apartado 1.5. Al realizar cada ajuste la SINR es recalculada y junto con los valores de potencia, en cada iteración se almacenan los valores para su uso posterior en la evaluación de la cobertura.

El proceso de evaluar cobertura presente en los diagramas de flujo generales (figuras 2.4 y 2.5) consiste en determinar si el enlace se encuentra, o no, en condición de degradación, es decir si no logra superar el requerimiento mínimo de SINR establecido. Una vez definido el estado de todos los enlaces, se procede a determinar el radio de cobertura y la degradación para cada celda del sistema. Para obtener el radio de cobertura se busca el radio, desde la estación base, en el que la probabilidad de degradación máxima de los usuarios al interior de dicho radio sea del cinco por ciento. Por otra parte, la degradación del sistema se calcula mediante el porcentaje de usuarios cuyos enlaces se encuentran en condición de degradación. Finalmente se obtiene el valor promedio de radio de cobertura y de degradación entre las celdas y, el análisis general de cobertura del sistema se realizará en términos de dichos promedios.

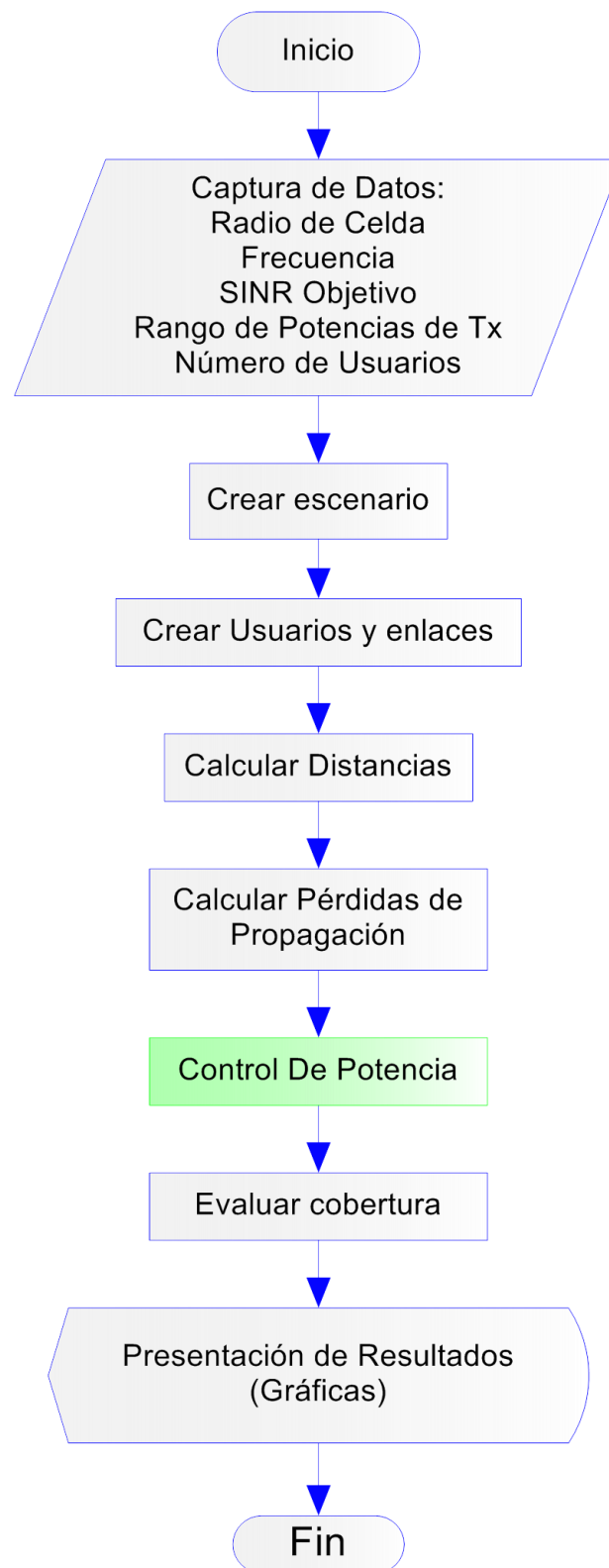


Figura 2.4. Diagrama de Flujo General de Simulación Simple

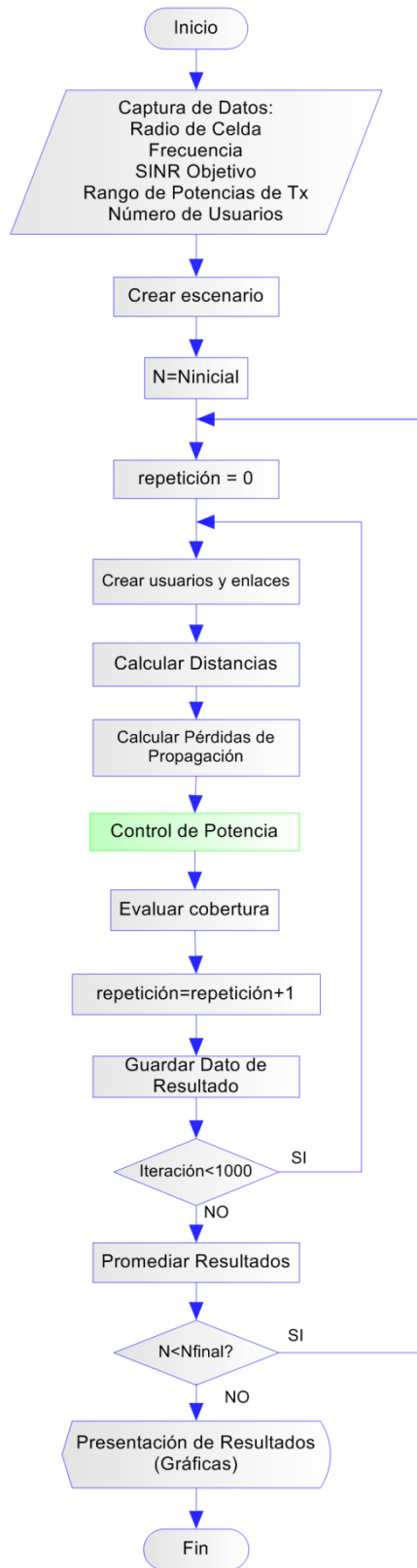


Figura 2.5. Diagrama de Flujo General Simulación Iterada

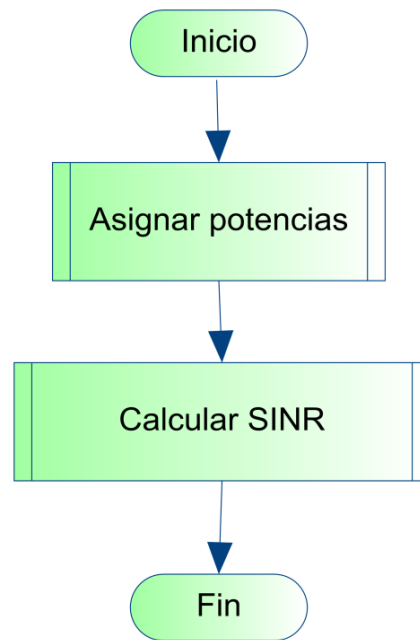


Figura 2.6. Diagrama de Flujo de Control de Potencia Nulo

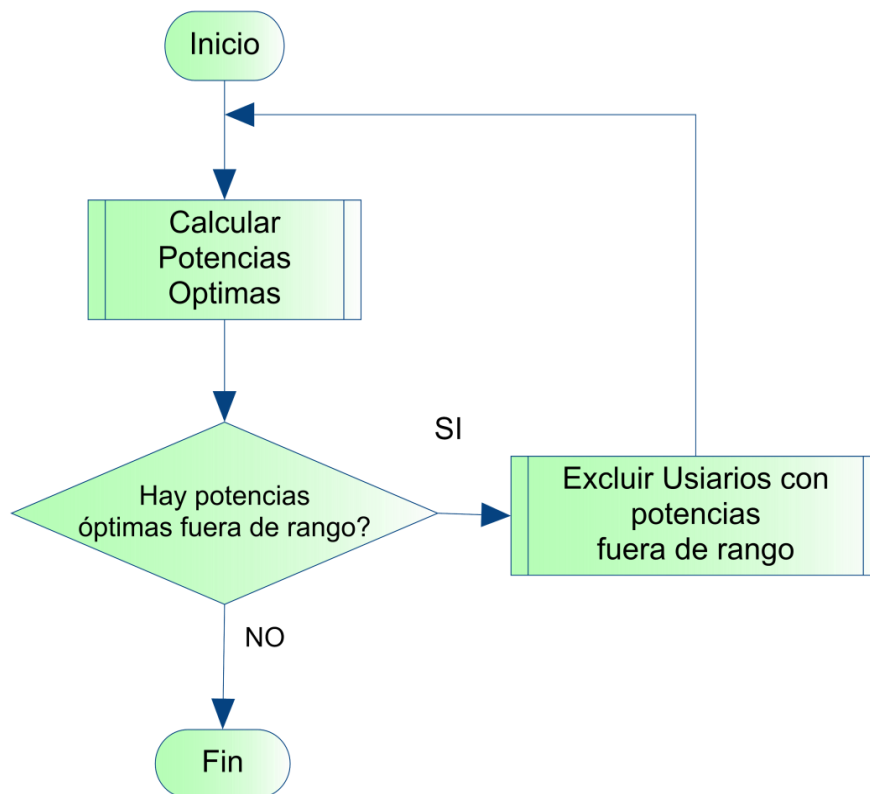


Figura 2.7. Diagrama de Flujo Control Ideal

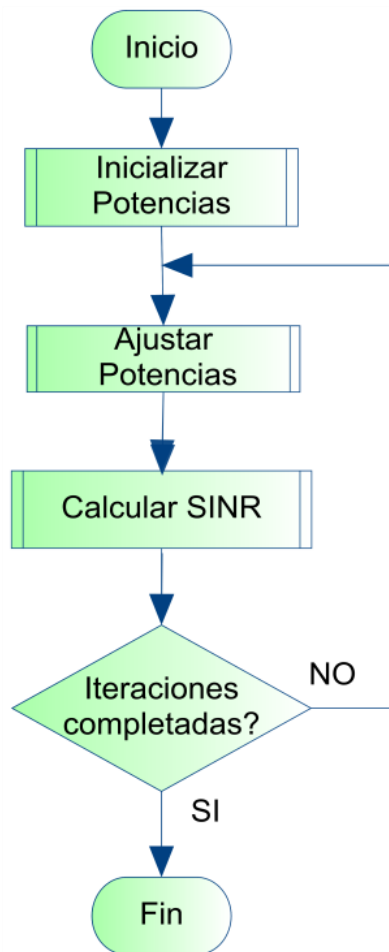


Figura 2.8. Diagrama de Flujo Algoritmo de Control de Potencia de Foschini

2.5. FASE 4: SELECCIÓN DEL LENGUAJE

En la selección del lenguaje se toman en cuenta el tipo de sistema de comunicaciones que se requiere simular y el presupuesto del trabajo de grado, optando por la herramienta software MATLAB® (*MatrixLaboratory*), la cual permite simular sistemas inalámbricos y la Universidad del Cauca cuenta con la licencia de funcionamiento.

MATLAB® es un entorno de programación de alto nivel que permite trabajar de una manera eficiente el desarrollo de algoritmos, visualización y análisis de datos, entornos de simulación de sistemas de comunicaciones, análisis numérico, procesamiento de imágenes, procesamiento de señales, control, entre otros. Esta herramienta permite un manejo amplio y rápido de matrices y vectores así como las diferentes operaciones matemáticas; también



permite la creación por código de algoritmos propios para manejo de procesos específicos de interés del usuario, además de facilitar la creación de interfaces gráficas [26].

La herramienta MATLAB® tiene una gran acogida en el campo ingenieril e investigativo debido a que es un entorno confiable, versátil, de alta capacidad, multifuncional y permite trabajar en múltiples plataformas, por ello es seleccionada como la mejor herramienta para el desarrollo y posterior análisis del presente trabajo de grado, consecuentemente se escoge el lenguaje M, propio de ésta.

2.6. FASE 5: CODIFICACIÓN DEL MODELO

Para realizar la simulación del sistema se creó una herramienta software desarrollada en el entorno Matlab la cual proporciona un conjunto de Interfaces Gráficas de Usuario (GUI, *Graphic User Interface*) que permiten configurar el escenario y visualizar los resultados. Esta herramienta se codifica utilizando estructuras y funciones las cuales se detallan a continuación.

2.6.1. Estructuras de información

A continuación se presentará la organización de la información dentro del sistema. Toda la información de cada simulación es almacenada en una estructura denominada **escenario**. Dicha estructura está a su vez compuesta por tres estructuras, las cuales serán descritas a continuación:

- **Celdas:** corresponde a una matriz de tamaño $N_u * N_v$ que contiene la información básica del arreglo de celdas. Cada elemento de la matriz contiene una estructura llamada centro que contiene las coordenadas (x,y) respecto a un sistema cartesiano común, cuyo origen coincide con el origen del sistema de coordenadas u,v, un sistema de coordenadas no ortogonal frecuentemente empleado en el diseño de estructuras de celdas. Este sistema consta de un eje u, el cual se encuentra orientado a 30 grados sobre la horizontal y de un eje vertical v. Las coordenadas (x,y) se encuentran normalizadas con el mismo factor de normalización empleado para el sistema (u,v)⁸. Además, cada celda tiene un índice el cual permite establecer un orden lineal para la estructura de celdas matricial. La figura 2.9 muestra la forma de la estructura celdas.

⁸ El origen de este sistema de coordenadas se elige de manera que coincida con el centro de una de las celdas. Los centros de las demás celdas son alineados sobre rectas paralelas a los ejes coordenados u y v. Se emplea un radio de celda R normalizado de tal forma que la separación de los centros entre dos celdas vecinas, a lo largo de las direcciones de los ejes coordenados u y v sea igual a la unidad, lo cual es cierto para $R = 1/\sqrt{3}$



- Transmisión:** esta estructura, mostrada en la figura 2.10, contiene la información relacionada con el modelo de propagación y con los parámetros propios de cada celda. En primer lugar contiene la posición (u,v) de la celda de observación. Además, está conformada por la subestructura **general**, que contiene la información relacionada con la frecuencia y el radio de la celda y sus respectivos rangos de variación permitidos. Adicionalmente, contiene un vector de estructuras las cuales contienen los parámetros de configuración específicos de cada Celda. El contenido específico de este vector será considerado a continuación.

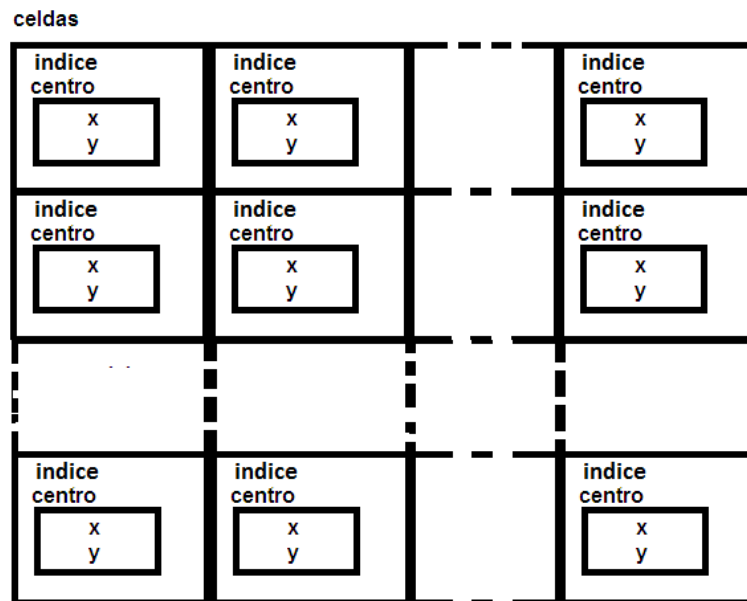


Figura 2.9. Estructura Celdas.

