

**INCIDENCIA DE UN ALGORITMO DE CONTROL DE POTENCIA EN LA
CAPACIDAD DE UNA RED HETEROGÉNEA**



**Andrea Fernanda Jordán Cerón
Daniela Rosero del Río**

**Director
Ing. Víctor Fabián Miramá Pérez**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas-GRIAL
Popayán, Mayo de 2016**

INCIDENCIA DE UN ALGORITMO DE CONTROL DE POTENCIA EN LA CAPACIDAD DE UNA RED HETEROGÉNEA



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

**Andrea Fernanda Jordán Cerón
Daniela Rosero del Río**

**Director
Ing. Víctor Fabián Miramá Pérez**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas-GRIAL
Popayán, Mayo de 2016**

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO I. CONCEPTOS GENERALES | 3 |
| 1.1. SISTEMA MÓVIL CELULAR..... | 4 |
| 1.1.1. Arquitectura | 4 |
| 1.1.2. Estructura celular..... | 5 |
| 1.1.3. Redes homogéneas vs. Heterogéneas | 9 |
| 1.1.4. Aspectos claves en la implementación de redes heterogéneas | 9 |
| 1.1.4.1. Interferencia..... | 9 |
| 1.1.4.2. Espectro | 11 |
| 1.2. CONTROL DE POTENCIA..... | 11 |
| | |
| CAPÍTULO II. CONTROL DE POTENCIA..... | 13 |
| 2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE CONTROL DE POTENCIA..... | 13 |
| 2.1.1. De acuerdo a cómo se recopila la información en el sistema móvil celular..... | 13 |
| 2.1.1.1. Control de Potencia Centralizado..... | 13 |
| 2.1.1.2. Control de Potencia Descentralizado o Distribuido | 14 |
| 2.1.2. Teniendo en cuenta el enlace en el que se lleva a cabo el control de potencia..... | 14 |
| 2.1.2.1. Control de potencia en el Enlace de Subida | 14 |
| 2.1.2.2. Control de potencia en el Enlace de Bajada | 14 |
| 2.1.3. De acuerdo al parámetro de medición utilizado | 15 |
| 2.1.3.1. Basados en intensidad de potencia | 15 |
| 2.1.3.2. Basados en SINR | 15 |
| 2.1.3.3. Basados en BER | 15 |
| 2.1.4. Dependiendo de la existencia o no de realimentación..... | 15 |
| 2.1.4.1. Control de potencia en lazo abierto..... | 15 |
| 2.1.4.2. Control de potencia en lazo cerrado | 16 |
| 2.2. ALGORITMOS DE CONTROL DE POTENCIA | 18 |
| 2.2.1. Algoritmos de control de potencia distribuidos..... | 18 |
| 2.2.1.1. Control de Potencia Distribuido | 18 |
| 2.2.1.2. Control de Potencia Completamente Distribuido | 19 |
| 2.2.1.3. Control de Potencia Distribuido Simple..... | 19 |
| 2.2.1.4. Control de Potencia Distribuido con Restricciones | 20 |
| 2.2.1.5. Control de Potencia Distribuido Generalizado con Restricciones..... | 20 |
| 2.2.2. Algoritmos de control de potencia por pasos | 21 |
| 2.2.2.1. Control de Potencia de Paso Fijo..... | 21 |
| 2.2.2.2. Control de Potencia de Paso Adaptativo..... | 22 |
| 2.2.3. Algoritmos de control de potencia basados en Teoría de Juegos | 23 |
| 2.2.3.1. Control de Potencia basado en la función Sigmoide | 24 |
| 2.2.3.2. Control de Potencia basado en el equilibrio de Nash | 25 |

| | | |
|---|---|----|
| 2.2.3.3. | Modelo de control de potencia basado en teoría de juegos | 26 |
| CAPÍTULO III. MODELO DE CONTROL DE POTENCIA BASADO EN TEORÍA DE JUEGOS EN UNA RED HETEROGÉNEA. 29 | | |
| 3.1. | DEFINICIÓN DEL SISTEMA..... | 29 |
| 3.2. | DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL DEL SISTEMA..... | 31 |
| 3.3. | MODELO DE CONTROL IDEAL DE POTENCIA | 34 |
| 3.4. | MODELO BASADO EN TEORÍA DE JUEGOS | 37 |
| 3.4.1. | Definición del juego | 38 |
| 3.4.2. | Descripción del algoritmo | 39 |
| CAPÍTULO IV. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 43 | | |
| 4.1. | LIMITACIONES DEL SISTEMA | 43 |
| 4.2. | DESARROLLO METODOLÓGICO | 43 |
| 4.2.1. | Selección de la herramienta de simulación..... | 44 |
| 4.2.2. | Codificación del sistema..... | 44 |
| 4.2.3. | Definición de los escenarios y casos de simulación | 45 |
| 4.2.3.1. | Definición de las características de los escenarios de simulación | 46 |
| 4.2.4. | Simulación y análisis de resultados | 46 |
| 4.2.4.1. | Escenario 1: 400 metros | 47 |
| 4.2.4.2. | Escenario 2: 200 metros | 66 |
| 4.3. | Resumen de Resultados | 81 |
| CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS..... 83 | | |
| 5.1. | CONCLUSIONES..... | 83 |
| 5.2. | TRABAJOS FUTUROS | 84 |
| APÉNDICE A..... 85 | | |
| APÉNDICE B..... 90 | | |
| REFERENCIAS..... 105 | | |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1. 1. Clúster de siete celdas..... | 4 |
| Figura 1. 2. Arquitectura básica de un sistema de comunicación móvil celular.. | 5 |
| Figura 1. 3. Cobertura en un sistema móvil celular..... | 6 |
| Figura 1. 4. Acceso cerrado vs. abierto en el enlace descendente de una red de femtoceldas | 8 |
| Figura 1. 5. Acceso cerrado vs. abierto en el enlace ascendente de una red de femtoceldas | 8 |
| Figura 1. 6. Interferencia cruzada en un despliegue de macro y femtoceldas | 10 |
| Figura 2. 1. Control de potencia en lazo abierto para el enlace ascendente..... | 16 |
| Figura 2. 2. Control de potencia en lazo cerrado para el enlace ascendente | 17 |
| Figura 3. 1. Escenario de simulación. | 30 |
| Figura 3. 2. Diagrama de bloques general del sistema. | 31 |
| Figura 3. 3. Diagrama de flujo general del sistema..... | 33 |
| Figura 3. 4. Diagrama de flujo del Control Ideal de Potencia. | 37 |
| Figura 3. 5. Diagrama de flujo del control de potencia basado en GT..... | 40 |
| Figura 4. 1. Primer escenario de simulación. | 48 |
| Figura 4. 2. Resultado obtenido con GT, escenario 1 – voz..... | 49 |
| Figura 4. 3. Resultados de un mU a 63,6 m de la mBS..... | 50 |
| Figura 4. 4. Resultados de un UE no conectado | 50 |
| Figura 4. 5. Variación de la probabilidad de potencia de FU. | 51 |
| Figura 4. 6. Variación de la probabilidad de potencia de mU. | 51 |
| Figura 4. 7. Resultado obtenido con IPC, escenario 1 – voz..... | 52 |
| Figura 4. 8. Variación de la SINR de cinco UE. | 53 |
| Figura 4. 9. Probabilidad de degradación. | 54 |
| Figura 4. 10. Resultado obtenido con GT, escenario 1 – datos..... | 55 |
| Figura 4. 11. Resultados de un mU a 112.2 m de la mBS..... | 56 |
| Figura 4. 12. Variación de la probabilidad de potencia de dos FU. | 57 |
| Figura 4. 13. Variación de la probabilidad de potencia de dos mU. | 58 |
| Figura 4. 14. Variación de la SINR de cinco UE. | 58 |
| Figura 4. 15. Resultado obtenido con IPC, escenario 1 – datos..... | 59 |
| Figura 4. 16. Probabilidad de degradación. | 60 |
| Figura 4. 17. Resultado obtenido con GT, escenario 1 – voz y datos. | 62 |
| Figura 4. 18. Variación de la probabilidad de potencia de dos FU. | 63 |
| Figura 4. 19. Variación de la probabilidad de potencia de dos mU. | 63 |
| Figura 4. 20. Variación de la SINR de cuatro UE..... | 64 |
| Figura 4. 21. Resultado obtenido con IPC, escenario 1 – voz y datos. | 65 |
| Figura 4. 22. Probabilidad de degradación. | 65 |
| Figura 4. 23. Segundo escenario de simulación. | 66 |
| Figura 4. 24. Resultado obtenido con GT, escenario 2 – voz..... | 67 |
| Figura 4. 25. Resultados de un FU a 26,56 m de un FAP. | 68 |
| Figura 4. 26. Variación de la probabilidad de potencia. | 69 |
| Figura 4. 27. Variación de la SINR de cuatro UE..... | 70 |
| Figura 4. 28. Resultado obtenido con IPC, escenario 2 – voz..... | 71 |
| Figura 4. 29. Probabilidad de degradación. | 71 |
| Figura 4. 30. Resultado obtenido con GT, escenario 2 – datos..... | 73 |
| Figura 4. 31. Resultados de un UE a 120.7 m de la mBS. | 73 |