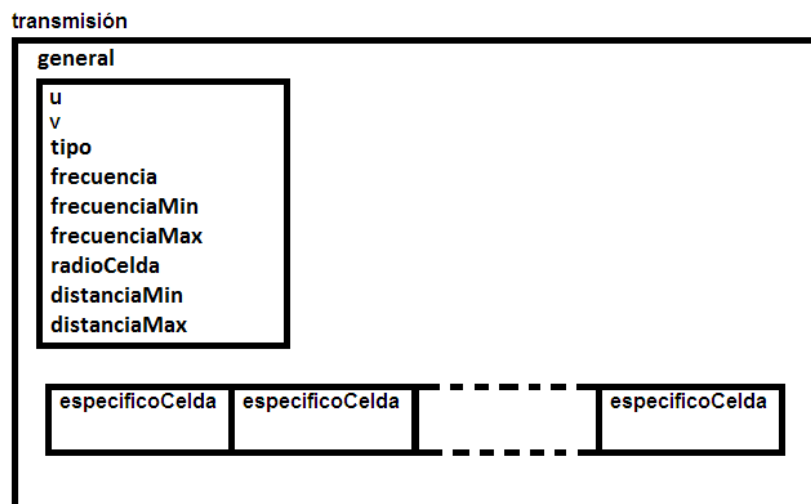


Figura 2.10. Estructura Transmisión



- **Específico celda:** esta estructura, mostrada en la figura 2.11, corresponde al contenido de cada uno de los elementos del vector de configuraciones específicas de las celdas dentro de la estructura transmisión. Inicialmente contiene las variables u y v , las cuales representan la posición de la celda a la que corresponde la configuración dentro de la matriz de celdas. Seguidamente se define un conjunto de variables que almacenan los resultados de cobertura: el radio de cobertura, el número de usuarios con cobertura en la celda y el número de usuarios sin cobertura en la celda, obtenidos con cada una de las tres técnicas de control de potencia mencionadas anteriormente. Estos valores corresponden al resultado final de una simulación y es a partir de ellos que se realiza la estimación de la cobertura, la cual es el objetivo de la herramienta de simulación que se está considerando. Adicionalmente, dentro de la estructura `especificoCelda` existe una subestructura llamada **estacionBase** la cual contiene la información relativa a la estación base o receptor. Estos valores son la ganancia de la antena, las pérdidas en la línea de transmisión, la SINR mínima para que exista enlace, el ruido en el receptor y la posición de la estación base, la cual es, a su vez una estructura que contiene las coordenadas (x,y) de la posición de la estación base relativa al centro de la celda. Si la celda se coloca en el centro estas coordenadas serán $(0,0)$. Además, la estructura `especificoCelda` también contiene una estructura denominada **configUsuario**, la cual se forma por la información de configuración que será común a todos los usuarios de la celda. Esta incluye: la ganancia de la antena, las pérdidas en la línea de transmisión, la potencia máxima y la potencia mínima permitida para cada transmisor. Por último, se incluye un vector de estructuras denominado **usuarios** el cual contendrá las posiciones de los usuarios y el índice del enlace que corresponde a cada usuario dentro del vector de enlaces, que será descrito en el siguiente segmento. El vector `usuarios`, y el vector `enlaces`, son generados en cada simulación, de acuerdo con el número de usuarios por celda que el usuario haya configurado.
- **Enlaces:** corresponde a un vector de estructuras que contiene información específica de un enlace. Está asociado con uno de los elementos del vector de configuraciones específicas de celda contenidas dentro de la estructura transmisión esta asociación se realiza mediante la variable **indiceEspecificoCelda**, la cual actúa como un índice dentro de dicho vector. De manera similar, contiene un segundo índice que relaciona el enlace con un usuario en particular de los contenidos en la configuración específica de la celda. Luego se incluye un conjunto de variables de estado del enlace, las cuales incluyen un registro de la potencia del transmisor, de la SINR del receptor y una bandera que indica si el enlace fue exitoso. Estas tres variables tienen versiones para cada una de las técnicas de control de potencia utilizadas, como se puede observar en figura 2.12.

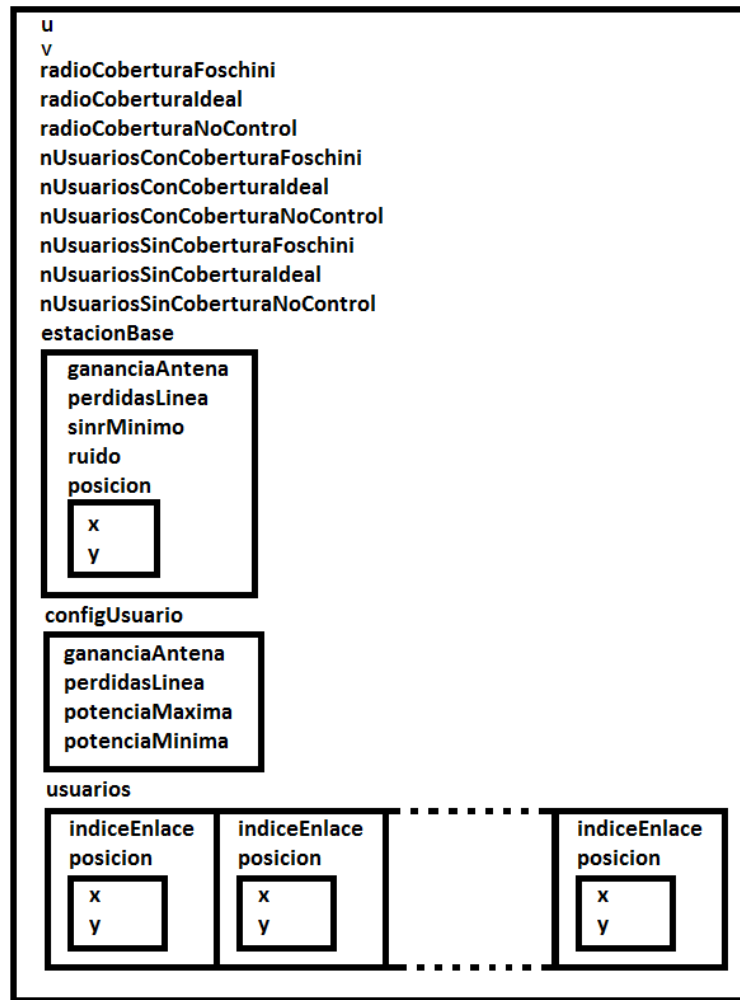


Figura 2.11. Estructura Especifico Celda.

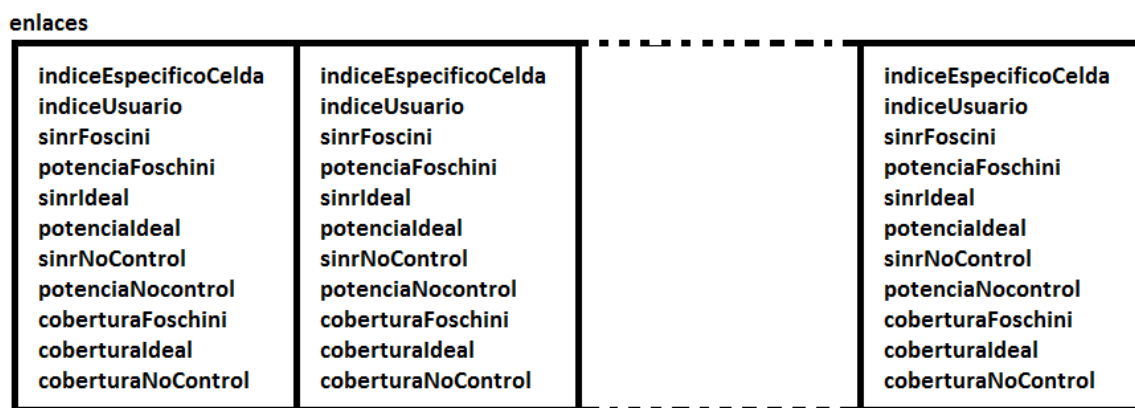


Figura 2.12. Vector Enlaces



2.6.2. Funciones

A continuación se describen algunas de las funciones empleadas en la codificación del sistema.

Todas las funciones, incluidas las de las interfaces gráficas se explican en detalle en el ANEXO A

- **Calcular Distancias:** esta función calcula las distancias existentes entre cada base y todos los usuarios del sistema (tanto de su propia celda como de las otras). Las distancias quedan organizadas en la matriz **distancias**, en la cual cada fila corresponde a un receptor o estación base y cada columna a un usuario, de manera que el elemento (i,j) de la matriz es la distancia normalizada entre la estación base i y el usuario j que pertenece al enlace j-ésimo.
- **Calcular Pérdidas:** calcula las pérdidas totales entre cada base y todos los usuarios utilizando la matriz **distancias**. Estas pérdidas incluyen las pérdidas de propagación y las ganancias de antenas y pérdidas de propagación, así como las pérdidas por desvanecimiento tipo sombra y están dadas en dB.
- **Control Potencia Ninguno:** asigna un valor inicial a las potencias de los enlaces, las cuales son registradas en el campo **potenciaNocontrol** del vector enlaces mencionado en el apartado 2.6.1. A partir de estas potencias y de la matriz de pérdidas, procede a calcular la SINR resultante en cada enlace y lo guarda en el campo **sinrNocontrol** y dependiendo de si este supera o no la SINR objetivo, determina si el enlace proporciona, o no, cobertura al usuario. El resultado se registra en la bandera **coberturaNocontrol** del vector de enlaces.
- **Control Potencia Ideal:** esta función realiza el cálculo de potencias óptimas de acuerdo al IPC y descarta a los enlaces que tengan valores de potencia por fuera del rango permitido, a la vez que los marca como enlaces sin cobertura. A los enlaces que no han sido descartados asigna el valor de potencia óptimo obtenido, marcándolos como enlaces con cobertura. Finalmente se calcula la SINR de los usuarios con cobertura. Los resultados se guardan en los campos **potencialdeal**, **sinrIdeal** y en la bandera **coberturaldeal**.
- **Control Potencia Foschini:** asigna un valor inicial a las potencias y, siguiendo el algoritmo de Foschini ajusta el valor de las mismas durante un número de iteraciones determinado. El valor de potencia y de SINR son vectores con una longitud igual al número de iteraciones del algoritmo. La evaluación de cobertura de los enlaces se realiza al final de la ejecución de todas las iteraciones del algoritmo, determinando si el último



valor de SINR correspondiente a la última iteración supera la SINR objetivo. El resultado de esta función se registra en el vector **enlaces** en los campos **potenciafoschini**, **sinrfoschini** y **coberturafoschini** en el caso de PC con Foschini.

- **Evaluar Cobertura:** recorre los enlaces de cada celda realizando un conteo de los usuarios con cobertura y de los usuarios sin cobertura y, dado que el vector de usuarios se encuentra ordenado acorde a la distancia entre el UE y la MBS, de menor a mayor, la función determina el radio de cobertura cuando el contador de usuarios sin cobertura alcanza el cinco por ciento del total de usuarios de la celda. Finalmente se obtiene el porcentaje de usuarios con cobertura de la celda mediante la relación entre el número de usuarios con cobertura y el total de usuarios de la celda. Los resultados de este proceso son registrados en el vector de configuraciones específicas de las celdas, el cual, como se consideró en la sección 2.6.1 contiene campos para registrar tanto el radio como el número de usuarios con y sin cobertura para cada uno de los tres tipos de control empleados.
- **Graficar Evolución SINR y Potencia:** Realiza el seguimiento de la SINR y de la potencia al emplear el control de potencia con el algoritmo de Foschini en cuatro usuarios, el más lejano y el más cercano a la base con cobertura y el más lejano y más cercano a la base sin cobertura.
- **Obtener Radios Foschini, Obtener Radios Ideal, Obtener Radios No Control:** estas funciones obtienen los valores promediados entre todas las celdas del radio de cobertura y del porcentaje de usuarios sin cobertura obtenidos al aplicar PC con el algoritmo de Foschini, IPC y al no aplicar Control de Potencia (PC).
- **Graficar Cobertura Ideal, Graficar Cobertura Foschini, Graficar Cobertura No Control:** estas funciones dibujan la distribución de usuarios según el PC empleado en su respectiva GUI. Los usuarios se grafican en cada celda distinguiendo por color a los que tienen o no cobertura. Además la función traza una circunferencia alrededor de la base de cada celda q representa el radio de cobertura en dicha celda.
- **Graficar Histograma:** esta función grafica dos histogramas, el primero muestra la potencia de transmisión asignada a los usuarios al emplear CP con el algoritmo de Foschini e IPC. El segundo, la SINR obtenida para los enlaces al emplear el algoritmo e Foschini y cuando no se emplea ningún control de potencia.
- **Realizar Simulación Simple:** realiza la simulación en modo simple llamando a las funciones anteriormente mencionadas y presenta los resultados individuales, según la elección del usuario en las interfaces gráficas **GUIResultadoEscenarioFoschini**, **GUIResultadoEscenarioIdeal** y **GUIResultadoEscenarioNoControl**.



- **Realizar Simulación Iterada:** Al terminar de ejecutar todas las iteraciones, se realizan las gráficas del radio de cobertura contra el número de usuarios por celda y del porcentaje de usuarios contra el número de usuarios por celda y del porcentaje de usuarios con cobertura obtenidos al no aplicar control de potencia.

2.7. FASE 6: VALIDACIÓN

La validación del modelo de simulación se realiza comparando la cobertura obtenida mediante el algoritmo de Foschini con la obtenida al aplicar el control ideal y al no aplicar Control de Potencia (PC) con las mismas configuraciones en el escenario para cada técnica de PC empleada.

Como ya se ha mencionado, el sistema tiene dos modos de simulación, modo simple y modo iterativo. El modo simple realiza una simulación única para un número de usuarios por celda determinado. Este modo se usó para realizar la validación del sistema y produce los siguientes resultados:

- Radio de cobertura para cada una de las celdas. Este valor será relativo al radio de la celda.
- Porcentaje de usuarios con cobertura para cada una de las celdas.
- Radio de cobertura promedio.
- Porcentaje promedio de usuarios con cobertura.
- Histograma de potencia que incluye los valores de potencia obtenidos empleando el algoritmo de Foschini e IPC.
- Histograma de SINR que incluye los valores de SINR obtenidos al aplicar el algoritmo de Foschini y al no aplicar Control de Potencia (PC).
- Una gráfica que muestra la evolución de la potencia y la SINR empleando el algoritmo de Foschini en cuatro usuarios: el más cercano y el más lejano a la estación base con cobertura y el más cercano y más lejano de la estación base sin cobertura.
- Una gráfica de la distribución de usuarios en las celdas, la cual muestra los radios de cobertura en cada celda. los usuarios con cobertura se distinguen de los que no la tienen por su color.

El modo iterativo repite la simulación para un número N de usuarios por celda, el valor de N varía con un incremento fijo. Para cada N se obtiene el valor del radio de cobertura (relativo



al radio de la celda), el porcentaje de usuarios que presentan degradación en sus enlaces además del porcentaje de usuarios con cobertura y la cantidad promedio de usuarios con cobertura por celda. Para garantizar la validez estadística de los resultados, la simulación es repetida 1000 veces para cada valor de N y los resultados de las mil repeticiones⁹ son promediados. En cada repetición las posiciones de los N usuarios de cada celda con reasignadas aleatoriamente. Los resultados obtenidos del modo de simulación iterativo son:

- Una gráfica que muestra la variación del radio de cobertura contra el número de usuarios por celda para el caso de Control Ideal de Potencia (IPC), Control de Potencia (PC) con el algoritmo de Foschini y cuando no se usa Control de Potencia (PC).
- Una gráfica que muestra la variación del porcentaje de usuarios con enlaces degradados contra el número de usuarios por celda al emplear Control Ideal de Potencia (IPC), Control de Potencia (PC) con el algoritmo de Foschini y cuando no se usa Control de Potencia (PC).
- Una gráfica que muestra la variación del porcentaje de usuarios con cobertura contra el número de usuarios por celda para el caso de Control Ideal de Potencia (IPC), Control de Potencia (PC) con el algoritmo de Foschini y cuando no se usa Control de Potencia (PC).
- Una gráfica que muestra la variación de la cantidad de usuarios promedio con cobertura, contra el número de usuarios por celda para el caso de Control Ideal de Potencia (IPC), Control de Potencia (PC) con el algoritmo de Foschini y cuando no se usa Control de Potencia (PC).

Tanto para el modo simple como para el modo iterativo, el algoritmo de Foschini es iterado doscientas veces. De acuerdo con los resultados obtenidos durante la fase de experimentación, este número de iteraciones es suficiente para que el algoritmo alcance un estado estable.

2.8. FASE 7: EXPERIMENTACIÓN

En la fase de experimentación se tiene en cuenta la variación de diferentes características de sistema, tales como: Radio de las celdas, el cual tomo valores de 0.3 Km, 0,6 Km y 1 Km, cantidad de usuarios por celda, para los cuales se escogieron muestras de 20, 60, 120 y 200 usuarios y dos SINR objetivo una de -20 dB y otra de -14 dB, para comparar los resultados obtenidos aplicando el Control de Potencia (PC) basado en el algoritmo de Foschini, Control

⁹Estas repeticiones no deben ser confundidas con las iteraciones del algoritmo de Foschini. Tanto para el modo simple como para el modo iterativo el algoritmo de Foschini es ejecutado durante doscientas iteraciones en cada simulación.



de Potencia Ideal (IPC) y sin aplicar Control de Potencia (PC). La tabla 2.2 presenta las diferentes configuraciones del escenario de simulación.

SINR		Control de Potencia	Radio de Celda	Número de Usuarios			
-20 dB	-14 dB	IPC	0.3 km	20	60	120	200
			0.6 km	20	60	120	200
			1km	20	60	120	200
		Foschini PC	0.3 km	20	60	120	200
			0.6 km	20	60	120	200
			1km	20	60	120	200
		Sin PC	0.3 km	20	60	120	200
			0.6 km	20	60	120	200
			1km	20	60	120	200

Tabla 2.2. Configuración Escenario de Simulación

2.9. FASE 8: IMPLANTACIÓN

En esta fase con el modelo diseñado, se ejecutan las opciones escogidas en la fase de experimentación, con el fin de obtener diversos resultados y así verificar el correcto funcionamiento y eficiencia de la simulación.

2.10. FASE 9: MONITOREO Y CONTROL

Esta fase permite verificar que las fases anteriores se realicen correctamente, y que la simulación pueda ser modificada en cualquier momento, ya sea por posibles fallas, para adaptarla a un sistema en concreto o para actualizarla.

CAPÍTULO 3 PRUEBAS Y RESULTADOS

Este capítulo presenta y analiza los resultados obtenidos para el escenario descrito en el capítulo 2, empleando la herramienta de simulación desarrollada en MATLAB[®] durante la fase de codificación. Esta herramienta proporciona una GUI que permite configurar el escenario de simulación. La figura 3.1 muestra la interfaz principal de la aplicación, la cual permite configurar el tamaño del arreglo de celdas.

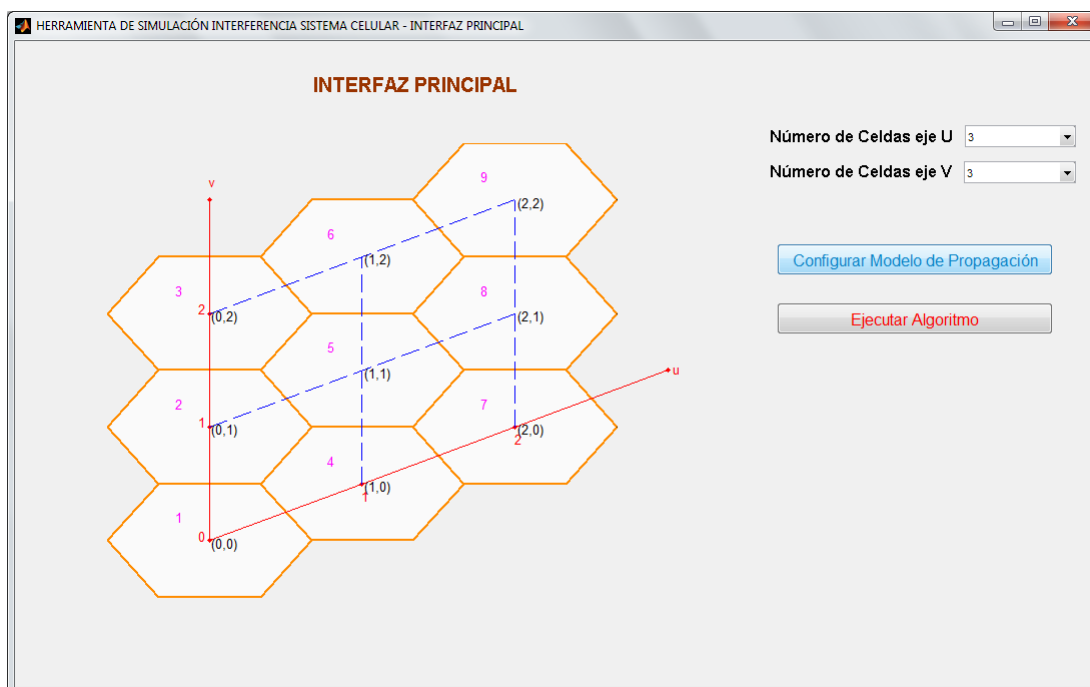


Figura 3.1. Interfaz Principal de la Herramienta de Simulación.

Adicionalmente, la herramienta despliega una GUI, la cual se muestra en la figura 3.2, que permite la configuración del escenario así como una GUI que permite configurar y ejecutar tanto una simulación simple como una simulación iterativa, de acuerdo con la configuración del escenario previamente configurada. Esta interfaz puede verse en la figura 3.3.

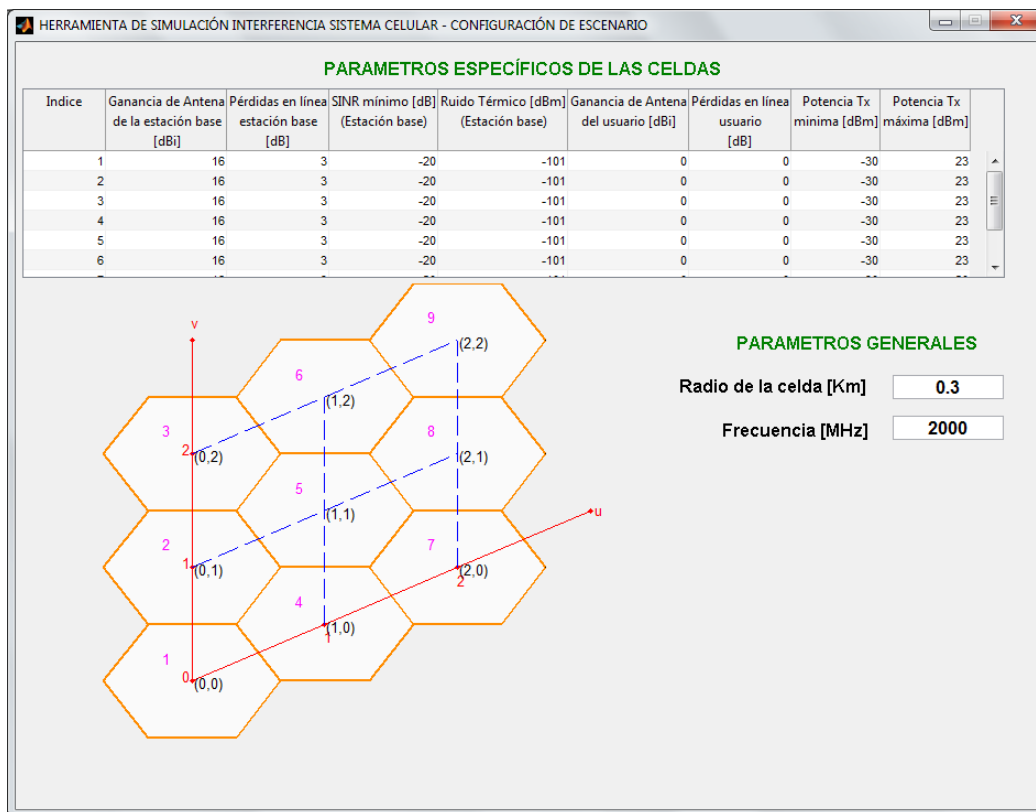


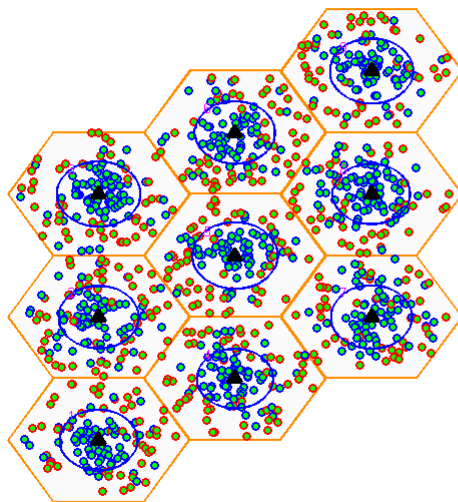
Figura 3.2. Interfaz de Configuración de Escenario.



Figura 3.3. Interfaz de Inicio de Simulación.

Los resultados producidos por la simulación simple fueron enumerados en la sección 2.7. Algunos de estos resultados se presentan como gráficas individuales, sin embargo, la gráfica de distribución de usuarios y la tabla de radios de cobertura y porcentaje de usuarios con y sin cobertura, para cada tipo de control de potencia, son presentados en la GUI de la figura 3.4. En ella, los usuarios que logran establecer enlaces son representados mediante pequeños círculos de borde azul, mientras que los usuarios cuyos enlaces se encuentran degradados, se representan con círculos de borde rojo. Además, se traza una circunferencia azul, la cual indica el radio de cobertura. Adicionalmente, en dicha interfaz se presenta una tabla con los radios de cobertura y los porcentajes de usuarios con y sin cobertura correspondientes a cada celda, así como los promedios de estos valores.

CONTROL DE POTENCIA FOSCHINI



Radio de Celda = 0.3Km, Usuarios por celda = 120, SINR mínimo = -20dB

RESULTADOS

indice celda	% usuarios con cobertura	% usuarios sin cobertura	Radio de cobertura (% radio Celda)
1	59.1667	40.8333	49.6804
2	56.6667	43.3333	51.1343
3	61.6667	38.3333	53.3773
4	55.8333	44.1667	48.7200
5	55.8333	44.1667	54.5071
6	57.5000	42.5000	51.1025
7	60.8333	39.1667	51.7814
8	63.3333	36.6667	49.2802
9	59.1667	40.8333	53.2414

PROMEDIOS

Radio de Cobertura (% Radio de Celda)

% Usuarios con Cobertura

Figura 3.4 Resultados Simulación Simple.

3.1. RESULTADOS PARA SINR DE -20 dB

3.1.1. Radio de Celda de 0.3 Km

Inicialmente se consideró un radio de celda de 0.3 Km y un valor de SINR objetivo de -20 dB. Bajo estas condiciones se verificó el efecto de variar el número de usuarios por celda, realizando simulaciones simples para valores de 20, 60, 120 y 200 usuarios por celda y una simulación iterativa con valores entre 20 y 200 usuarios por celda con incrementos de 5.



3.1.1.1. Resultados Simulación Iterativa

El análisis se inició considerando el radio de cobertura. La figura 3.5 muestra la variación del radio de cobertura promedio relativo al variar el número de usuarios por celda, tanto para el control ideal de potencia, el algoritmo de Foschini y sin control de potencia. Una de las primeras observaciones es que, para los tres tipos de control de potencia, el radio de cobertura tiene una tendencia general a disminuir a medida que aumenta el número de usuarios.

Por otra parte, el algoritmo de Foschini proporciona mayor radio de cobertura que el Control Ideal de Potencia (IPC) y que no usar Control de Potencia (PC), para todos los valores de N considerados, y se encuentra cercano al radio de la celda aproximadamente hasta los 30 usuarios por celda. El máximo radio de cobertura alcanzado, cuando no se emplea Control de Potencia (PC), es aproximadamente el 32 % del radio de la celda, mientras que para el algoritmo de Foschini, se alcanza un radio de cobertura máximo igual al radio de la celda, lo cual representa una mejora significativa. Además, el algoritmo de Foschini mantiene el radio de cobertura por encima del 35 % del radio de la celda, de modo que el menor radio obtenido con el algoritmo de Foschini es mayor que el máximo radio obtenido al no emplear Control de Potencia (PC). El Control Ideal de Potencia (IPC), por su parte, proporciona mayor radio de cobertura que el caso sin Control de Potencia (PC) aproximadamente hasta los 55 usuarios por celda sin embargo, a partir de los 105 usuarios por celda, cae a cero, lo cual significa que no proporciona cobertura a ningún usuario.

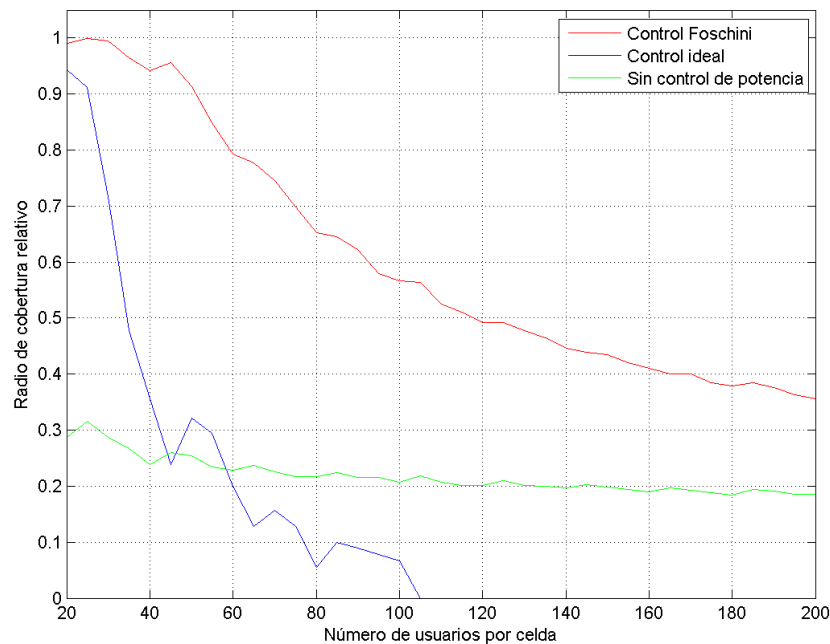


Figura 3.5. Radio de Cobertura Relativo Contra Número de Usuarios por Celda para Control Ideal, Foschini y Sin Control de Potencia.



Después del radio de cobertura, se analizó la variación del porcentaje de usuarios con degradación al cambiar el número de usuarios por celda. La figura 3.6 muestra esta variación para cada uno de los tipos de control de potencia considerados.

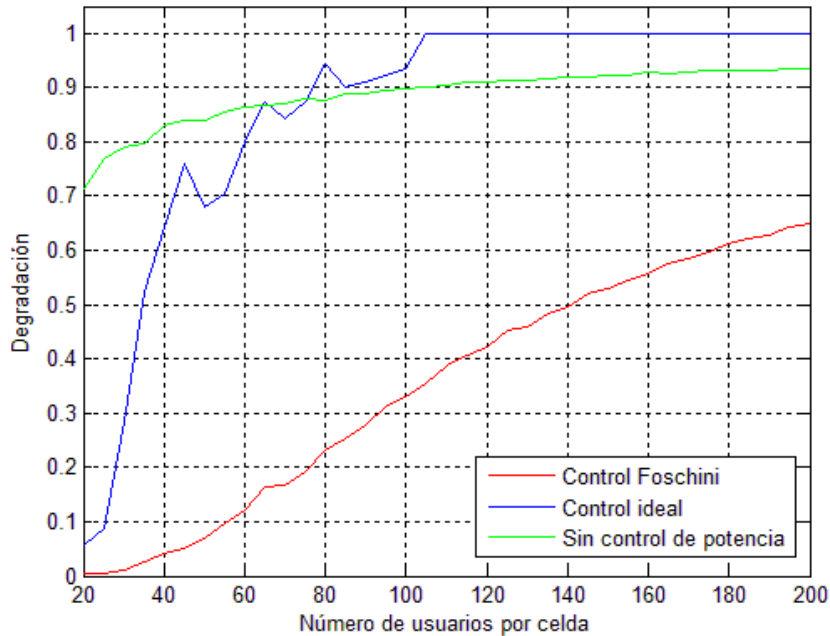


Figura 3.6. Porcentaje de Degradación Relativo Contra Número de Usuarios por Celda para Control Ideal, Foschini y Sin Control de Potencia para un Radio de Celda de 0.3 Km y SINR mínima de -20 dB.

Es evidente que la tendencia general del porcentaje de degradación, para los tres casos, es aumentar ante el incremento del número de usuarios por celda, aunque para el caso del Control Ideal de Potencia (IPC) se presentan oscilaciones. Además, se puede apreciar que al usar el algoritmo de Foschini se obtiene menor porcentaje de degradación que al emplear Control Ideal de Potencia (IPC) y al no utilizar Control de Potencia (PC). Por otra parte, con el algoritmo de Foschini, la degradación se mantiene por debajo del 65 % para todos los valores de N observados, mientras que si no se emplea Control de Potencia (PC), se encuentra por encima del 70 %, de modo que la mayor degradación obtenida con el algoritmo de Foschini es menor que la mínima degradación obtenida sin Control de Potencia (PC). Además, para un N menor que 30 usuarios por celda, el porcentaje de degradación es inferior al 2 %, lo cual constituye una significativa mejora frente al Control Ideal de Potencia (IPC) para el cual está siempre por encima del 7 % y a no usar Control de potencia (PC), caso en el que la degradación se encuentra sobre el 70 %.

Al observar la figura 3.5 y la figura 3.6, se intuye que existe un tipo de relación inversa entre el radio de cobertura y el porcentaje de degradación. Para apreciar esta relación, se procedió a obtener la gráfica mostrada en la figura 3.7, para la cual el eje horizontal corresponde al radio de cobertura y el eje vertical al porcentaje de degradación.

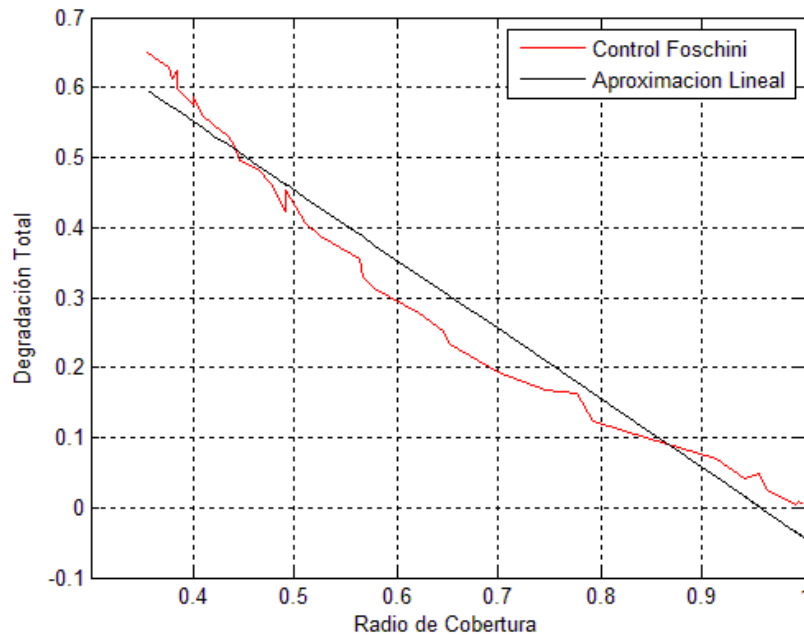


Figura 3.7. Porcentaje de Usuarios con Degradación Contra Radio de Cobertura para Foschini, para un Radio de Celda de 0.3 Km y SINR mínima de -20 dB.

A simple vista, esta relación parece cercana a una relación lineal. Por tal razón, se realizó una aproximación lineal mediante el método de mínimos cuadrados, de la cual se obtuvo la recta mostrada en la figura 3.7, cuya ecuación se muestra a continuación.

$$\%D = -0.99R_C + 0.9488 \quad (3.1)$$

Donde $\%D$ es el porcentaje de usuarios con degradación y R_C es el radio de cobertura relativo a la celda en Km.

Con esta aproximación lineal, se obtiene una desviación de 0,0704, lo cual significa que la estimación lineal produce un error promedio del 7,04 % en la estimación del porcentaje de degradación.

Para complementar el análisis, se realizaron dos gráficas que muestran la variación de los usuarios con cobertura tanto de manera porcentual, como en su valor promedio. Estas gráficas se muestran, respectivamente en la figura 3.8(a) y (b). En ellas puede observarse que el porcentaje de usuarios con cobertura se comporta de manera opuesta al porcentaje de degradación, esto es natural ya que estas dos variables son complementarias y su suma siempre es igual a la unidad. Sin embargo, debe notarse que una disminución en el porcentaje de usuarios con cobertura, no siempre significa una disminución en la cantidad de usuarios con cobertura, como se observa al comparar las gráficas en figura 3.8(a) y (b), ya que aunque el porcentaje disminuya, el número de usuarios por celda aumenta.