| | |
|---|----|
| Figura 4. 32. Variación de la probabilidad de potencia de dos mU. | 74 |
| Figura 4. 33. Variación de la SINR de cinco UE. | 75 |
| Figura 4. 34. Resultado obtenido con IPC, escenario 2 – datos..... | 75 |
| Figura 4. 35. Probabilidad de degradación. | 76 |
| Figura 4. 36. Resultado obtenido con GT, escenario 2 – voz y datos. | 77 |
| Figura 4. 37. Variación de la probabilidad de potencia de dos mU. | 78 |
| Figura 4. 38. Resultado de un usuario a 17.8 m de un FAP..... | 78 |
| Figura 4. 39. Resultado de un usuario a 27.6 m de un FAP..... | 79 |
| Figura 4. 40. Variación de la SINR de cuatro UE..... | 79 |
| Figura 4. 41. Resultado obtenido con IPC, escenario 2 – voz y datos. | 80 |
| Figura 4. 42. Probabilidad de degradación. | 81 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|------|
| Tabla 1.1. Características de los diferentes tipos de celdas..... | 9 |
| Tabla 2.1. Características de los mecanismos de control de potencia..... | 17 |
| Tabla 2.2. Elementos característicos de operación. | 27 |
| Tabla 4. 1. Escenarios y casos de simulación | 45 |
| Tabla 4. 2. Parámetros de los escenarios de simulación | 46 |
| Tabla 4. 3. Resumen de la capacidad obtenida sin control de potencia | 47 |
| Tabla 4. 4. Capacidad según el tipo de usuario, escenario 1- voz. | 54 |
| Tabla 4. 5. Resultados obtenidos, escenario 1 - voz - 300 Usuarios..... | 54 |
| Tabla 4. 6. Capacidad según el tipo de usuario, escenario 1 – datos. | 60 |
| Tabla 4. 7. Resultados obtenidos, escenario 1 - datos - 300 Usuarios. | 61 |
| Tabla 4. 8. Capacidad según el tipo de usuario, escenario 1 – voz y datos..... | 66 |
| Tabla 4. 9. Capacidad según el tipo de usuario, escenario 2 – voz. | 72 |
| Tabla 4. 10. Capacidad según el tipo de usuario, escenario 2 – datos. | 76 |
| Tabla 4. 11. Capacidad según el tipo de usuario..... | 81 |
| Tabla 4. 12. Resumen de resultados. | 82 |
| Tabla A. 1. Capacidad sin control de potencia. Escenario 1 – voz..... | 85 |
| Tabla A. 2. Capacidad sin control de potencia. Escenario 1 – datos..... | 86 |
| Tabla A. 3. Capacidad sin control de potencia. Escenario 1 – voz y datos. | 86 |
| Tabla A. 4. Capacidad sin control de potencia. Escenario 2 – voz..... | 87 |
| Tabla A. 5. Capacidad sin control de potencia. Escenario 2 – datos..... | 87 |
| Tabla A. 6. Capacidad sin control de potencia. Escenario 2 – voz y datos. | 89 |
| Tabla B. 1. Capacidad con control de potencia. Escenario 1 – voz..... | 90 |
| Tabla B. 2. Capacidad de cada FAP con control de potencia. Prueba 1..... | 91 |
| Tabla B. 3. Potencias asignadas por los algoritmos a los FU atendidos. Prueba 1. | 92 |
| Tabla B. 4. Capacidad con control de potencia. Escenario 1 – datos. | 93 |
| Tabla B. 5. Capacidad de cada FAP con control de potencia. Prueba 4..... | 93 |
| Tabla B. 6. Potencias asignadas por los algoritmos a los FU atendidos. Prueba 4. | 94 |
| Tabla B. 7. Capacidad con control de potencia. Escenario 1 – voz y datos..... | 95 |
| Tabla B. 8. Capacidad de cada FAP con control de potencia. Prueba 4..... | 96 |

| | |
|--|-----|
| Tabla B. 9. Potencias asignadas por los algoritmos a los FU atendidos. Prueba 4. | 96 |
| Tabla B. 10. Capacidad con control de potencia. Escenario 2 – voz..... | 97 |
| Tabla B. 11. Capacidad de cada FAP con control de potencia. Prueba 2..... | 98 |
| Tabla B. 12. Potencias asignadas por los algoritmos a los FU atendidos. Prueba 2. | 99 |
| Tabla B. 13. Capacidad con control de potencia. Escenario 2 – datos. | 100 |
| Tabla B. 14. Capacidad de cada FAP con control de potencia. Prueba 7..... | 100 |
| Tabla B. 15. Potencias asignadas por los algoritmos a los FU atendidos. Prueba 7. | 101 |
| Tabla B. 16. Capacidad con control de potencia. Escenario 2 – voz y datos..... | 102 |
| Tabla B. 17. Capacidad de cada FAP con control de potencia. Prueba 8..... | 103 |
| Tabla B. 18. Potencias asignadas por los algoritmos a los FU atendidos. Prueba 8. | 104 |