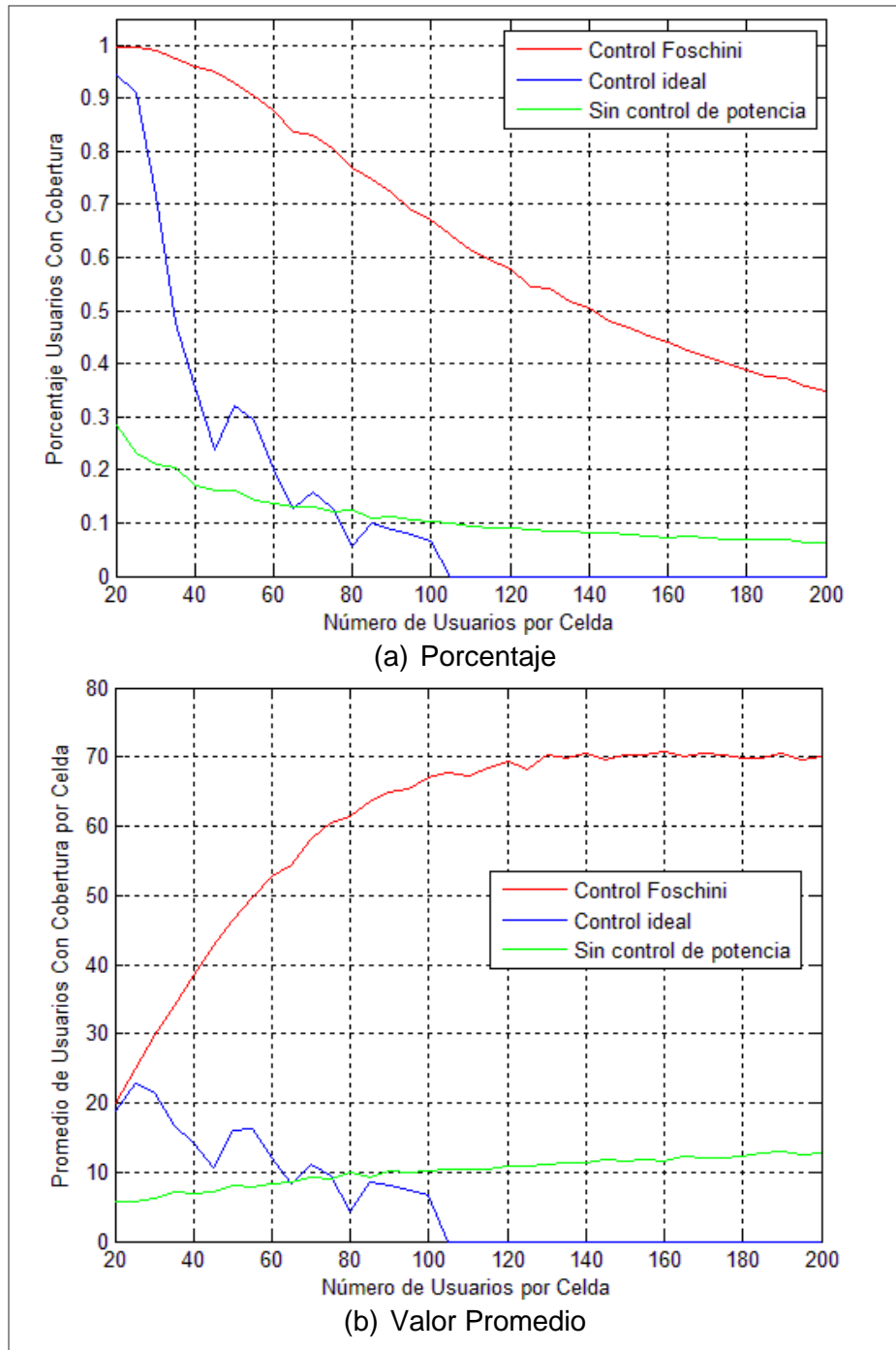


Figura 3.8. Usuarios con Cobertura Contra Número de Usuarios por Celda para Control Ideal, Foschini y Sin Control de Potencia para un Radio de Celda de 0.3 Km y SINR mínima de -20 dB.

Adicionalmente, en la figura 3.8(b), se observa que al emplear el algoritmo de Foschini, aproximadamente a partir de los 130 usuarios por celda, un aumento en el número de usuarios no produce un cambio significativo en la cantidad promedio de usuarios con



cobertura por celda, manteniéndose cerca de un valor estable de aproximadamente, 70 usuarios por celda, el cual representa la cantidad máxima a la que el sistema puede proporcionar cobertura. En otros tipos de sistemas, esta clase de comportamiento es denominado **saturación** y, en este caso indica que el sistema no logra proporcionar cobertura a más usuarios, aún si el número de usuarios total se incrementa.

3.1.1.2. Resultados Simulación Simple

Para complementar los resultados de la simulación iterada, se realizaron simulaciones simples para valores del número de usuarios por celda de 20, 60, 120 y 200 y se procedió a analizar los resultados.

- Análisis de la Evolución Temporal de Potencia y SINR para el Algoritmo de Foschini

En primer lugar, se eligieron algunos usuarios en la celda central del arreglo y se observó la potencia asignada a cada usuario y el SINR obtenido por cada uno en cada iteración del algoritmo de Foschini. Los usuarios elegidos fueron:

- El UE con cobertura más cercano a la MSB, denominado **primer UE con cobertura** .
- El UE con cobertura más alejado de la MSB, denominado **último UE con cobertura** .
- El UE sin cobertura más cercano a la MSB, el cual será llamado **primer UE sin cobertura** .
- El UE sin cobertura más alejado de la MBS, llamado **último UE sin cobertura** .

Usuarios por Celda	Primer UE con Cobertura	Último UE con Cobertura	Primer UE sin Cobertura	Último UE sin Cobertura
20	31.2565m	288.843m	No existe	No existe
60	34.1464m	295.8225m	184.0363m	291.2721m
120	31.1235m	285.2725m	98.1545m	297.8211m
200	31.3044m	19.8332m	51.234m	298.8714m

Tabla 3.1. Distancia desde la Estación Base del Primer y Último Usuario con Cobertura y sin Cobertura para un Radio de Celda de 0.3Km y una SINR mínima de -20 dB.

tabla 3.1 muestra las distancias a las que se encuentran estos cuatro usuarios de la estación base, en las simulaciones realizadas para 20, 60, 120 y 200 usuarios por celda, mientras que la figura 3.9 y la figura 3.10 muestran, respectivamente, la potencia y la SINR obtenida por cada usuario para cada iteración del algoritmo de Foschini. En el caso de 20 usuarios por celda, todos los usuarios obtuvieron cobertura, de manera que no existen usuarios sin cobertura.

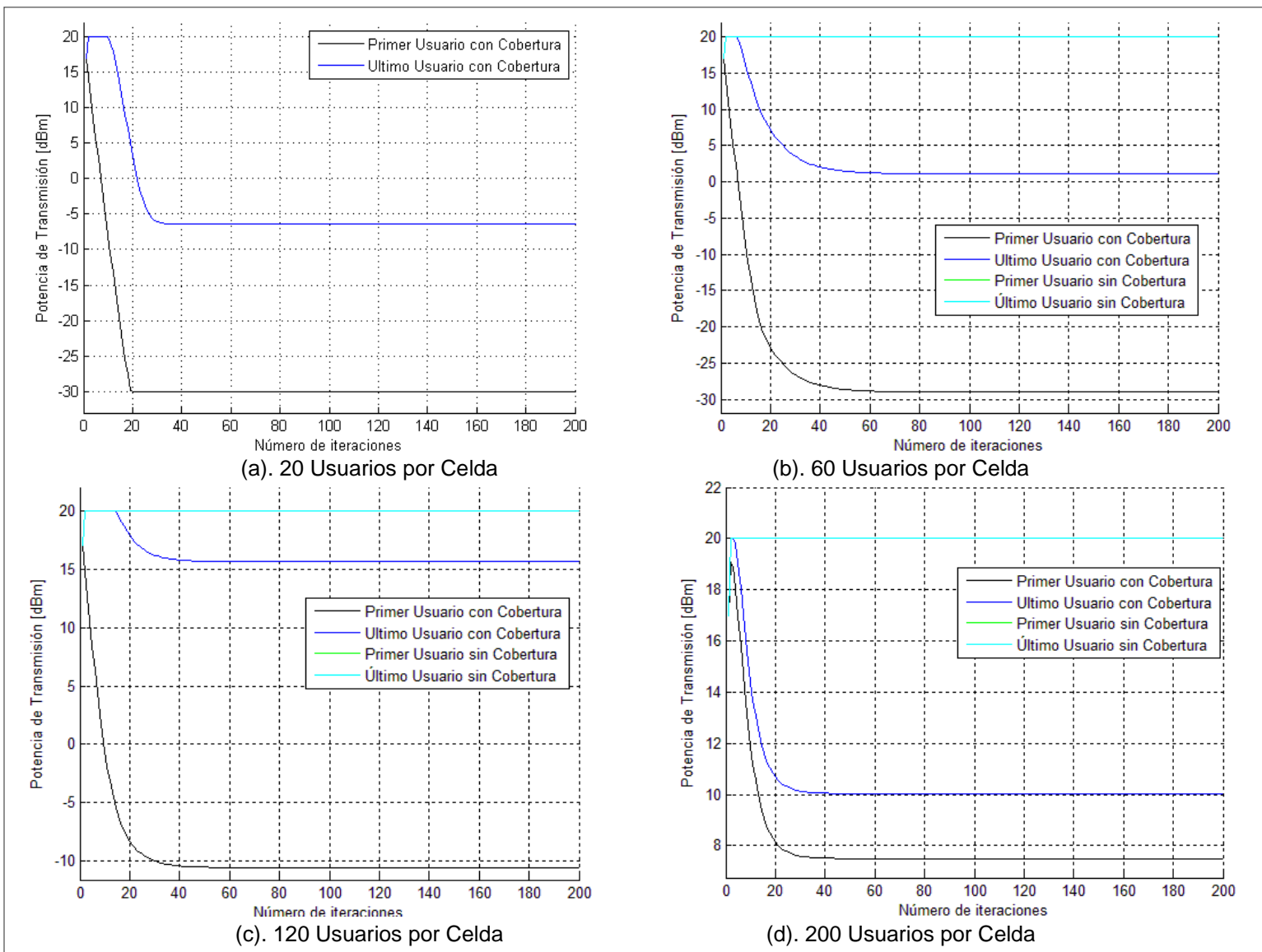


Figura 3.9. Potencia de Transmisión para el Primer y Último usuario Con y Sin Cobertura para Radio de Celda 0.3 Km y SINR mínima -20 dB.

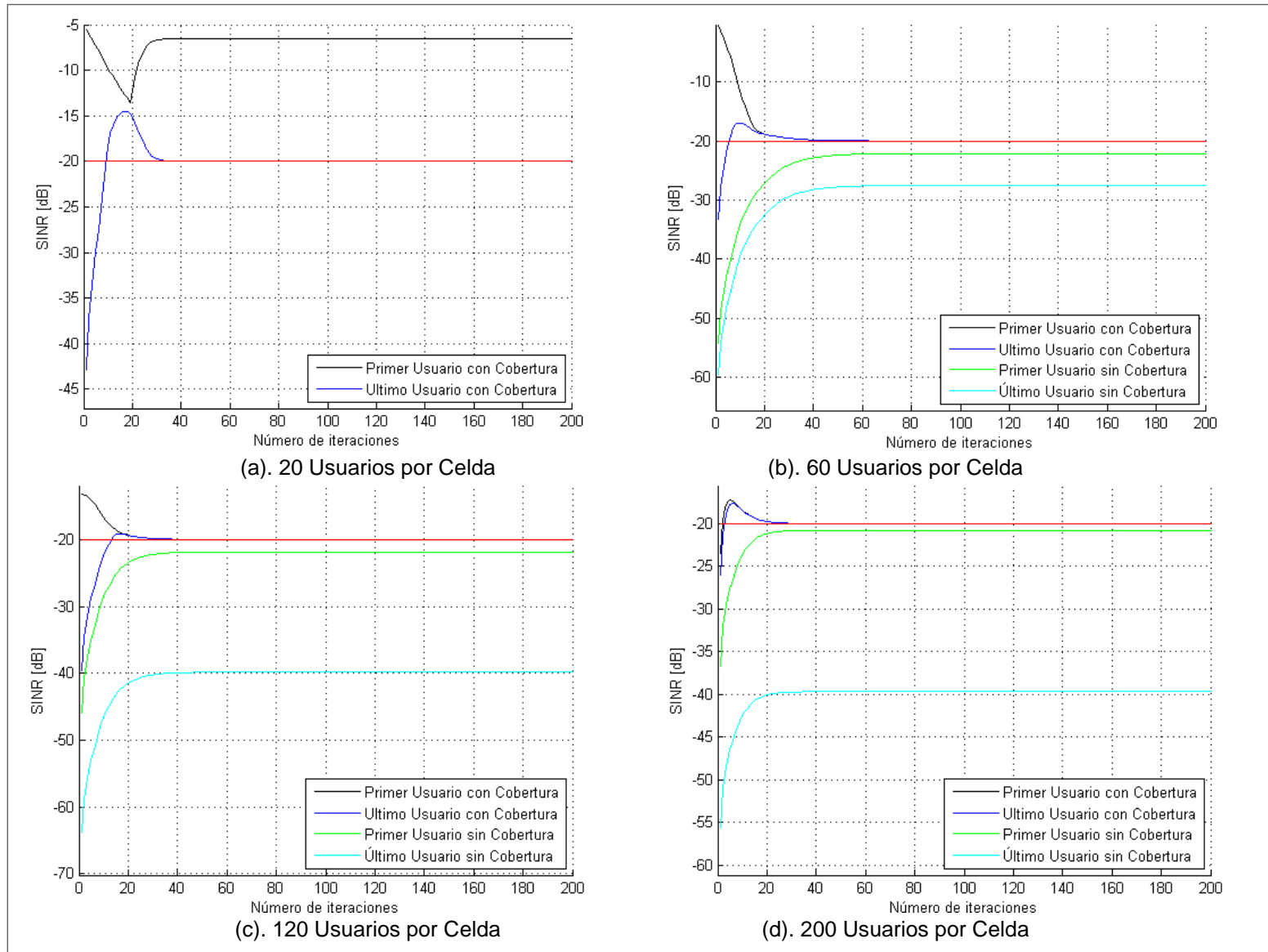


Figura 3.10. SINR para el Primer y Último Usuario Con y Sin Cobertura para Radio de Celda 0.3 Km y SINR mínima -20 dB





En la figura 3.9 se observa que en todos los casos considerados los usuarios que tienen cobertura alcanzan un valor de potencia estable a partir de entre 20 y 60 iteraciones, mientras que los usuarios que no alcanza cobertura fijan su valor de potencia al máximo de 20dBm a partir de las primeras iteraciones del algoritmo y la mantienen en ese valor durante el resto de iteraciones. Por otra parte, la potencia del usuario más alejado de la estación base, converge hacia un valor mayor que la del usuario más cercano, debido a que para este usuario las pérdidas de propagación son mayores. Además, puede notarse que el valor de potencia al que converge el usuario más cercano se incrementa al aumentar el número de usuarios, lo cual parece sugerir que el algoritmo intenta compensar los incrementos en la interferencia causados por el aumento de usuarios mediante un incremento en la potencia, no obstante el usuario más alejado no muestra siempre el mismo patrón ya que aunque para 20, 60 y 120 usuarios por celda, su valor de potencia estable se incrementa, el valor de potencia alcanzado para el caso de 200 usuarios por celda, disminuye respecto al alcanzado para 120 usuarios por celda. También puede notarse que en las primeras iteraciones, el usuario más alejado presenta un comportamiento similar al de los usuarios sin cobertura, incrementando su potencia hasta el valor máximo y manteniéndola en este valor durante algunas iteraciones. Sin embargo, a diferencia de los usuarios sin cobertura, a medida que el valor de potencia disminuye alcanza un valor estable menor que el máximo. Esto se debe a que el algoritmo de Foschini está diseñado para buscar el menor valor de potencia posible que satisfaga los requerimientos de SINR, de modo que se reduzca la interferencia.

Por otra parte, la figura 3.10 muestra el valor de SINR obtenido por los mismos usuarios correspondientes a la figura 3.9 para cada iteración del algoritmo de Foschini. El valor mínimo de SINR requerido para que un enlace tenga cobertura está señalado en las gráficas mediante una recta horizontal de color rojo. Puede observarse cómo el primer usuario con cobertura tiene, en las primeras iteraciones del algoritmo, un valor de SINR por debajo del requerimiento. Sin embargo la SINR aumenta rápidamente hasta superar el umbral para después decrecer y alcanzar un valor estable muy cercano a dicho umbral. Por otra parte, la SINR del usuario con cobertura más cercano a la MBS converge a -2dB en el caso de 20 usuarios por celda, valor que se encuentra muy por encima del umbral; Esto sugiere que, en condiciones de poca interferencia, el algoritmo logra suministrar una SINR superior a la mínima requerida para los usuarios cercanos. No obstante, al aumentar el número de usuarios, la SINR del usuario más cercano converge a la SINR mínima por valores superiores a esta, al igual que lo hace el usuario con convergencia más alejado. En la mayoría de los casos, el primer usuario con cobertura inicia con un valor de SINR superior al mínimo, sin embargo para la máxima interferencia considerada, la cual ocurre para el caso de 200 usuarios por celda, este usuario también inicia con una SINR negativa, al igual que el usuario más alejado.