LISTA DE ACRÓNIMOS

| | |
|-------------|---|
| AS | <i>Adaptive Step</i> , Paso Adaptativo. |
| ASPC | <i>Adaptive Step Power Control</i> , Control de Potencia de Paso Adaptativo. |
| BER | <i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit. |
| BS | <i>Base Station</i> , Estación Base. |
| CCI | <i>Co-Channel Interference</i> , Interferencia Co-Canal. |
| CGT | <i>Cooperative Game Theory</i> , Teoría de Juegos Cooperativa. |
| CoTI | <i>Co-Tier Interference</i> , Interferencia Co-Nivel. |
| CSG | <i>Closed Subscriber Group</i> , Grupo Cerrado de Abonados. |
| CTI | <i>Cross Tier Interference</i> , Interferencia de Nivel Cruzado. |
| DCPC | <i>Distributed Constrained Power Control</i> , Control de Potencia Distribuido con Restricciones. |
| DL | <i>DownLink</i> , Enlace de Bajada. |
| DPC | <i>Distributed Power Control</i> , Control de Potencia Distribuido. |
| DSL | <i>Digital Subscriber Line</i> , Línea de Abonado Digital. |
| FAP | <i>Femtocell Access Point</i> , Punto de Acceso de Femtocelda. |

| | |
|---------------|---|
| FU | <i>Femto User, Femto Usuario</i> |
| FDPC | <i>Fully Distributed Power Control, Control de Potencia Completamente Distribuido.</i> |
| FSPC | <i>Fixed Step Power Control, Control de Potencia de Paso Fijo.</i> |
| GDCPC | <i>Generalized Distributed Constrained Power Control, Control de Potencia Distribuido Generalizado con Restricciones.</i> |
| GT | <i>Game Theory, Teoría de Juegos.</i> |
| HetNet | <i>Heterogeneous Networks, Redes heterogéneas.</i> |
| HO | <i>Handover, Traspaso.</i> |
| ICI | <i>Inter-Cell Interference, Interferencia Inter-Celda.</i> |
| IPC | <i>Ideal Power Control, Control Ideal de Potencia.</i> |
| mU | <i>Micro User, Micro Usuario</i> |
| MS | <i>Mobile Station, Estación Móvil.</i> |
| NCGT | <i>Non-Cooperative Game Theory, Teoría de Juegos No Cooperativa.</i> |
| NLOS | <i>Non Line Of Sight, Sin Línea de Vista.</i> |
| OP | <i>Outage Probability, Probabilidad de Degradación.</i> |
| OSG | <i>Open Subscriber Group, Grupo Abierto de Abonados.</i> |
| PC | <i>Power Control, Control de Potencia.</i> |
| QoS | <i>Quality of Service, Calidad del Servicio.</i> |
| RL | <i>Reinforcement Learning, Aprendizaje Reforzado.</i> |
| RRM | <i>Radio Resource Management, Gestión de Recursos Radio.</i> |

| | |
|-------------|--|
| SDPC | <i>Simple Distributed Power Control</i> , Control de Potencia Distribuido Simple. |
| 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. |
| SoHo | <i>Small Office and Home Office</i> , Oficina Pequeña y Oficina en Casa |
| UE | <i>User Equipment</i> , Equipo de Usuario. |
| UL | <i>UpLink</i> , Enlace de Subida. |

INTRODUCCIÓN

En la actualidad una de las mayores preocupaciones de los operadores de telefonía móvil es incrementar la capacidad en sus redes, para hacer frente a la enorme demanda de tráfico que se espera aumente en los próximos años. Se estima que para el año 2019 el tráfico de datos sea aproximadamente de 24.3 exabytes¹ por mes, lo cual representa un aumento de casi diez veces en comparación con el año 2014 [1]. Desde esta perspectiva, los sistemas móviles convencionales no logran satisfacer esta demanda, razón por la cual, en los últimos años se comenzó a adoptar una infraestructura de red heterogénea (HetNet, *Heterogeneous Networks*), compuesta por celdas de diferente tamaño, con nodos o estaciones base de bajo costo y diversas potencias de transmisión, lo cual permite una mayor capacidad y cobertura en diferentes escenarios [2].

El buen funcionamiento de esta nueva infraestructura de red depende en gran parte de la implementación de técnicas de mitigación de interferencia, ya que éste fenómeno es mucho más crítico que en el caso de las redes convencionales en el que existe un único tipo de celda.

Una de las estrategias más importantes para gestionar los recursos radio es el Control de Potencia (PC, *Power Control*), dado que permite disminuir la interferencia y con esto, incrementar la capacidad y calidad de un sistema de comunicaciones móviles. Además, minimiza el consumo de energía e incrementa el tiempo de vida de las baterías de los terminales de usuario.

Con base en lo anterior, este proyecto de grado realiza mediante simulación la implementación de un algoritmo de Control de Potencia, con el fin de analizar su incidencia sobre la capacidad de una red heterogénea.

Este documento se divide en cinco capítulos estructurados de la siguiente manera:

Capítulo I. Introduce los conceptos básicos relacionados con los sistemas de comunicaciones móviles, haciendo énfasis en las redes heterogéneas.

Capítulo II. Presenta una clasificación de algunos mecanismos de PC y el análisis de algunos de los algoritmos utilizados en redes móviles.

Capítulo III. Define el modelo de Control de Potencia basado en Teoría de Juegos escogido para el desarrollo del proyecto.

¹ Unidad de medida de almacenamiento de datos. Equivale a 10^{18} bytes.

Capítulo IV. Describe la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto, incluyendo la herramienta software seleccionada y la caracterización del escenario de simulación. Además se especifican y describen las pruebas realizadas, los resultados obtenidos y su análisis.

Capítulo V. Se exponen las conclusiones del desarrollo del proyecto y se presentan recomendaciones para la elaboración de trabajos futuros e investigaciones en este campo.

CAPÍTULO I. CONCEPTOS GENERALES

En los últimos años el tráfico de datos ha tenido un crecimiento exponencial debido a la mayor cantidad de dispositivos preparados para movilidad y video, y el incremento en la velocidad de las conexiones. Las soluciones para hacer frente a esta situación, se enfocan en tres áreas diferentes [3]:

- Mayor disponibilidad de espectro, es decir mayor ancho de banda.
- Nuevas tecnologías que sean más eficientes para la transmisión.
- Nuevas infraestructuras de red que proporcionen una mayor densidad de usuarios en una determinada zona.

Estas soluciones podrían ser abordadas de manera conjunta para obtener mejores resultados, sin embargo, el interés del presente trabajo de grado está dirigido hacia el estudio de una nueva infraestructura de red, conocida como Red Heterogénea (HetNet).

HetNet introduce el concepto de *small cells* o celdas pequeñas (micro, pico y femtoceldas) constituidas por puntos de acceso radio de baja potencia. Su instalación dentro de una macrocelda permite mejorar la capacidad y cobertura en diferentes escenarios a un bajo costo. Un aspecto a tener en cuenta en el despliegue de este tipo de redes, es que la coexistencia de varias celdas pequeñas implica una mayor complejidad en términos de interferencia, en comparación con una red homogénea convencional, por lo que se hace necesaria la implementación de técnicas efectivas de reducción de interferencia. Una buena alternativa es aplicar control de potencia tanto en el Enlace de Bajada (DL, *DownLink*) como en el Enlace de Subida (UL, *UpLink*), siendo este último de mayor interés debido a que es el ahí donde los efectos de la interferencia son más perjudiciales.

Este capítulo describe los sistemas móviles celulares, su arquitectura y estructura celular, haciendo énfasis en las redes heterogéneas, aspectos clave en su implementación y la importancia del control de potencia.