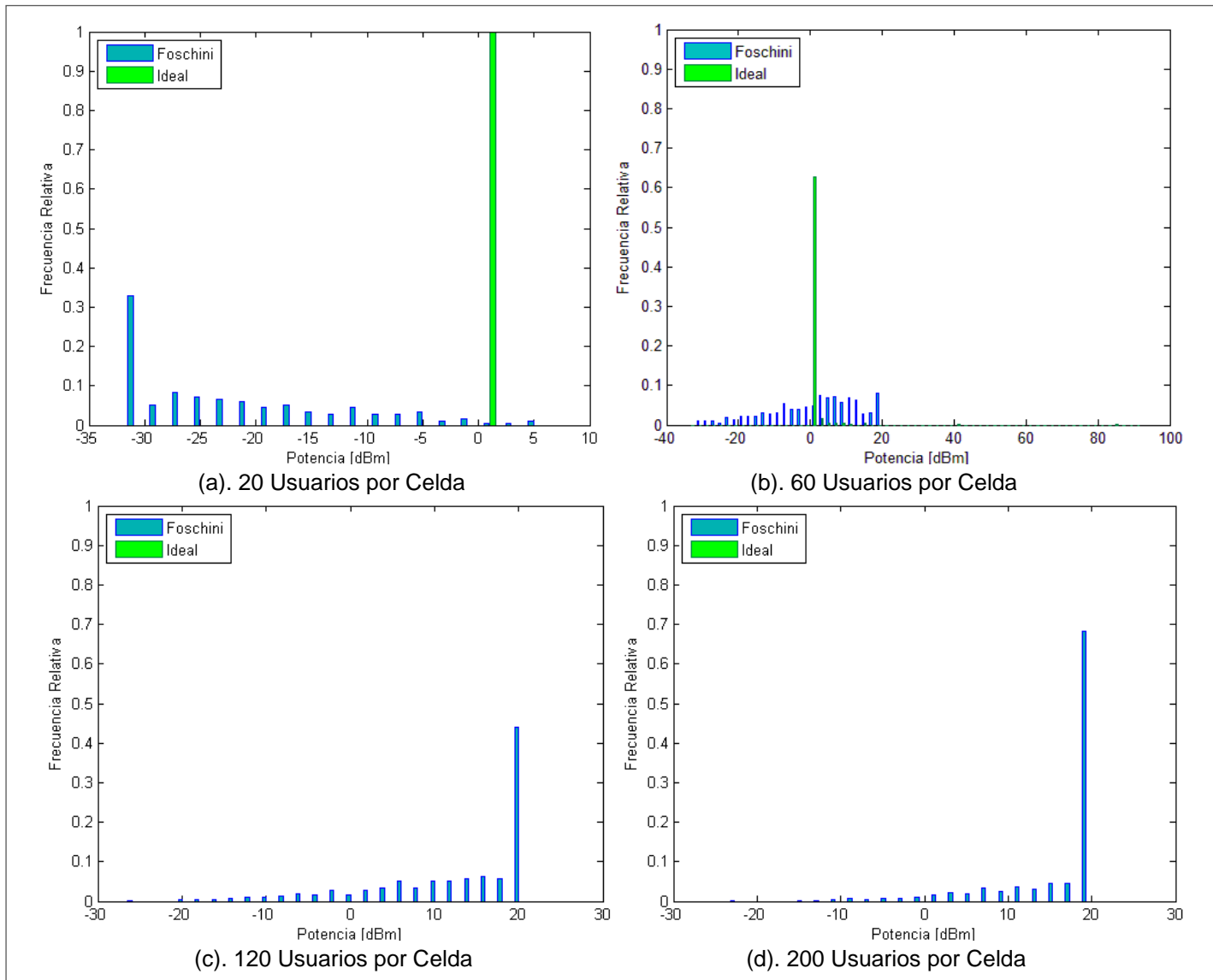


Figura 3.11. Histogramas de Potencia para IPC y Foschini para Radio de Celda 0.3 Km y SINR mínima -20 dB.



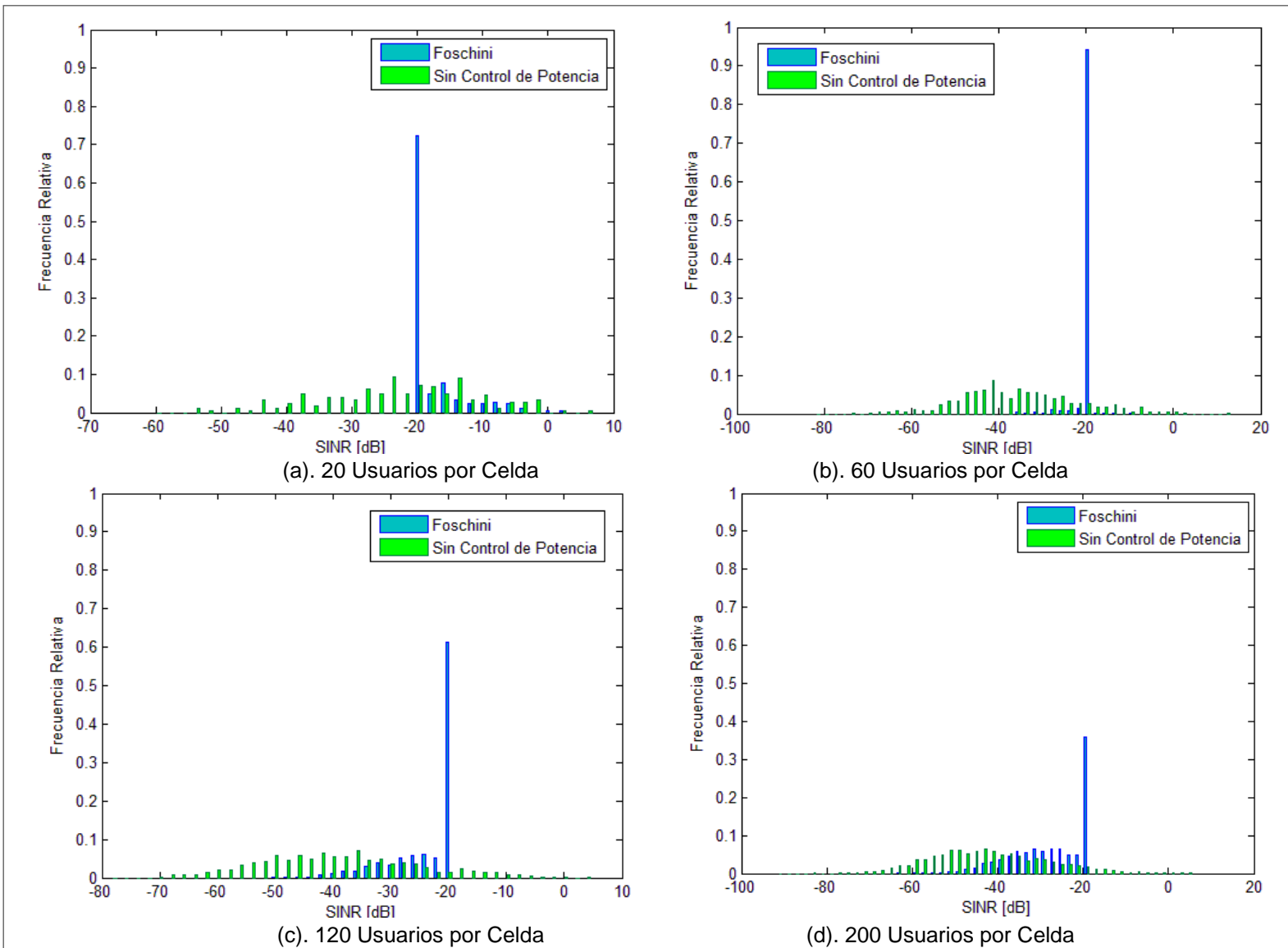


Figura 3.12. Histogramas de SINR para Foschini y Sin Control de Potencia para Radio de Celda 0.3 Km y SINR mínima -20 dB



- Análisis de los Histogramas de Potencia y SINR.

La figura 3.11 muestra los histogramas de potencia obtenidos al aplicar Control Ideal de Potencia (IPC) y el algoritmo de Foschini¹⁰ para 20, 60, 120 y 200 usuarios por celda. Para el IPC el histograma sólo incluye a los usuarios que logran cobertura, ya que los que no la obtienen no reciben una asignación de potencia válida. Por tal razón, en los casos en que el IPC no logró proporcionar cobertura a ningún este no se visualiza en el histograma de potencia. Para el caso de Foschini, los valores de potencia son los valores que los usuarios tienen al final de las 200 iteraciones del algoritmo momento en el que ya se ha alcanzado el estado estable.

En el caso del algoritmo de Foschini, se observa que, para 20 usuarios por celda, los valores de potencias más frecuentes se encuentran cerca del valor mínimo de -30 dBm y, a medida que aumenta el número de usuarios el histograma se desplaza hacia la derecha, indicando un aumento de potencia general en los usuarios, donde cada vez más usuarios tienen un valor de potencia cercano al máximo. Si se compara con lo observado al analizar la evolución temporal de la potencia, en la que la potencia de los usuarios sin cobertura tendía rápidamente al máximo, se puede inferir que el aumento de los usuarios con potencia máxima visto en el histograma es equivalente a un aumento de los usuarios sin cobertura. Dicha hipótesis es confirmada por el hecho de que el porcentaje de degradación se incrementa al aumentar el número de usuarios, como se mencionó anteriormente.

Para el caso del Control Ideal de Potencia (IPC) se observa para 20 usuarios por celda, que todos los usuarios tienen potencias cercanas a los 1 dBm, sin embargo, al aumentar el número de usuarios, de manera que finalmente desaparecen del histograma.

Por otra parte, la figura 3.12 muestra los histogramas de SINR para el algoritmo de Foschini y para el caso en que no se emplea Control de Potencia (PC), con los mismos números de usuarios por celda considerados en los histogramas de potencia. Para el algoritmo de Foschini puede observarse que para 20 usuarios por celda, la mayor parte de los usuarios obtienen una SINR cercana al umbral de -20 dB mientras que un pequeño porcentaje de usuarios obtiene valores superiores a este. A medida que aumenta el número de usuarios, la SINR el histograma se desplaza hacia la izquierda, es decir la SINR mínima disminuye. Para el caso de 60 usuarios esta disminución se observa en el hecho de que aumenta el número de usuarios con SINR mínima mientras que los porcentajes de usuarios con SINR mayor a la mínima disminuyen. Para números de usuarios mayores, disminuye la cantidad de usuarios con SINR mínima y aumentan los usuarios con SINR por debajo de la mínima, es decir que no logran cobertura. Esto se debe al aumento de la interferencia producido por el aumento de los usuarios así como el consiguiente aumento en potencia que se produce.

¹⁰ Para el caso en el que no se emplea control de potencia, todas las potencias fueron asignadas a un mismo valor, razón por la cual, no se incluye este caso en el histograma de potencia.

Los otros resultados, de las simulaciones individuales se encuentran en el anexo B.

3.1.2. Otros Radios de Celda

Para determinar el efecto del radio de la celda sobre la cobertura, se procedió a realizar obtener el mismo conjunto de resultados analizados en la sección 3.1.1 con radios de celda de 0.6 y 1Km. Desde la figura 3.13 hasta la figura 3.16 puede observarse la comparación realizada entre el radio de celda, el porcentaje de degradación, el porcentaje de usuarios con cobertura y el promedio de usuarios con cobertura por celda. En todos los casos se nota una gran cercanía entre los resultados obtenidos para todos los radios de celda, de manera que el análisis se limitará sólo al radio de celda de 0.3 Km mientras que los resultados para los demás radios de celdas son presentados en el anexo B.

Debe considerarse de manera especial el radio de cobertura ya que este es presentado de manera relativa al radio de la celda. Esto implica que un incremento en el radio de la celda, producirá un incremento proporcional en el radio de cobertura.

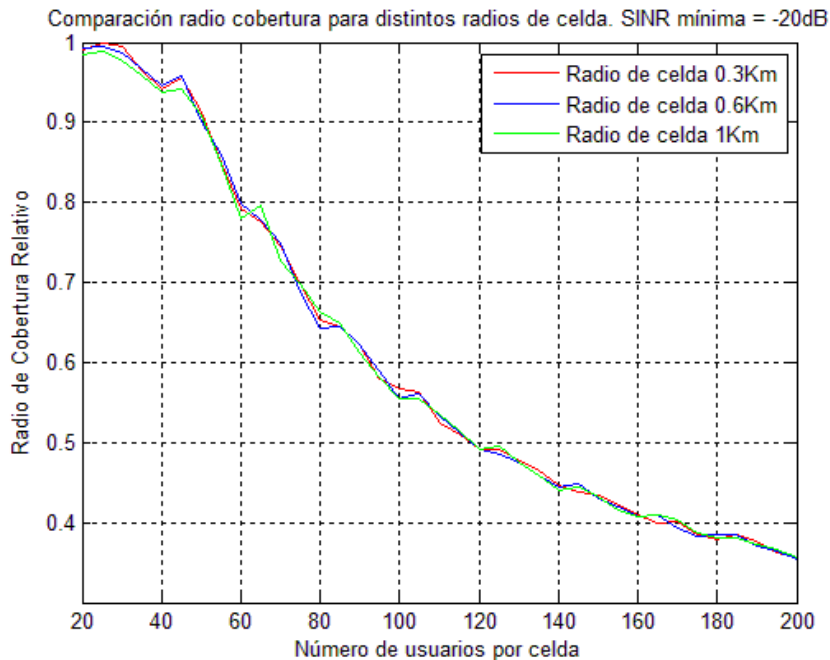


Figura 3.13. Comparación Radios de Cobertura Relativos Obtenidos para Distintos Radios de Celda para una SINR mínima de -20 dB.

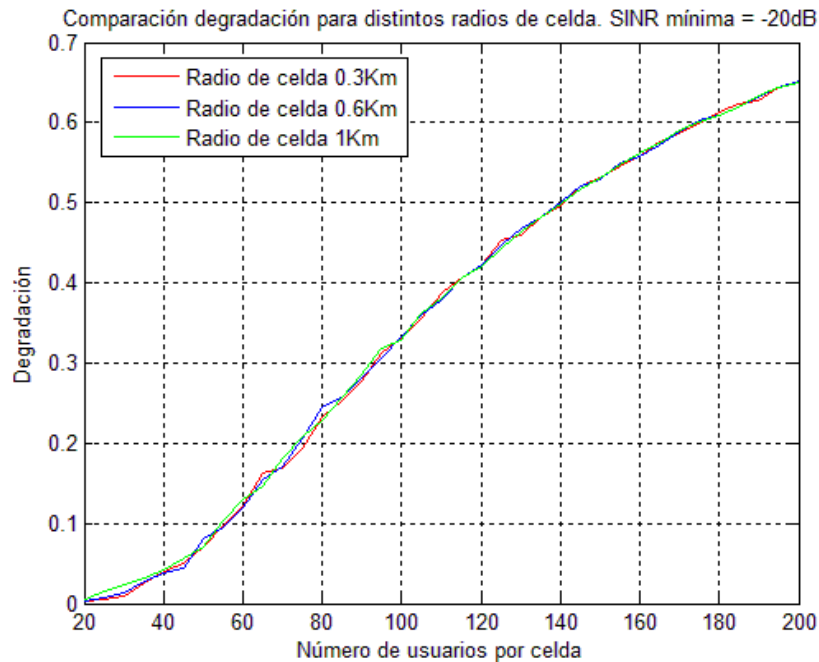


Figura 3.14. Comparación Porcentajes de Degradación Obtenidos para Distintos Radios de Celda para una SINR mínima de -20 dB.

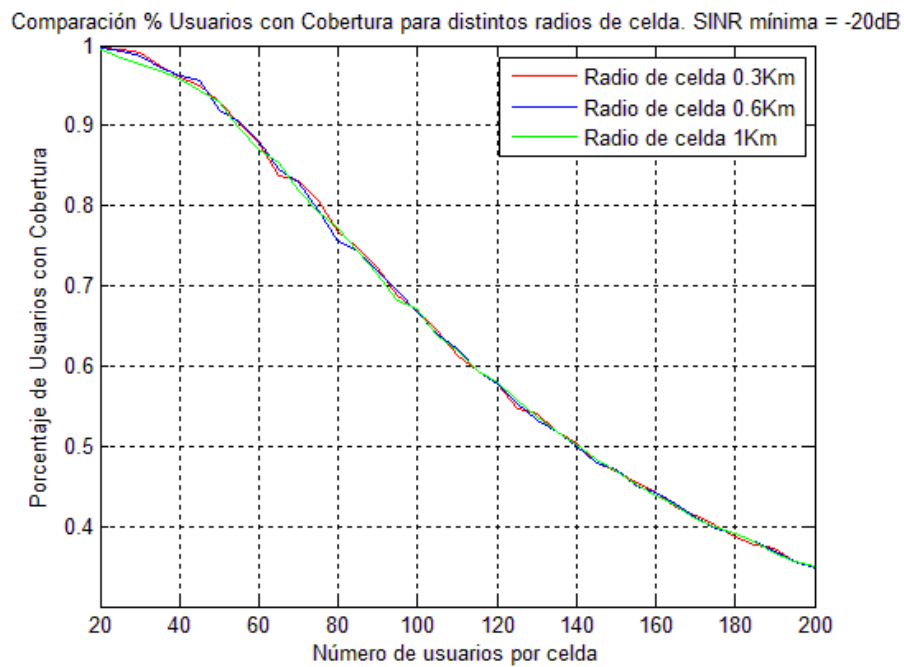


Figura 3.15. Comparación Porcentajes De Usuarios con Cobertura Obtenidos para Distintos Radios de Celda para una SINR mínima de -20dB.

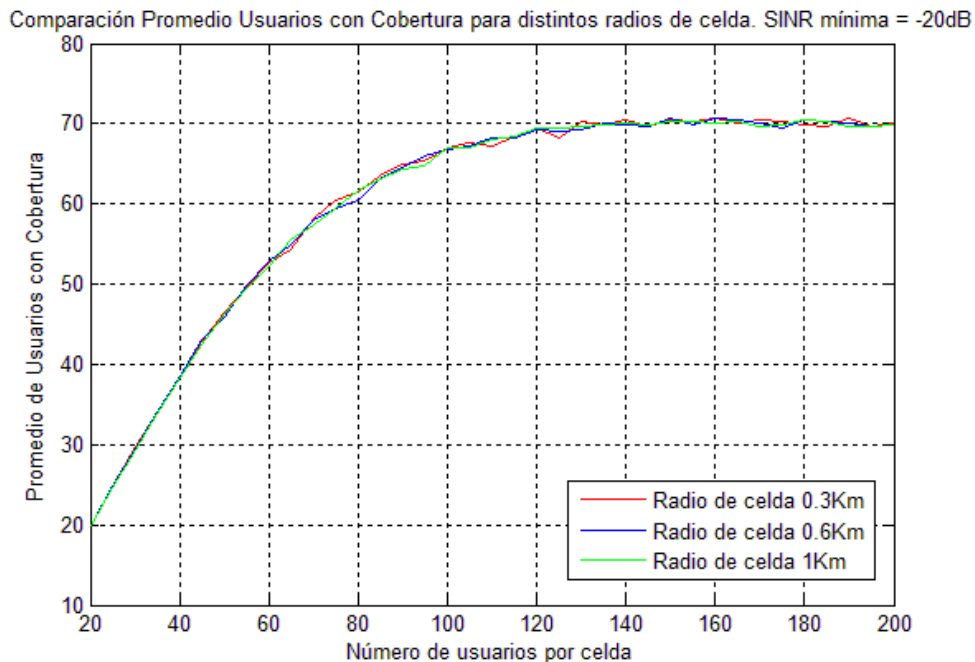


Figura 3.16. Comparación Promedio De Usuarios con Cobertura para Distintos Radios de Celda para una SINR mínima de -20 dB.

3.2. RESULTADOS PARA SINR DE -14 dB

Para determinar el efecto de un aumento en los requerimientos de SINR, se obtuvieron todos los resultados expuestos en la sección 3.1 incrementando la SINR mínima a un valor de -14 dB. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

3.2.1. Radio de Celda de 0.3Km

3.2.1.1. Resultados Simulación Iterativa.

La figura 3.17 muestra la variación del radio de cobertura contra el número de iteraciones. En todas se observa una tendencia general a decrecer a medida que aumenta el número de usuarios y, al igual que en el caso de SINR mínima de -20dB el algoritmo de Foschini ofrece mejor radio de cobertura que IPC y que no emplear PC. Sin embargo, en este caso el radio de cobertura se mantiene por debajo del 65 % del radio de la celda para el caso de Foschini, de modo que no se logra establecer cobertura total. Además el control ideal decae a cobertura nula a partir de los 30 usuarios por celda. Al comparar estos resultados con los obtenidos en la sección 3.1.1, se percibe una disminución apreciable en la cobertura al aumentar los requerimientos de SINR.



Por otra parte, la figura 3.18 muestra el porcentaje de degradación en función del número de usuarios por celda. Se puede apreciar que el algoritmo de Foschini produce la menor degradación entre los tres tipos de control de potencia, sin embargo esta se mantiene por encima del 22 %, lo cual podría resultar inaceptable en algunas aplicaciones. Al comparar con los resultados obtenidos en la sección 3.1.1 se observa un incremento considerable en la degradación debido al aumento en los requerimientos de SINR.

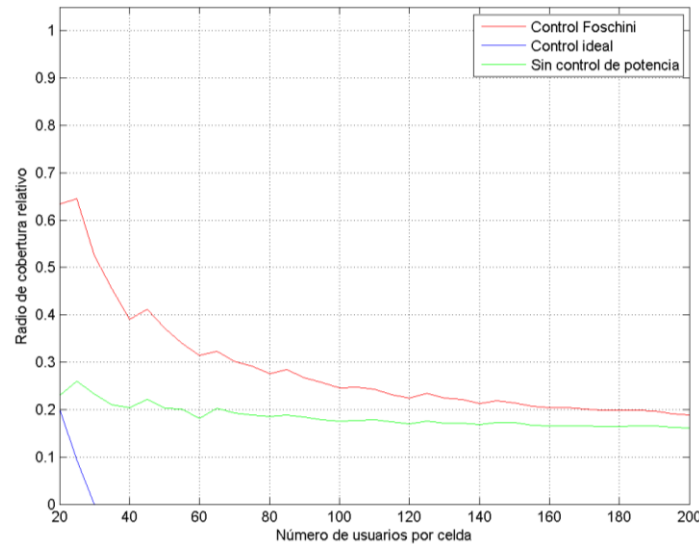


Figura 3.17. Radio de Cobertura Relativo Vs Número de Usuarios por Celda para Control Ideal, Foschini y Sin Control de Potencia, Radio de Celda 0.3 Km y SINR mínima -14 dB.

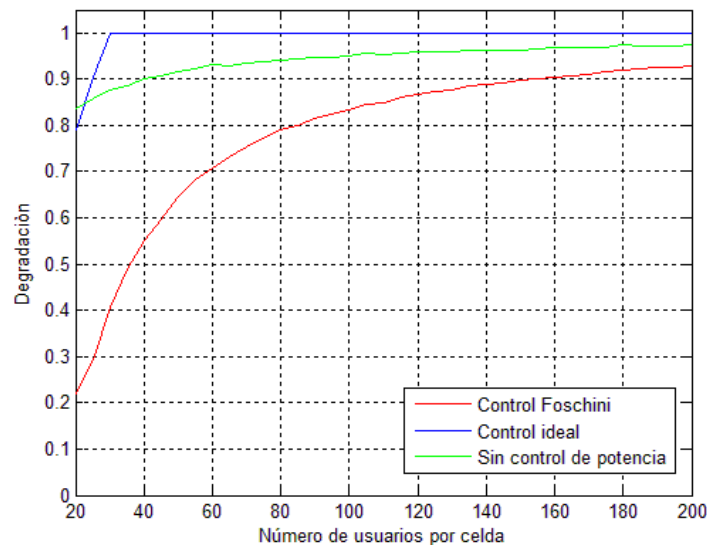


Figura 3.18. Porcentaje de Degradación Relativo Vs Número de Usuarios por Celda para Control Ideal, Foschini y Sin Control de Potencia, Radio de Celda 0.3 Km y SINR mínima de -14 dB



Al igual que en el apartado 3.1.1, se procedió a graficar la relación entre la degradación y el radio de cobertura y a aproximarla linealmente por el método de mínimos cuadrados. Esto semuestra en la figura 3.19

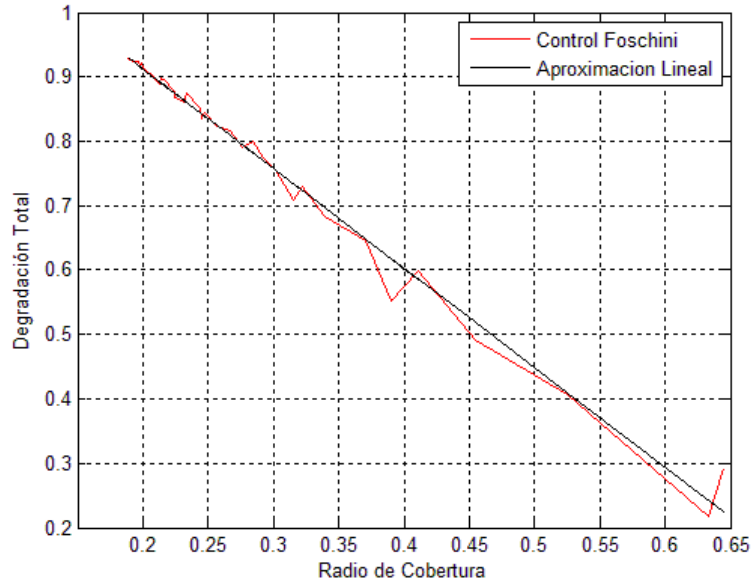


Figura 3.19. Porcentaje de Usuarios con Degradación Contra Radio de Cobertura para Foschini para un Radio de Celda de 0.3 Km y SINR mínima de -14dB.

La aproximación lineal obtenida es

$$\%D = -1.5465R_C + 1.2216 \quad (3.2)$$

Donde $\%D$ es el porcentaje de usuarios con degradación y R_C es el radio de cobertura relativo a la celda en Km. Esta aproximación produce una desviación de 0,0523, es decir el error medio cometido es del 5.23%, de manera que la aproximación lineal obtenida para una SINR de -14dB es más precisa que la obtenida para SINR de -20 dB en la cual se obtuvo un error de 7.04 %.

La variación del porcentaje de usuarios con cobertura y el promedio de usuarios con cobertura por celda son mostradas en la figura 3.20. En ellas se puede ver que el porcentaje de usuarios con cobertura obtenido al emplear el algoritmo de Foschini es mayor que al emplear el IPC y al no emplear PC. Para el caso de Foschini, no se sobrepasa el 78 % de usuarios con cobertura y este valor tiene a disminuir a media que aumenta el número de usuarios. En cuanto al promedio de usuarios por celda, mostrado en la figura 3.20(b) se observa un aumento hasta que el número de usuarios por celda llega a 50, valor para el cual existe un promedio de 18 usuarios, el cual es la cantidad máxima de usuarios con cobertura



por celda obtenido. A partir de este punto, un aumento en el número de usuarios produce una reducción del promedio de usuarios con cobertura, comportamiento que difiere del observado en la sección 3.1.1 para una SINR mínima de -20dB, en el que el promedio de usuarios con cobertura por celda se mantenía estable ante incrementos del número de usuarios totales por celda.

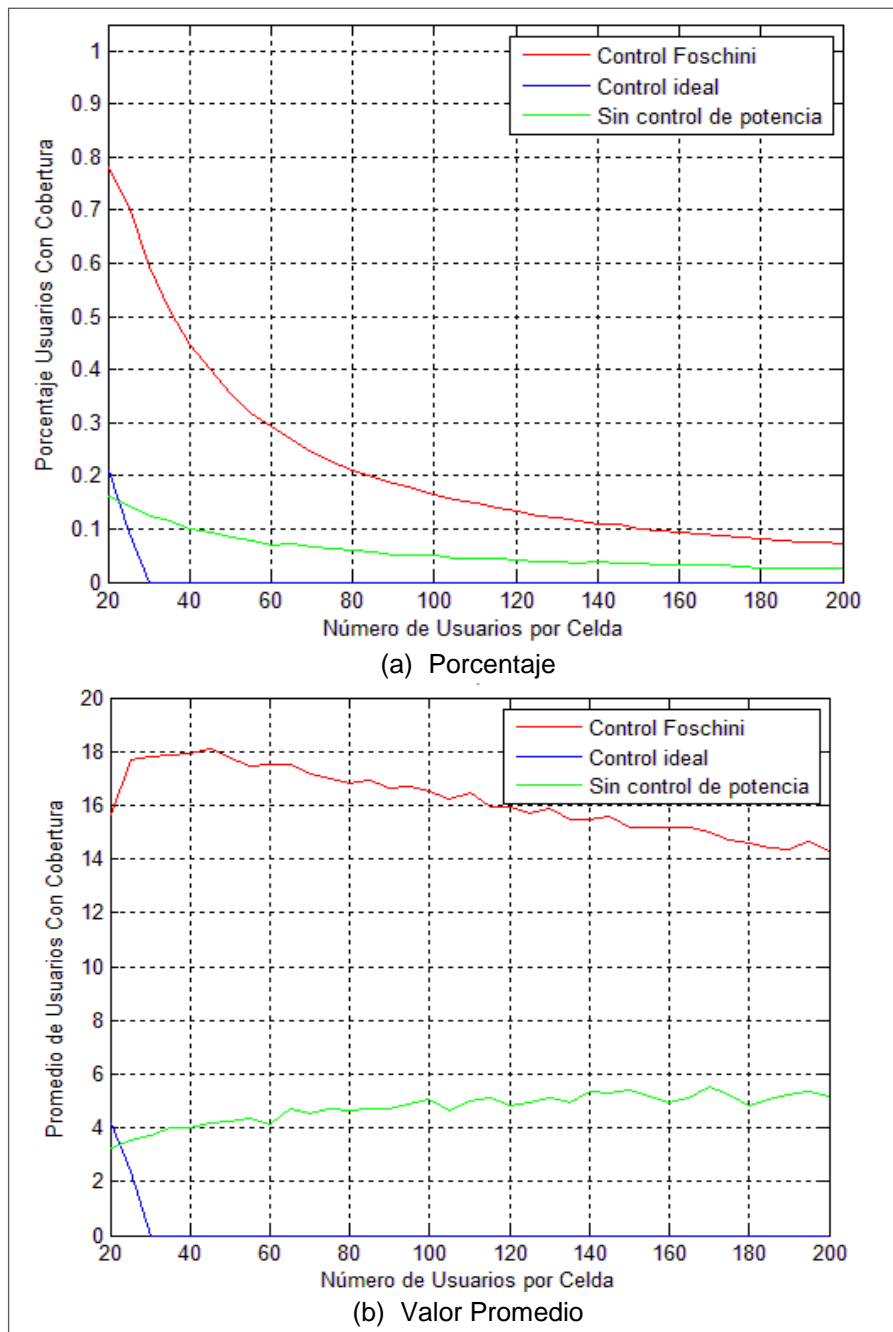


Figura 3.20. Usuarios con Cobertura Vs Número de Usuarios por Celda para Control Ideal, Foschini y Sin Control de Potencia, Radio de Celda 0.3 Km y SINR mínima de -14 dB.



3.2.1.2. Resultados Simulación Simple.

- Análisis de la Evolución Temporal de Potencia y SINR para el Algoritmo de Foschini

Al igual que en la sección 3.1.1. Se procedió a realizar el análisis de la evolución temporal de la potencia y del SINR para el usuario con cobertura más cercano, el usuario con cobertura más lejano, el usuario sin cobertura más cercano y el usuario sin cobertura más lejano. La tabla 3.2 muestra las distancias a las que se encuentran estos usuarios desde la estación base, para cada una de las simulaciones simples realizadas.

Usuarios por Celda	Primer UE con Cobertura	Último UE con Cobertura	Primer UE sin Cobertura	Último UE sin Cobertura
20	32.4535m	271.0372m	203.2315m	294.7665m
60	31.9640m	135.5498m	31.8667m	298.3737m
120	31.6377m	133.1223m	64.5826m	298.6082m
200	30.5033m	122.6604m	30.7305m	299.6961m

Tabla 3.2. Distancia desde la Estación Base del Primer y Último Usuario con Cobertura y sin Cobertura para un Radio de Celda de 0.3Km y una SINR mínima de -14 dB.

La figura 3.21 muestra la potencia asignada por el algoritmo de Foschini en cada iteración a cada uno de los cuatro usuarios mencionados anteriormente para 20, 60, 120 y 200 usuarios por celda. El comportamiento general es similar al observado en la figura 3.9, es decir, los usuarios que no logran cobertura incrementan su potencia en las primeras iteraciones hasta que esta alcanza el valor máximo permitido y permanece en él durante todas las siguientes iteraciones, mientras que para los usuarios con cobertura la potencia converge a un valor menor que la máxima antes de las 60 iteraciones. Al comparar la figura 3.9 con la figura 3.21, se observa que al aumentar la SINR mínima, aumenta la mayoría de los valores a los que la potencia converge. Debido a que para compensar el incremento en la SINR el algoritmo asigna potencias mayores.

La figura 3.22 muestra la variación de la SINR de los cuatro usuarios seleccionados a medida que se itera el algoritmo de Foschini para el mismo número de usuarios por celda considerados en las gráficas de potencia de la figura 3.21. Al comparar las gráficas de la figura 3.22 con las de la figura 3.10 se observa que su comportamiento es similar, es decir, los usuarios sin cobertura tienden hacia un valor estable que está por debajo del requerimiento de SINR. Los usuarios con cobertura tienden a aproximarse hacia la SINR mínima, por valores mayores a ésta. A nivel general, los resultados sugieren que el incremento en los requerimientos de SINR y el aumento de potencia que este conlleva. Sin embargo, solo con estas observaciones, no es posible determinar una tendencia general al aumento o disminución de los valores de SINR hacia los que tienden los usuarios sin cobertura. Esto será analizado mediante el histograma de SINR.