1.1. SISTEMA MÓVIL CELULAR

Los primeros sistemas de comunicación móvil empleaban una única Estación Base para cubrir zonas de gran amplitud, lo cual traía consigo limitaciones en cuanto a capacidad y cobertura. Razón por la cual, surge el concepto celular, que consiste en dividir el área de cobertura deseada en zonas más pequeñas llamadas celdas o células, logrando así, un mejor desempeño del sistema y un adecuado uso espectral [4].

Una agrupación de celdas dentro de la cual se emplean n canales de frecuencia se denomina *clúster*. Cada una de las celdas se representa de forma hexagonal y cuenta con una estación transceptora fija denominada Estación Base (BS, *Base Station*), ubicada generalmente en el centro, como se observa en la figura 1.1. La Estación Base es la encargada de recibir y distribuir información de datos o de señalización hacia las Estaciones Móviles (MS, *Mobile Station*), controlando el acceso de estas a los recursos disponibles [5].

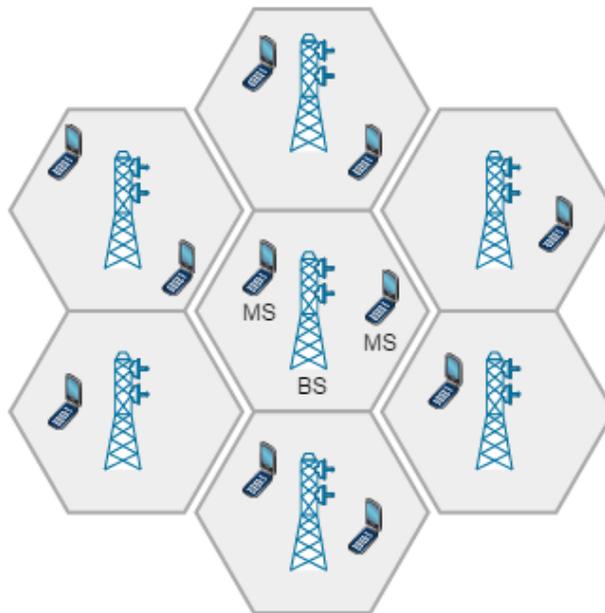


Figura 1. 1. Clúster de siete celdas. Adaptada de [6].

1.1.1. Arquitectura

Dentro de la arquitectura genérica de los sistemas de comunicaciones móviles celulares se identifican tres subsistemas muy bien diferenciados, como se muestra en la figura 1.2. El Equipo de Usuario (UE, *User Equipment*) también denominado

Estación móvil, es el elemento que le permite al usuario el acceso a la red y los servicios.

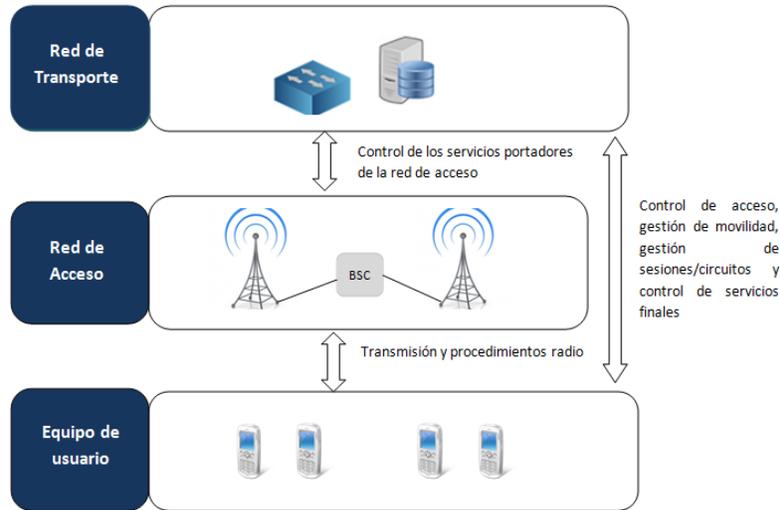


Figura 1. 2. Arquitectura básica de un sistema de comunicación móvil celular. Adaptada de [7].

La Red de Acceso es la porción de la red responsable de gestionar de manera eficiente el uso de los recursos radio con el fin de proporcionar conectividad entre estos y la red troncal. Los servicios ofrecidos por dicho subsistema para transportar la información de los usuarios hacia o desde la red troncal son denominados servicios portadores, es decir, servicios cuya finalidad es proveer capacidades de transmisión.

Esta red está formada por Estaciones Base y por Controladores de Estación Base (BSC, *Base Station Controller*).

La Red de Transporte abarca los sistemas necesarios para establecer y mantener la comunicación entre origen y destino. Maneja aspectos relacionados con el control de acceso, así como funciones de autenticación, gestión de la movilidad, entre otros. Está compuesta por equipos que albergan funciones de conmutación de circuitos, de paquetes y bases de datos para registro de información de usuarios [8].

1.1.2. Estructura celular

Un sistema de comunicación móvil celular puede estar conformado por varios niveles², es decir diferentes tipos de celdas, cada una de ellas con características

² Hace referencia al tipo de celdas que conforman el sistema celular y que se despliegan en un determinado escenario.

propias, en función de ciertos parámetros como la potencia de transmisión, la ubicación y el radio de cobertura de las estaciones base.

Como se observa en la figura 1.3, las celdas de un sistema móvil se clasifican en [9]:

- **Macrocelas:** constituye la zona de servicio de una estación base de largo alcance, logrando una cobertura amplia. Usada particularmente en entornos rurales y carreteras, donde los usuarios se mueven a altas velocidades.
- **Microcelas:** compuestas por estaciones base de cobertura media desplegadas en escenarios exteriores de ambientes urbanos.
- **Picoceldas:** en este caso, se tienen estaciones base consideradas de cobertura local, dan servicio a zonas públicas amplias en interiores o exteriores, incrementando la capacidad en lugares con alta densidad de tráfico, como edificios empresariales, centros comerciales, entre otros.
- **Femtoceldas:** la estación base o Punto de Acceso Femtocelular (FAP, *Femtocell Access Point*) proporciona cobertura en interiores, como Oficinas en Casa y Oficinas Pequeñas (SOHO, *Small Office and Home Office*).

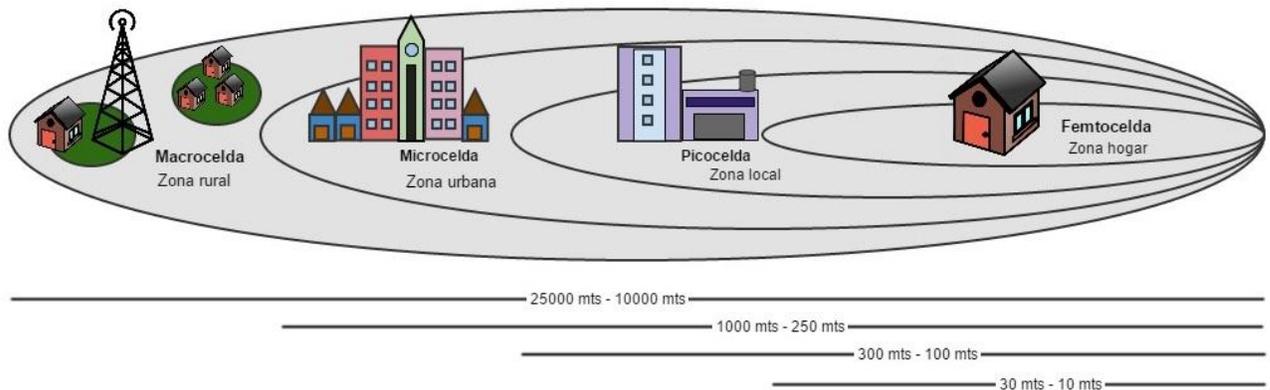


Figura 1. 3. Cobertura en un sistema móvil celular.

En los últimos años el uso de femtoceldas ha cobrado gran importancia dada la imperiosa necesidad de proveer una buena cobertura en interiores, ya que se estima que dos de cada tres llamadas y cerca del noventa por ciento del tráfico de datos se presenta en este tipo de escenarios [10].

El FAP conecta el dispositivo de usuario con la red del operador móvil a través de líneas de Abonado Digital (DSL, *Digital Subscriber Line*), conexiones de banda ancha por cable o fibra óptica. Dependiendo de la capacidad un FAP se puede clasificar en residencial, el cual soporta de 3 a 5 usuarios y empresarial, que puede atender entre 8 y 16 usuarios [11].

Estas celdas se despliegan con redes de macroceldas en la misma frecuencia (despliegue Co-Canal) o en frecuencias diferentes (despliegue de Canal Dedicado). Existen tres modos de acceso en redes que involucran femtoceldas: cerrado, abierto e híbrido.

En el Acceso Cerrado, sólo se permite conexión a la femtocelda a un grupo específico de abonados (CSG, *Closed Subscriber Group*), es decir que únicamente los usuarios autorizados pueden acceder; sin embargo esto causa una fuerte interferencia a los usuarios vecinos conectados a otra estación base [12].

El modo de Acceso Abierto (OSG, *Open Subscriber Group*) permite a cualquier usuario establecer conexión con la femtocelda, con lo cual se logra mitigar el nivel de interferencia e incrementar el desempeño general de la red puesto que, en el caso en que un usuario se encuentre experimentando una baja calidad del enlace con una macro Estación Base, puede conectarse a una red de femtocelda pública cercana, reduciendo así el uso de potencia, sin embargo esto incrementa el número de traspasos (HO, *Handover*) y la necesidad de señalización de la red.

El modo híbrido es una combinación de los dos anteriores, el acceso a la femtocelda puede ser controlado y configurado de tal forma que los usuarios registrados tengan un tratamiento preferencial frente a los no autorizados, los cuales acceden a la red bajo condiciones limitadas de Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) [13].

Las figuras 1.4 y 1.5 muestran los modos de acceso cerrado y abierto, en términos de interferencia para una red de dos niveles, en el enlace descendente y ascendente respectivamente.

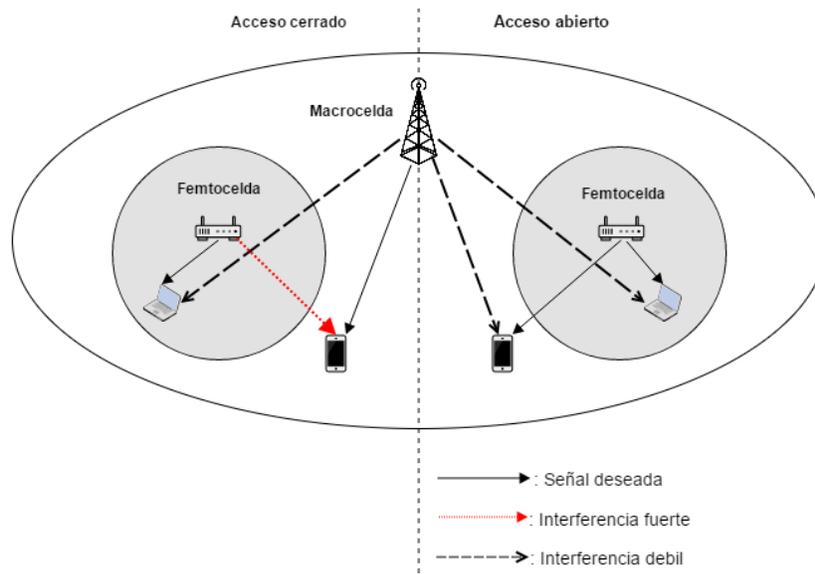


Figura 1. 4. Acceso cerrado vs. abierto en el enlace descendente de una red de femtoceldas. Adaptado de [14].

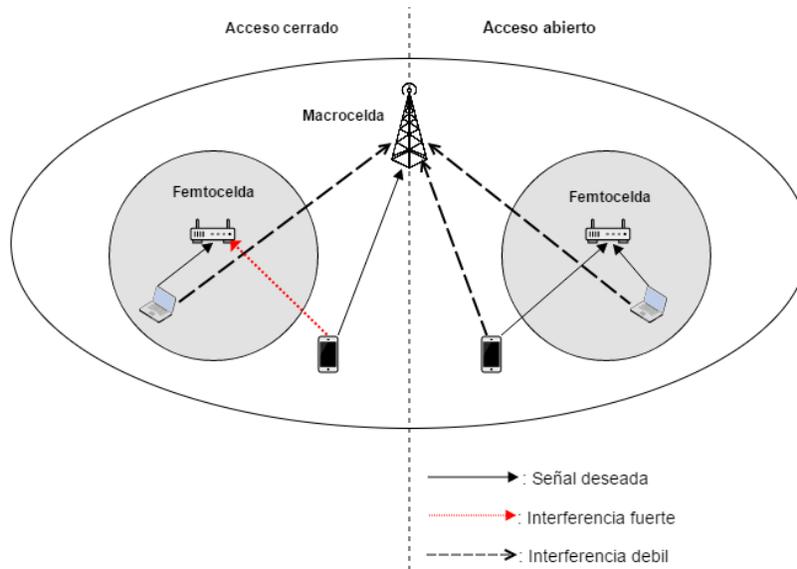


Figura 1. 5. Acceso cerrado vs. abierto en el enlace ascendente de una red de femtoceldas. Adaptado de [14].

Las características más importantes de los diferentes tipos de celdas se resumen en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Características de los diferentes tipos de celdas. Adaptada de [11,15-19].

| | Macrocela | Microcela | Picocela | Femtocela |
|-------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Potencia de transmisión | 20 w–160 w (40 w) | 2 w-20 w (5 w) | 250 mw- 2 w | 10 mw-100 mw |
| Rango de cobertura | 1 km – 25 km | 300 m – 1000 m | 100 m - 300 m | 10 m - 100 m |
| Número de usuarios | > 256 | 100 - 225 | 32 – 128 | < 16 |
| Modo de acceso | Abierto | Abierto | Abierto | Abierto/CSG |
| Espectro | Licenciado | Licenciado | Licenciado | Licenciado |
| Ubicación | Exterior | Exterior | Exterior/interior | Exterior/interior |
| Despliegue | Operador | Operador | Operador | Usuario |

1.1.3. Redes homogéneas vs. Heterogéneas

Las redes móviles celulares pueden clasificarse como homogéneas si están conformadas por un único tipo de celdas, y heterogéneas, si tienen una infraestructura estratificada, compuesta por celdas de diferente tamaño, múltiples tecnologías de acceso radio y estaciones base de diversas potencias de transmisión.