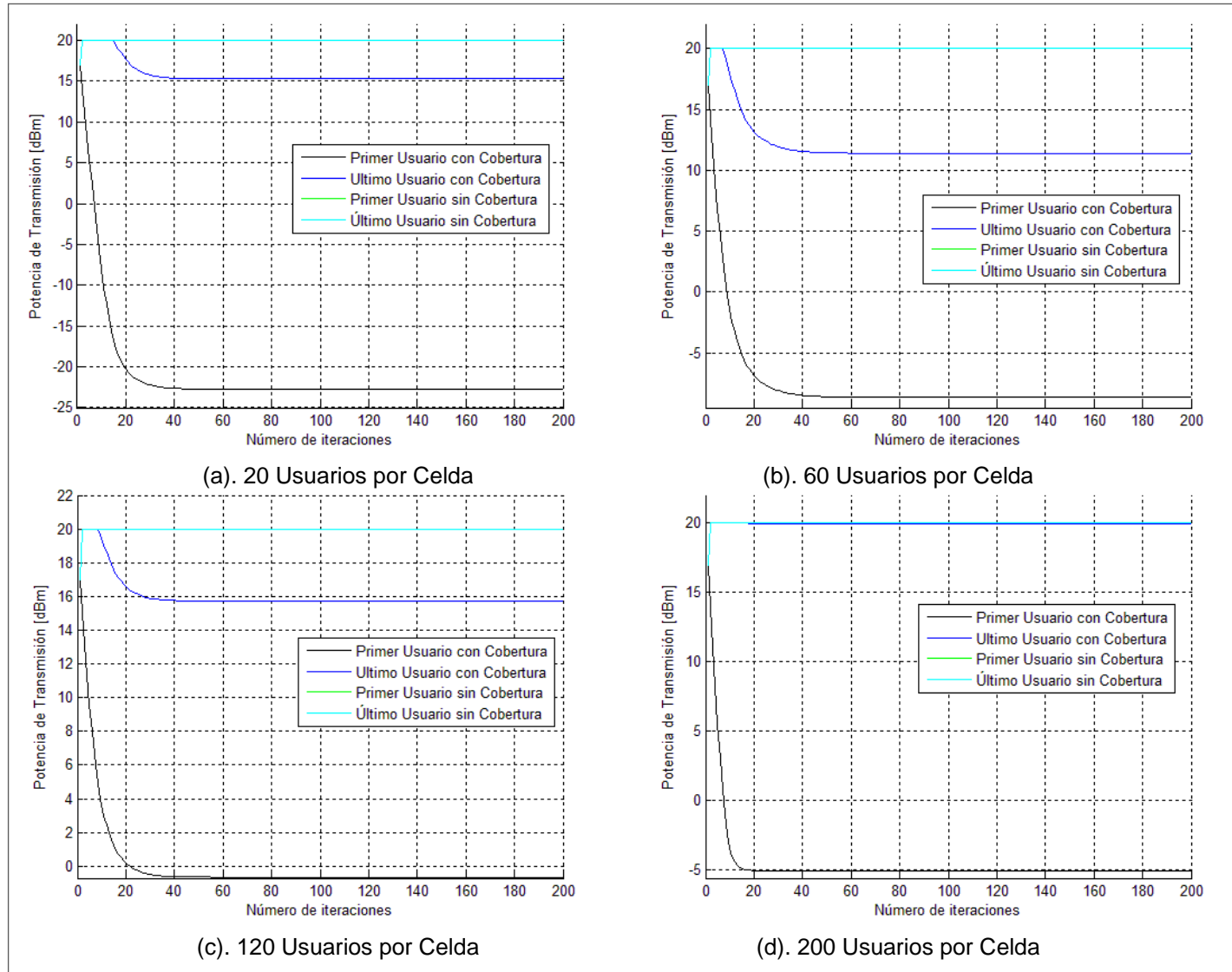


Figura 3.21. Potencia de Transmisión para el Primer y Último usuario Con y Sin Cobertura para Radio de Celda 0.3 Km y SINR mínima -14 dB.



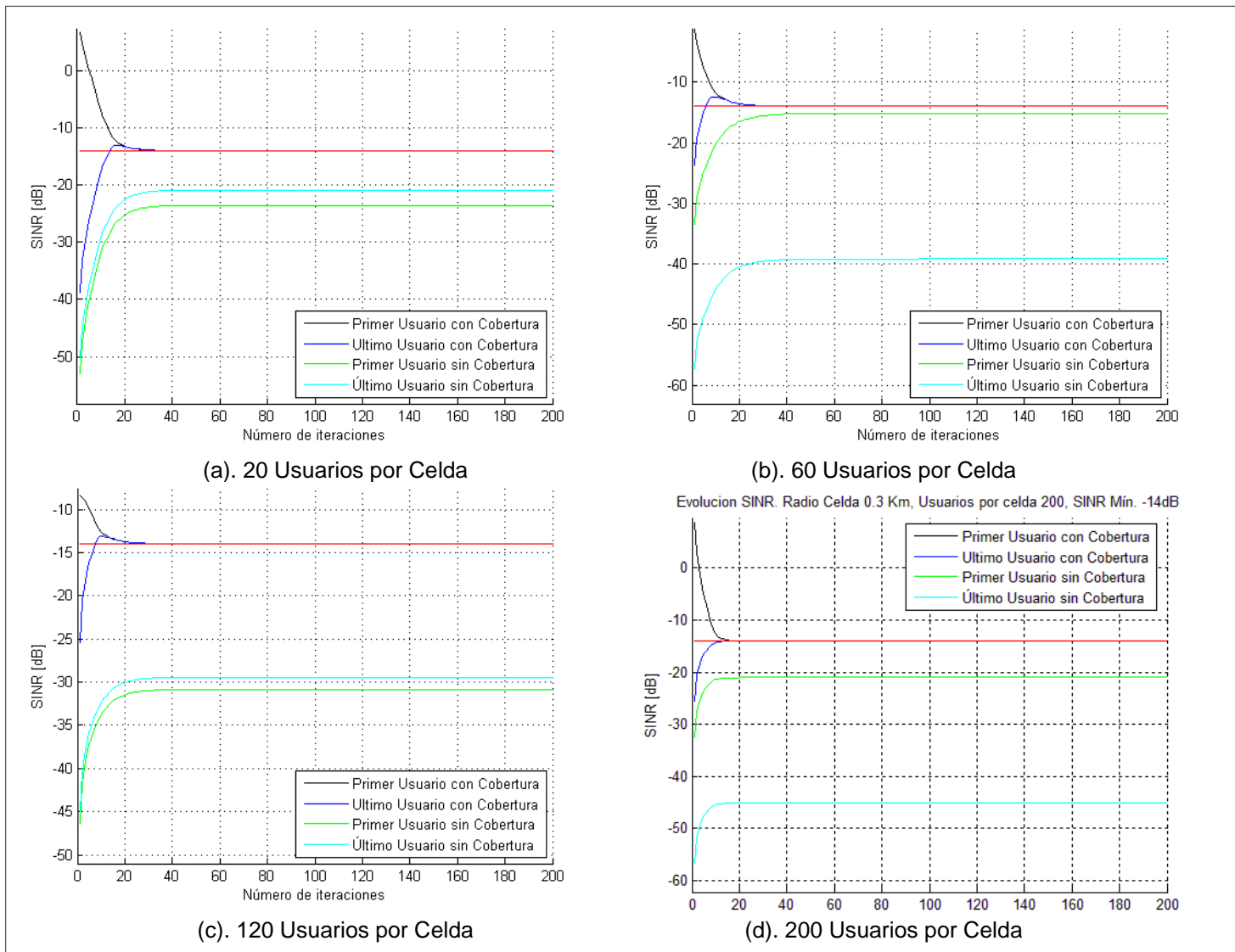


Figura 3.22. SINR para el Primer y Último Usuario Con y Sin Cobertura para Radio de Celda 0.3 Km y SINR mínima -14 dB



- Análisis de los Histogramas de Potencia y SINR.

La figura 3.23 muestra los histogramas de potencia obtenidos para 20, 60, 120 y 200 usuarios por celda. En todos los histogramas, se observa que un porcentaje alto de usuarios transmiten con la potencia máxima mientras que un porcentaje pequeño de usuarios transmite con potencias menores a esta. Al aumentar el número de usuarios, se observa un incremento del porcentaje de usuarios transmitiendo con la máxima potencia, pasando de cerca del 30 % para 20 usuarios por celda a más del 95 % para 200 usuarios por celda. Este comportamiento es similar al observado para el caso de SINR mínima igual a -20dB , en la figura 3.11. Sin embargo, al comparar los dos casos, se observa que al incrementar los requerimientos de SINR, aumenta la cantidad de usuarios que transmiten a potencia máxima, lo cual según el análisis realizado en la sección 3.1.1 significa que existen más usuarios sin cobertura.

Por otra parte, la figura 3.24 muestra los histogramas de SINR correspondientes a los histogramas de potencia analizados en el párrafo anterior. En ellos se observa que, a medida que aumenta el número de usuarios por celda, disminuye la cantidad de usuarios cuyo SINR es igual al mínimo y aumenta la cantidad de usuarios con un SINR menor al mínimo. Este comportamiento es similar al observado en la figura 3.12, sin embargo, la cantidad de usuarios con SINR inferiores a la mínima es mayor cuando se tiene un requerimiento de SINR más alto. Esto reduce la cantidad de usuarios con cobertura, lo cual es coherente con la disminución en el radio de cobertura y el porcentaje de degradación previamente observada

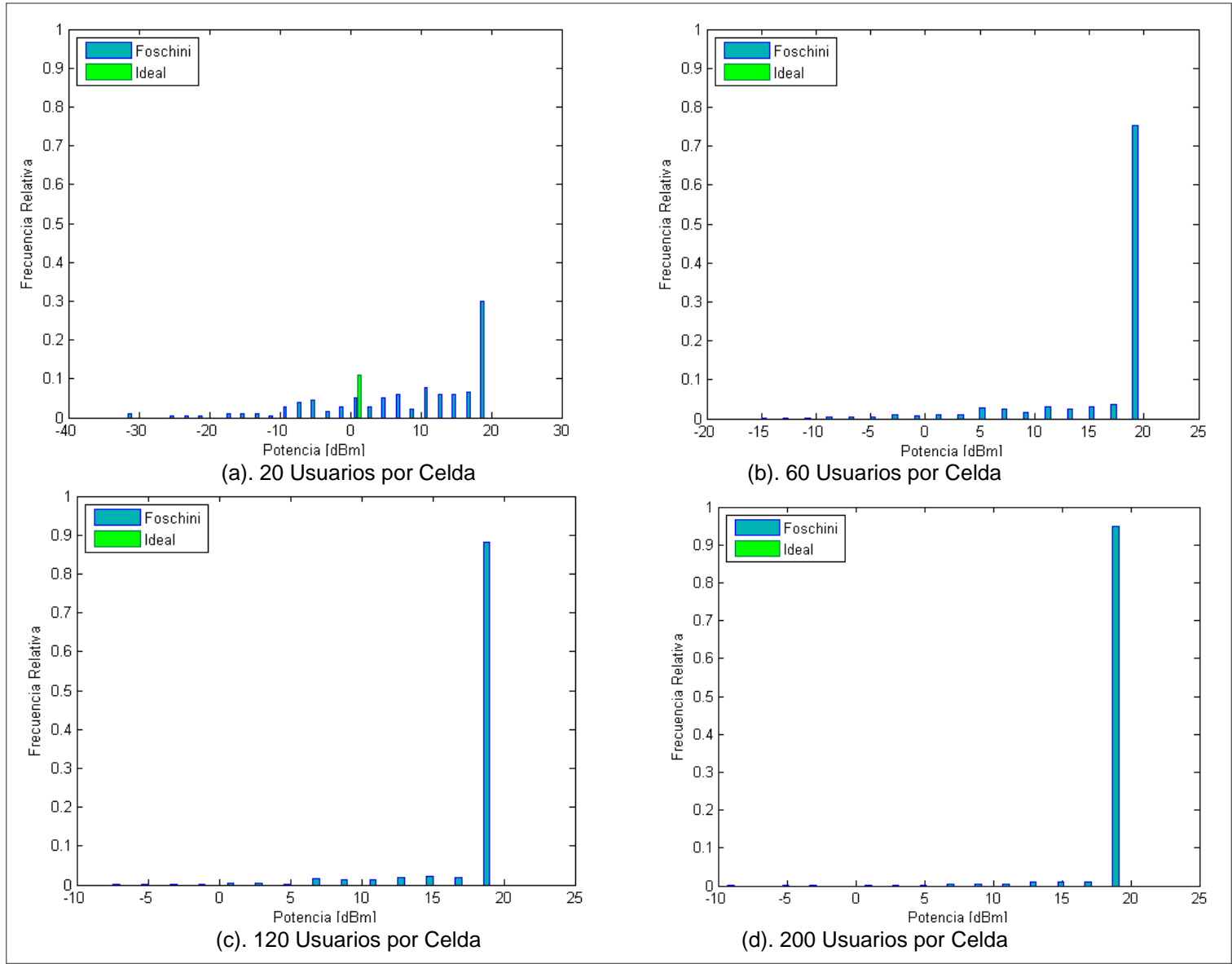


Figura 3.23 Histogramas de Potencia para IPC y Foschini para Radio de Celda 0.3 Km y SINR mínima -14 dB

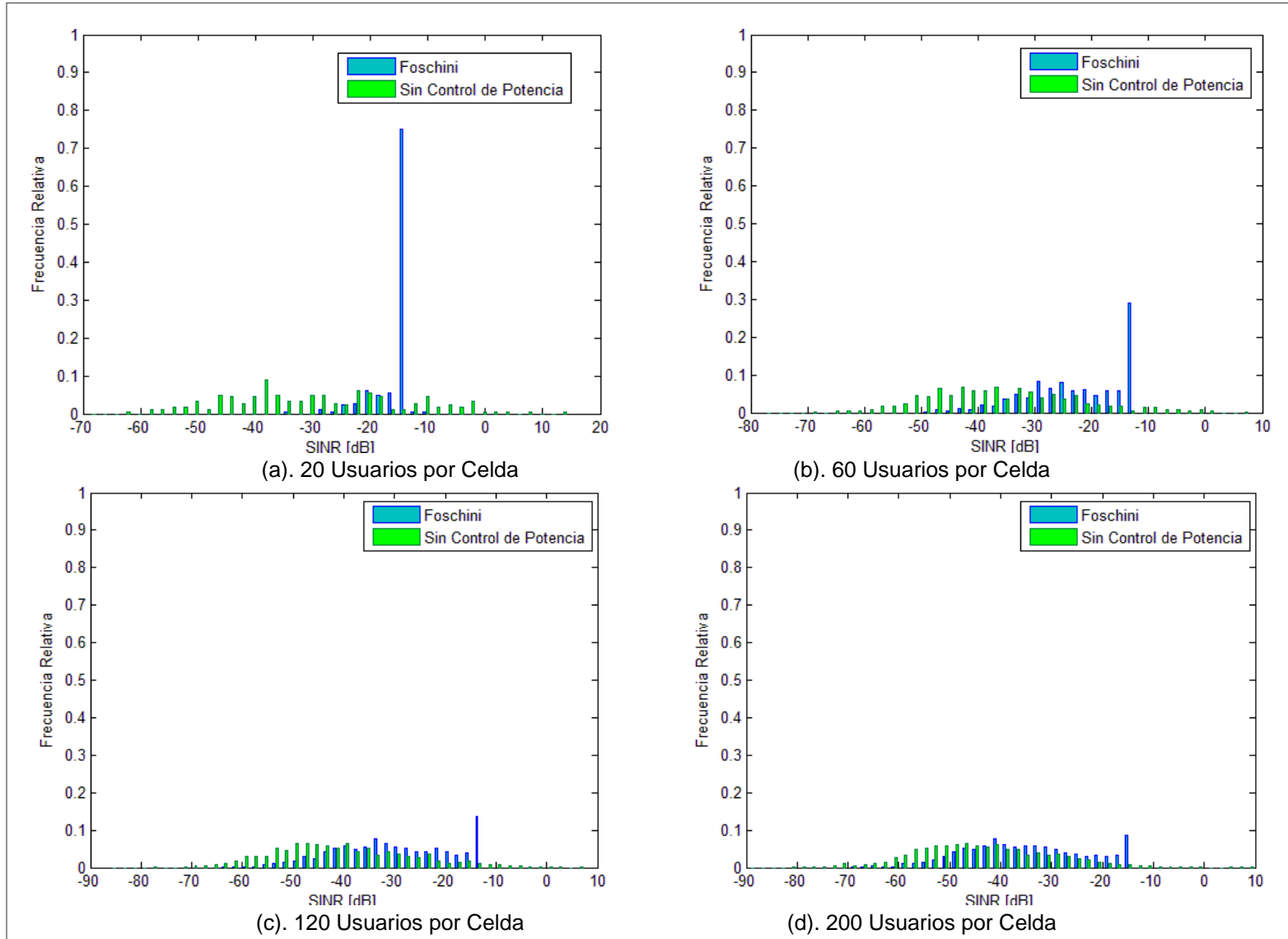


Figura 3.24. Histogramas de SINR para Foschini y Sin Control de Potencia para Radio de Celda 0.3 Km y SINR mínima -14 dB





3.2.2. Otros Radios de Celda

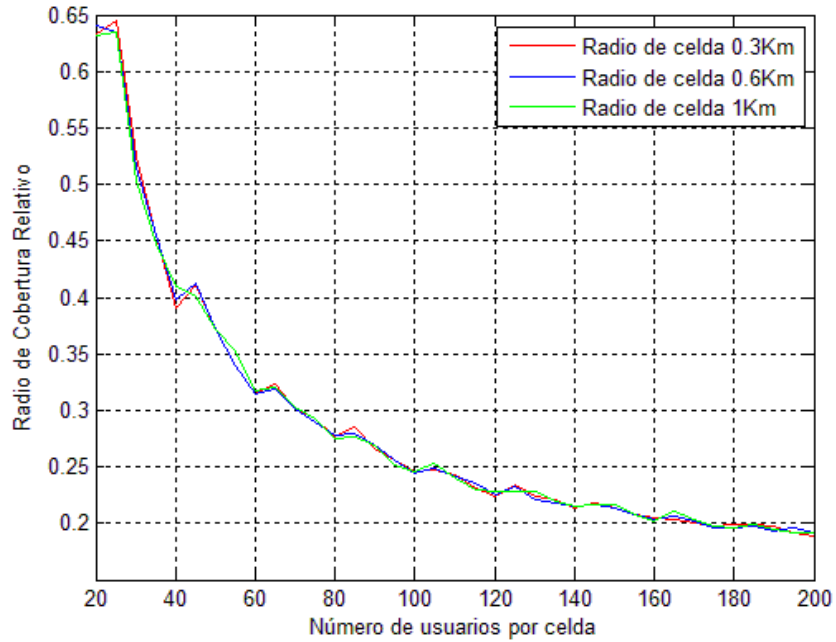


Figura 3.25. Comparación Radios de Cobertura Relativos Obtenidos para Distintos Radios de Celda para una SINR mínima de -14 dB

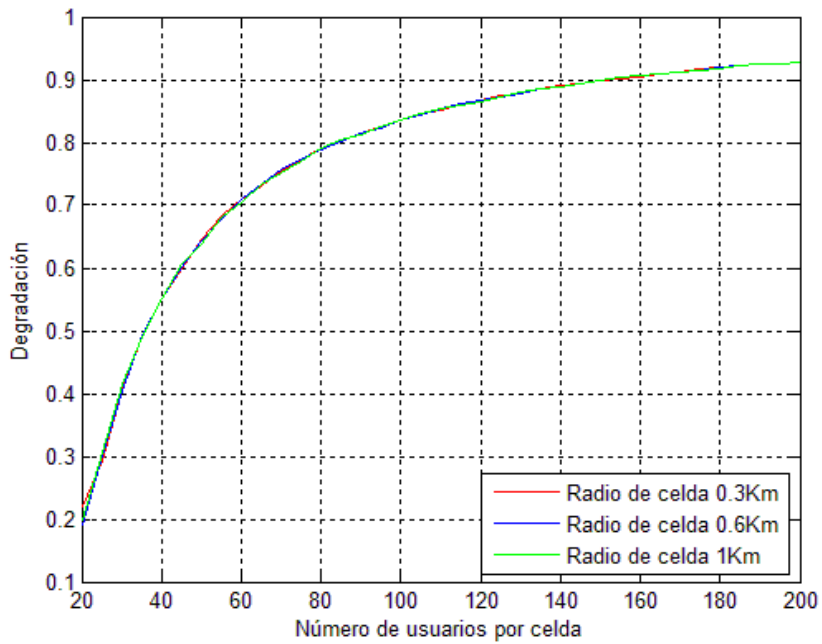


Figura 3.26. Comparación Porcentajes de Degradación Obtenidos para Distintos Radios de Celda para una SINR mínima de -14 dB.