Las redes heterogéneas permiten una mejora considerable de la capacidad y cobertura en diferentes escenarios. Sin embargo, resultan más críticas en términos de interferencia que las convencionales redes homogéneas.

1.1.4. Aspectos claves en la implementación de redes heterogéneas

1.1.4.1. Interferencia

En las redes heterogéneas, la introducción de celdas con estaciones base de diversas características dentro de una misma infraestructura de red genera una fuerte interferencia entre celdas (ICI, *Inter-Cell Interference*), que se manifiesta en dos escenarios: Interferencia Co-Nivel (CoTI, *Co-Tier Interference*) e Interferencia

cruzada o entre niveles (CTI, *Cross Tier Interference*), afectando así el desempeño y capacidad de la red, razón por la cual se convierte en uno de los principales desafíos a enfrentar.

- CoTI: se presenta cuando existe interferencia entre nodos de un mismo nivel, por ejemplo, cuando una femtocelda interfiere a un usuario de una femtocelda vecina.
- CTI: esta es la situación más crítica, ocurre cuando nodos de diferentes niveles de la red interfieren entre sí, un ejemplo de esto se muestra en la figura 1.6. En el escenario A, el usuario que se encuentra alejado de su macro estación base de servicio, transmite con una potencia alta para compensar las pérdidas, generando interferencia al usuario de una femtocelda cercana, y en el escenario B, un usuario es interferido por la transmisión del enlace de bajada del FAP.

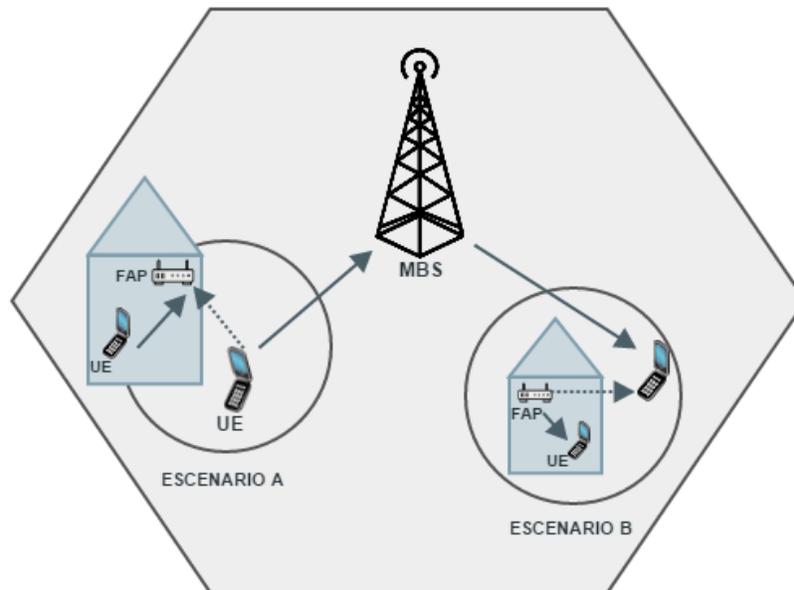


Figura 1. 6. Interferencia cruzada en un despliegue de macro y femtoceldas. Adaptada de [20].

La interferencia por móvil cercano-lejano (*Near-Far Interference*) también es común en este tipo de sistemas y se produce cuando un dispositivo cercano a la estación base transmite con una potencia considerablemente alta en comparación

al nivel de potencia de otro dispositivo situado en el límite de la celda, bloqueando las demás comunicaciones activas [21].

1.1.4.2. Espectro

El espectro electromagnético es el principal recurso de los sistemas de comunicación móviles y como tal debe gestionarse de manera eficiente. Existen tres alternativas de gestión del espectro para el caso de redes heterogéneas, en el que múltiples nodos de diferentes características hacen uso del mismo espectro simultáneamente [22].

Espectro dedicado

Esta técnica asigna una parte diferente del espectro a cada nivel o tipo de celda, es decir, en la macro celda se asigna una banda de frecuencia única, y diferentes bandas de frecuencia para las pequeñas celdas (micro, pico y femtoceldas), con lo cual se evita la presencia de interferencia cruzada, aunque para este caso la eficiencia espectral es baja y por otro lado, la interferencia CoTI no se suprime.

Espectro compartido

En este caso, se hace un uso eficiente de los recursos radio ya que se asigna el espectro disponible a todos los niveles de la arquitectura de red heterogénea, es decir, que tanto la macrocelda como las pequeñas celdas comparten la misma banda de frecuencias, sin embargo los usuarios ubicados en cada nivel causaran tanto interferencia Co-Nivel como interferencia cruzada, por lo cual es de gran importancia el uso de técnicas apropiadas de mitigación de interferencia.

Espectro parcialmente compartido

Esta técnica asigna todo el espectro disponible a la macrocelda, y los niveles inferiores podrán acceder a una porción de frecuencia previamente definida, obteniéndose así una mejora en la eficiencia espectral con respecto al caso de espectro dedicado, y disminución de la interferencia en comparación con el método de espectro compartido.

1.2. CONTROL DE POTENCIA

Los sistemas móviles con infraestructura de red heterogénea son limitados por interferencia, por lo cual, es sumamente importante controlar la potencia tanto en el enlace de bajada como en el de subida, ya que de esta depende el nivel de

interferencia presente en el sistema, en este sentido, un diseño adecuado de Control de Potencia (PC) permite mitigar la interferencia y asegurar una mayor capacidad y calidad de servicio a los usuarios.

En el enlace de bajada, el control de potencia, junto con parámetros propios de las antenas y otras variables, define el área de cobertura, es decir, permite reducir o incrementar las áreas para balancear la carga de tráfico en horas pico [23]. El presente trabajo de grado se enfoca en el enlace de subida en donde el control de potencia se hace más crítico ya que permite reducir el efecto de la interferencia por móvil cercano-lejano.

En el siguiente capítulo se abordará con mayor detenimiento el control de potencia en las redes móviles celulares.

CAPÍTULO II. CONTROL DE POTENCIA

En las redes móviles heterogéneas existen dos aspectos importantes a tener en cuenta: en primer lugar, que son limitadas por interferencia, lo cual significa que la potencia de las señales provenientes de otros usuarios afecta la capacidad de la red; en segundo lugar, que la potencia de transmisión es un recurso limitado, por lo que se hace necesaria la implementación de mecanismos que permitan hacer un uso eficiente de la misma.

El control de potencia es una estrategia de Gestión de Recursos Radio (RRM, *Radio Resource Management*) [24], [25], que permite disminuir la interferencia y con ello incrementar la capacidad y calidad de un sistema de comunicaciones móviles. Además, minimiza el consumo de energía e incrementa el tiempo de vida de las baterías de los terminales de usuario.

En este capítulo se realiza una clasificación de algunos mecanismos de control de potencia con sus características más relevantes y se analizan algunos de los algoritmos implementados en sistemas móviles celulares.

2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE CONTROL DE POTENCIA

Dentro del análisis realizado sobre los mecanismos de control de potencia se encontró que existen diferentes enfoques que permiten hacer una clasificación de los mismos. Dichos enfoques están relacionados, es decir, no son excluyentes.

2.1.1. De acuerdo a cómo se recopila la información en el sistema móvil celular

2.1.1.1. Control de Potencia Centralizado

La estación base se encarga de recopilar la información de todas las conexiones establecidas, esto es, ganancias, potencias de transmisión y recepción, Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*), Tasas de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*), etc., con base en el análisis de esta información calcula de manera simultánea los niveles de potencia adecuados para todos los radioenlaces del sistema.

Este mecanismo no es iterativo³, razón por la cual, le es posible encontrar rápidamente un valor de potencia adecuado; sin embargo, requiere equipos complejos y un extenso intercambio de señalización entre las estaciones base, de modo que no se implementa frecuentemente [26], [27].

2.1.1.2. Control de Potencia Descentralizado o Distribuido

Una entidad asociada a cada radioenlace (BS o UE), se encarga de recopilar información local, es decir, parámetros pertenecientes únicamente a la conexión establecida, una vez obtenidos, el cálculo del nivel de potencia adecuado se hace de manera iterativa.

Un aspecto crítico en los mecanismos distribuidos es el tiempo en que convergen los algoritmos, en este caso particular a una solución de potencia. Debido a que las características del canal varían constantemente, la actualización de potencia debe ser lo suficientemente rápida para converger y estabilizar el sistema [26]-[28].

2.1.2. Teniendo en cuenta el enlace en el que se lleva a cabo el control de potencia

2.1.2.1. Control de potencia en el Enlace de Subida

La estación base recopila información y le indica al móvil si debe incrementar o disminuir la potencia para alcanzar el nivel de QoS deseado. Su principal beneficio es la reducción del nivel de interferencia presente en el sistema, al enfrentar el problema cerca/lejos (*near/far*). Además, evita que la potencia de transmisión tome valores arbitrariamente grandes, prolongando así el tiempo de vida de las baterías [26].

2.1.2.2. Control de potencia en el Enlace de Bajada

La estación base realiza el ajuste de potencia, lo cual determina el área de cobertura, permitiendo incrementar o reducir la misma para equilibrar el tráfico. Otro beneficio es la reducción de pérdidas de propagación y por desvanecimiento causadas por el entorno y la velocidad de los móviles [29].

³ En un mecanismo iterativo, se repite un proceso hasta obtener un objetivo o resultado deseado.

2.1.3. De acuerdo al parámetro de medición utilizado

2.1.3.1. Basados en intensidad de potencia

El receptor mide constantemente la intensidad de la señal proveniente de la entidad transmisora para determinar si ésta es más alta o más baja que el valor de potencia deseado, de acuerdo a esto, envía un comando para incrementar o disminuir la potencia de transmisión.

2.1.3.2. Basados en SINR

Una entidad receptora mide el nivel de SINR, con el fin de que el transmisor ajuste su potencia, de manera que el sistema alcance el nivel de QoS deseado.

En comparación con los mecanismos basados en intensidad de potencia, estos reflejan mejor el desempeño del sistema, sin embargo introducen el problema de la realimentación positiva, que se presenta cuando una estación móvil incrementa su potencia de transmisión haciendo que se eleve el nivel de interferencia percibido por otros móviles, estos a su vez son forzados a aumentar su potencia de transmisión para mantener la calidad de sus enlaces, por lo que la interferencia total también aumenta, y se repite el proceso de manera continua.

2.1.3.3. Basados en BER

En recepción, se compara el número promedio de bits erróneos con respecto a una secuencia de bits original, teniendo en cuenta esto, se le indica al transmisor si debe incrementar o disminuir su potencia. Sin embargo, para medir la BER exacta, el sistema necesita retardo con el fin de acumular un número suficiente de muestras [26].

2.1.4. Dependiendo de la existencia o no de realimentación

2.1.4.1. Control de potencia en lazo abierto

En este mecanismo de control, no se requiere realimentación desde la entidad receptora, como se ve en la figura 2.1. El transmisor estima las pérdidas del canal debidas a la propagación y ajusta su nivel de potencia teniendo en cuenta una señal piloto recibida desde el receptor, es decir, si la potencia de la señal piloto es

baja, la entidad transmisora asume que está lejos de la receptora e incrementa su potencia y viceversa.

Sin embargo, si se considera el enlace ascendente (UL), la potencia de transmisión se decide de acuerdo con las medidas efectuadas en el enlace descendente (DL), y dado que las pérdidas en ambos enlaces no son iguales, ya que operan en frecuencias diferentes, el procedimiento de control en lazo abierto presenta errores, lo que conlleva a que este mecanismo sea de baja precisión [30].

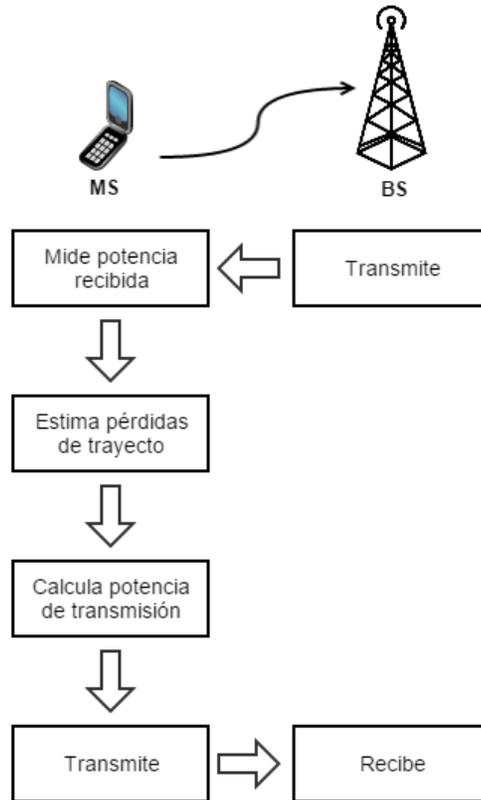


Figura 2. 1. Control de potencia en lazo abierto para el enlace ascendente. Adaptado de [31].

2.1.4.2. Control de potencia en lazo cerrado

Este mecanismo de control requiere realimentación desde el receptor; en este caso, la entidad receptora monitorea la potencia de la señal recibida y envía un comando de control, indicando al transmisor si debe aumentar o disminuir su potencia, como se aprecia en la figura 2.2, para el caso de control de potencia en el enlace ascendente.

Es un mecanismo mucho más preciso que el de lazo abierto pero también es más lento, ya que no puede reaccionar a los cambios rápidos debidos a las condiciones del canal. Cabe resaltar que el valor de potencia de la primera transmisión, es decir, antes de recibir la realimentación del receptor, se decide según un criterio de control en lazo abierto [29].