Los resultados analizados para celdas de radio 0.3Km, en la sección 3.2.1, también fueron obtenidos para radios de celda de 0.6Km y 1 Km. Estos resultados se presentan en el anexo B. Sin embargo, para verificar el efecto del radio de celda sobre la cobertura, se procedió a realizar la comparación del radio de cobertura relativo, el porcentaje de degradación, el porcentaje de usuarios con cobertura y el promedio de usuarios con cobertura obtenidos para cada uno de los tres radios de celda. En la figura 3.25 a la figura 3.28 se muestran estas comparaciones, las cuales muestran que el radio de cobertura no modifica apreciablemente el comportamiento de estas variables.

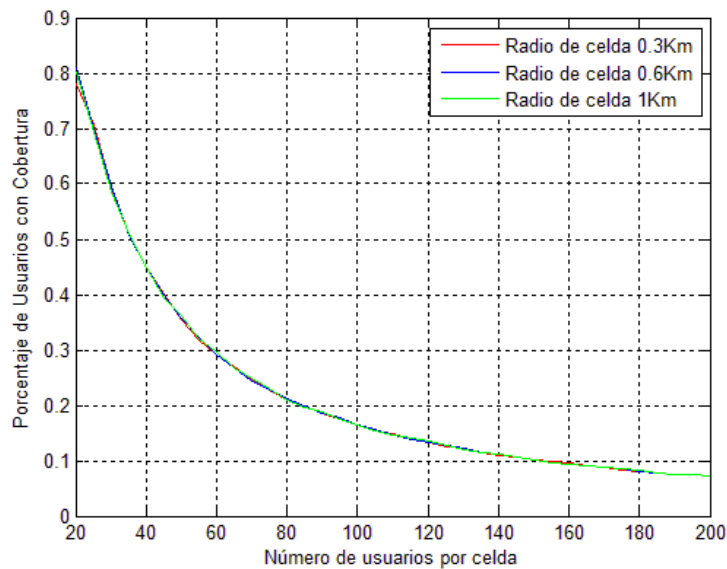


Figura 3.27. Comparación Porcentajes De Usuarios con Cobertura Obtenidos para Distintos Radios de Celda para una SINR mínima de -14 dB.

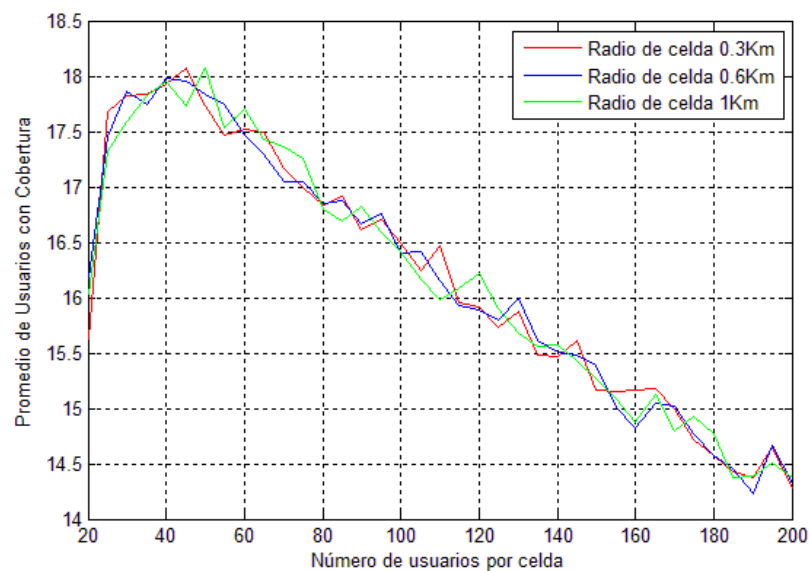


Figura 3.28. Comparación Promedio De Usuarios con Cobertura para Distintos Radios de Celda para una SINR mínima de -14 dB.



3.3. RESUMEN DE RESULTADOS

La tabla 3.3 muestra un resumen de los principales resultados, relacionados con la cobertura, obtenidos al emplear control de potencia basado en algoritmo de Foschini al realizar simulaciones en modo simple con distintos radios de celda, requerimientos de SINR y número de usuarios por celda considerados. En ella puede apreciarse la disminución del radio de cobertura así como el aumento en el porcentaje de degradación y el incremento en la potencia de transmisión que resultan al incrementar los requerimientos de SINR y el número de usuarios por celda.

Radio de Celda	No de Usuarios por Celda	SINR de -20dB					SINR de -14dB				
		Porcentaje de Usuarios con Cobertura (Capacidad)	Radio de Cobertura Relativo	Porcentaje Degradación	Potencia de Tx más frecuente [dBm]	% Usuarios con Potencia de Tx más frecuente	Porcentaje de Usuarios con Cobertura (Capacidad)	Radio de Cobertura Relativo	Porcentaje Degradación	Potencia de Tx más frecuente [dBm]	% Usuarios con Potencia de Tx más frecuente
0.3 Km	20	100	1	0	-31	11	60.9051	0.733333	39.0949	20	30
	60	82.9201	0.844444	27.0799	20	19	31.9196	0.288889	68.0804	20	76
	120	51.4250	0.588889	48.5750	20	45	20.7662	0.131481	79.2338	18	90
	200	34.9779	0.356667	65.0221	20	70	18.6866	0.064444	81.3134	18	94
0.6 Km	20	100	1	0	-30	12	55.5262	0.755556	44.4738	18	34
	60	77.4250	0.855556	22.5750	20	21	28.9161	0.285185	71.0839	18	76
	120	48.1367	0.545370	51.8633	20	48	23.3493	0.129630	76.6507	22	90
	200	36.2919	0.351667	63.7081	20	68	17.6003	0.068889	82.3997	18	96
1 Km	20	100	1	0	-30	9	68.6705	0.855556	31.3295	18	20
	60	71.9580	0.840741	28.0420	20	20	31.2735	0.288889	68.7265	18	74
	120	49.2868	0.548148	50.7132	18	50	23.7094	0.137963	76.2906	20	86
	200	37.6229	0.349444	62.3771	20	65	18.8679	0.075555	81.1321	18	94

Tabla 3.3. Tabla Resumen de Resultados para el Algoritmo de Foschini.



CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones y los trabajos futuros como resultado del trabajo realizado. Se presentan teniendo en cuenta los objetivos propuestos y su desarrollo.

4.1. CONCLUSIONES

El modelo de simulación a nivel de sistema implementado permitió obtener una visión global de la cobertura del sistema mediante los resultados de las simulaciones del modo iterativo así como, una visión más puntual, por medio de los resultados de las simulaciones simples.

Mediante el uso de la simulación iterativa se pudo establecer que el control de potencia por medio del algoritmo de Foschini, proporcionó una mejora significativa en la cobertura respecto al caso en que no se aplica ninguna técnica de PC y al caso en que se emplea IPC, proporcionando mayor radio de cobertura y menor porcentaje de degradación que estos.

Además, los resultados mostraron que el algoritmo de Foschini realiza una gestión eficiente de la potencia, asignando potencias más bajas a los usuarios más cercanos a la MSB, y buscando el equilibrio entre una baja potencia de transmisión y una alta SINR. Esto permite aumentar la vida útil de los dispositivos y reducir el impacto ambiental del sistema.

También se pudo observar que uno de los factores que afectan de forma más significativa la cobertura es el número de usuarios por celda en el sistema. Las simulaciones mostraron que cuando este valor aumenta, la cobertura disminuye ya que se presenta una disminución en el radio de cobertura y un aumento en el porcentaje de degradación debido al aumento de interferencia. Adicionalmente, se pudo ver que existe un número de usuarios por celda, a partir del cual un incremento en el número de usuarios totales no produce aumento en el número de usuarios atendidos, e incluso puede producir su disminución. Este punto se alcanzó a partir de los 130 usuarios por celda para el caso de una SINR mínima de -20 dB y a partir de los 45 usuarios por celda para una SINR mínima de -14 dB, lo cual representa el límite de capacidad del sistema.



Por otra parte, se puso de manifiesto el hecho de que un aumento en los requerimientos de SINR reduce significativamente la cobertura, manteniéndose el porcentaje de degradación por encima del 20 y un radio de cobertura inferior al 70 % del radio de la celda, para un requerimiento de SINR de -14 dB, lo cual puede ser inaceptable en algunos tipos de sistemas. De manera que es necesario tener en cuenta estas cifras si se desea aplicar el algoritmo de Foschini en un sistema real, buscando un equilibrio entre los requerimientos de SINR y los niveles de degradación y el radio de cobertura para determinada cantidad de usuarios por celda.

Finalmente, los resultados mostraron que, el porcentaje de degradación y el radio de cobertura relativo no se ven afectados significativamente ante un cambio en el radio de la celda. Sin embargo, el radio de cobertura absoluto aumenta en proporción al aumento realizado en el radio de la celda. De esto se concluye que el radio de la celda no afecta la capacidad del sistema, y que ésta solamente es afectada, dentro del escenario simulado, por el requerimiento de SINR y la cantidad de usuarios por celda. No obstante, el radio de celda determina qué tan densamente concentrados geográficamente se encuentran los usuarios dentro de una celda, de modo que es un importante parámetro a la hora de dimensionar un sistema de este tipo.

4.2. TRABAJOS FUTUROS

De la experiencia adquirida durante el desarrollo del trabajo de grado son propuestos los siguientes trabajos futuros:

- Análisis de la cobertura, capacidad y degradación en un sistema de comunicación inalámbrico haciendo uso de valores discretos de potencia de transmisión.
- Implementación de antenas sectorizadas y reuso de frecuencias en el sistema modelado.
- Analizar el impacto en la cobertura del sistema implementando movilidad en los usuarios del escenario de simulación.
- Análisis y comparación de cobertura y capacidad con otro u otros algoritmos de Control de Potencia distribuido.

REFERENCIAS

- [1] S. K. Khangura, K. Kaur, y R. S. Uppal, «Power Control Algorithms in Wireless Communication», *International Journal of Computer Applications*, vol. 1, n.º 12, pp. 82–87, feb. 2010.
- [2] C. U. Saraydar, N. B. Mandayam, y D. Goodman, «Efficient power control via pricing in wireless data networks», *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 50, n.º 2, pp. 291–303, 2002.
- [3] V. Veeravalli y A. Sendonaris, «The coverage-capacity trade off in cellular cdma systems», *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 48, n.º 5, pp. 1443-1451, sep. 1999.
- [4] M. Chiang, *Geometric programming for communication systems*. Boston: Now Publishers, 2005.
- [5] T. Charalambous, «Power Control in Wireless Ad Hoc Networks: Stability and Convergence Under Uncertainties», en *Optimization, Simulation, and Control*, A. Chinchuluun, P. M. Pardalos, R. Enkhbat, y E. N. Pistikopoulos, Eds. Springer New York, 2013, pp. 143-174.
- [6] S. Saunders y A. Aragón-Zavala, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems: 2nd Edition*. John Wiley & Sons, 2007.
- [7] H. N. Koivo y M. Elmusrati, *Systems Engineering in Wireless Communications*. John Wiley & Sons, 2009.
- [8] F. R. P. Cavalcanti y S. Andersson, *Optimizing Wireless Communication Systems*. Springer, 2009.
- [9] T. L. Singal, *Wireless Communications*. Tata McGraw-Hill Education, 2010.
- [10] R. E. Sheriff y Y. F. Hu, *Mobile Satellite Communication Networks*. John Wiley & Sons, 2003.
- [11] V. J. Arokiamary, *Cellular and Mobile Communications*. Technical Publications, 2009.



- [12]G. Mullett, *Wireless Telecommunications Systems and Networks*. Cengage Learning, 2005.
- [13]J. Valdés y M. P. Muñoz, «Análisis de Interferencia en Femtoceldas para WCDMA», Universidad del Cauca, Colombia, 2010.
- [14]Du/Swamy, *Wireless Communication Systems: From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies*. Cambridge University Press, 2010.
- [15]L. Mendo Tomas, «LUIS_MENDO_TOMAS.pdf», Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2011.
- [16]V. Quintero, «Evaluación del Desempeño de Sistemas de Comunicación Móvil Celular de Tercera Generación – WCDMA», Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, 2010.
- [17]J. M. H. Rábanos, *Comunicaciones móviles*. Centro de Estudios Ramón Areces, 1997.
- [18]D. Tummala, «Indoor propagation modeling at 2.4 GHz for IEEE 802.11 networks», University of North Texas, 2005.
- [19]ETSI TR 101 112, *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS.*, Technical Report, V 3.2.0. European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2008.
- [20]Z. Han y K. J. R. Liu, *Resource Allocation for Wireless Networks: Basics, Techniques, and Applications*. Cambridge University Press, 2008.
- [21]S. Koskie y Z. Gajic, «SIR-based power control algorithms for wireless CDMA networks: An overview».
- [22]M. Schwartz, *Mobile Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [23]S. Jagannathan, M. Zawodniok, y Q. Shang, «Distributed power control for cellular networks in the presence of channel uncertainties», *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 5, n.º 3, pp. 540–549, 2006.
- [24]C. Comaniciu, N. B. Mandayam, y H. V. Poor, *Wireless Networks: Multiuser Detection in Cross-Layer Design: Multiuser Detection in Cross-layer Design*. Springer, 2006.
- [25]Z. Tong y M. Haenggi, «Convergence of power control algorithms for wireless networks with and without fading», *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, jun. 2012.
- [26]S. Agarwal, R. H. Katz, S. V. Krishnamurthy, y S. K. Dao, «Distributed power control in ad-hoc wireless networks», en *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2001 12th IEEE International Symposium on*, 2001, vol. 2, p. F–59.



- [27]M. Xiao, N. B. Shroff, y E. K. Chong, «Resource management in power-controlled cellular wireless systems», *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 1, n.º 2, pp. 185–199, 2001.
- [28]J. Korhonen, *Introduction to 3G Mobile Communications*. Artech House, 2003.
- [29]K. Pahlavan y P. Krishnamurthy, *Principles of Wireless Access and Localization*. John Wiley & Sons, 2013.
- [30]S. C. Satapathy, P. S. Avadhani, y A. Abraham, *Proceedings of the International Conference on Information Systems Design and Intelligent Applications 2012 (India 2012) Held In Visakhapatnam, India, January 2012*. Springer, 2011.
- [31]M. M. Abbas y H. Mahmood, «Power Control in Ad Hoc Networks», en *Mobile Ad-Hoc Networks: Applications*, X. Wang, Ed. InTech, 2011.
- [32]A. El-Osery y C. Abdallah, «Distributed power control in CDMA cellular systems», *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, vol. 42, n.º 4, pp. 152–159, 2000.
- [33]G. J. Foschini y Z. Miljanic, «A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence», *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 42, n.º 4, pp. 641-646, 1993.
- [34]Z. Tong y M. Haenggi, «Geometric Analysis of Distributed Power Control and Möbius MAC Design», *Wirel. Commun. Mob. Comput*, p. 00, 2010.
- [35]V. G. Douros, G. C. Polyzos, y S. Toumpis, «A bargaining approach to power control in networks of autonomous wireless entities», en *Proceedings of the 8th ACM international workshop on Mobility management and wireless access*, 2010, pp. 75–82.
- [36]N. Jindal, S. Weber, y J. G. Andrews, «Fractional power control for decentralized wireless networks», *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 7, n.º 12, pp. 5482–5492, 2008.
- [37]T. Charalambous, I. Lestas, y G. Vinnicombe, «On the stability of the Foschini-Miljanic algorithm with time-delays», en *Decision and Control, 2008. CDC 2008. 47th IEEE Conference on*, 2008, pp. 2991–2996.
- [38]J. Mounzer, «Distributed Power Control Algorithms in Wireless Networking», 2009.
- [39]E. Astaiza, H. Bermudez, y P. Muñoz, «Simulación de Sistemas de Telecomunicaciones». 2007.