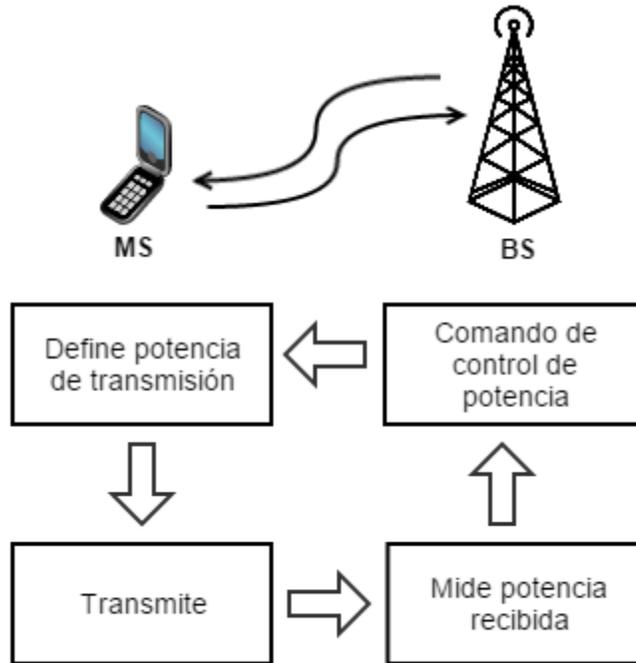


Figura 2. 2. Control de potencia en lazo cerrado para el enlace ascendente. Adaptado de [31].

Un resumen de las características de los diferentes mecanismos de control de potencia se presenta en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Características de los mecanismos de control de potencia.

| De acuerdo a cómo se recopila la información en el sistema móvil celular | |
|--|---|
| Centralizados | Distribuidos |
| <ul style="list-style-type: none"> - Recopilación global de información. - Cálculo simultáneo de potencia para todos los radioenlaces. - Equipos complejos, sobrecarga a la BS. | <ul style="list-style-type: none"> - Recopilación local de información. - Cálculo iterativo de potencia para cada radioenlace. - Tiempo de convergencia es un aspecto crítico. |
| Teniendo en cuenta el enlace en el que se lleva a cabo el control de potencia | |
| En el enlace de subida | En el enlace de bajada |
| <ul style="list-style-type: none"> - El control de potencia lo realiza el UE. | <ul style="list-style-type: none"> - El control de potencia lo realiza la BS. |

| | | |
|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Mitiga interferencia. - Evita valores de potencia arbitrariamente altos. - Incrementa tiempo de vida de las baterías de los dispositivos móviles. | <ul style="list-style-type: none"> - Permite ajustar zonas de cobertura para equilibrar tráfico. - Reduce pérdidas debidas a propagación y desvanecimiento. | |
| De acuerdo al parámetro de medición utilizado | | |
| Intensidad de Potencia | SINR | BER |
| <ul style="list-style-type: none"> - Receptor mide la intensidad de la señal y la compara con un valor objetivo de potencia. - Fácil implementación. | <ul style="list-style-type: none"> - Receptor mide SINR hasta alcanzar un nivel de QoS deseado. - Realimentación positiva. - Reflejan mejor el desempeño del sistema. | <ul style="list-style-type: none"> - Receptor compara secuencia de bits con respecto a una secuencia original. - Sistema necesita retardo para acumular muestras. |
| Dependiendo de la existencia o no de realimentación | | |
| Lazo abierto | | Lazo cerrado |
| <ul style="list-style-type: none"> - No requiere realimentación desde el receptor. - Ajuste de potencia teniendo en cuenta intensidad de la señal proveniente del receptor. - Reacciona más rápidamente a cambios del canal. - Mecanismo de baja precisión. | | <ul style="list-style-type: none"> - Requiere realimentación desde el receptor. - El receptor monitorea la potencia de la señal recibida y envía un comando de control al transmisor indicándole que ajuste la potencia. - Reacciona lentamente a los cambios del canal. - Mecanismo de precisión alta. |

2.2. ALGORITMOS DE CONTROL DE POTENCIA

Acorde a la clasificación realizada se determinó que los mecanismos de control de potencia que operan en forma distribuida y en lazo cerrado, son aquellos que ofrecerían mejores resultados en términos de simplicidad y precisión, respectivamente.

Teniendo en cuenta los requisitos del trabajo de grado, es necesario seleccionar mecanismos de control basados en SINR ya que este parámetro tiene en cuenta condiciones propias del entorno del sistema. A continuación se enuncia algunos de los algoritmos que cumplen con estas características:

2.2.1. Algoritmos de control de potencia distribuidos

2.2.1.1. Control de Potencia Distribuido

En el algoritmo de Control de Potencia Distribuido (DPC, *Distributed Power Control*) cada equipo terminal ajusta su potencia de transmisión en pasos de

tiempo discretos [32]. El ajuste de potencia que realiza cada móvil está dado por la ecuación (2.1).

$$p_i(n + 1) = \frac{p_i(n)}{SIR_i(n)} * C \quad (2.1)$$

Donde $p_i(n)$ es la potencia de transmisión del móvil i , $SIR_i(n)$ es la relación señal a interferencia medida por la estación base en la iteración n , y C es una constante positiva que controla la velocidad de convergencia del algoritmo.

Este algoritmo saca provecho de parámetros locales para converger a una solución con un cierto número de iteraciones, sin embargo requiere de un proceso de normalización para hallar un valor adecuado de C y mantener la potencia de transmisión dentro de los límites deseados [33]. Dicho proceso de normalización se realiza mediante el intercambio de información entre estaciones base, haciendo que el algoritmo sea parcialmente distribuido.

2.2.1.2. Control de Potencia Completamente Distribuido

Este algoritmo de Control de Potencia se conoce como Completamente Distribuido (FDPC, *Fully Distributed Power Control*) ya que evita el intercambio de información entre estaciones base [34]. La expresión matemática que describe el funcionamiento del algoritmo se muestra en la ecuación 2.2.

$$p(n + 1) = p(n) * \frac{\min [SIR_i(n), \beta]}{SIR_i(n)} \quad (2.2)$$

La idea básica del algoritmo FDPC es disminuir la potencia de transmisión del móvil i en proporción a la diferencia entre la SIR observada por la estación base y la constante β [34].

Como muestra la ecuación 2.2, se escoge el valor mínimo entre la SIR medida en el instante n y la constante β definida a priori. Si β es mayor que la SIR no se realiza ningún ajuste de potencia, si es menor, la potencia tiende a disminuir con cada iteración [35].

2.2.1.3. Control de Potencia Distribuido Simple

En el algoritmo de Control de Potencia Distribuido Simple (SDPC, *Simple Distributed Power Control*) cada usuario procede a ajustar iterativamente su nivel

de potencia hasta alcanzar el nivel de SIR deseado, es decir que si la SIR observada es menor que la objetivo, se incrementa la potencia o viceversa.

$$p_i(n + 1) = \frac{SIR(n)_{obj_i}}{SIR_i(n)} * p_i(n) \quad (2.3)$$

Este algoritmo reemplaza el uso de las constantes C y β de los algoritmos expuestos anteriormente, por el valor de la SIR objetivo del sistema, como se observa en la ecuación (2.3), con lo cual se resuelve el problema de la selección de un valor adecuado para estas constantes [35].

2.2.1.4. Control de Potencia Distribuido con Restricciones

Los algoritmos estudiados hasta el momento suponen una potencia de transmisión que se ajusta de manera iterativa, sin embargo, en los sistemas prácticos esta potencia de transmisión es limitada. Teniendo en cuenta esta característica, en [36] se presenta el algoritmo de Control de Potencia Distribuido con Restricciones (DCPC, *Distributed Constrained Power Control*), definido mediante la ecuación 2.4.

$$p_i(n + 1) = \min \left[p_i^{max}, p_i(n) \frac{SIR_i^{obj}}{SIR_i(n)} \right] \quad n = 0, 1, \dots \quad (2.4)$$

Donde p_i^{max} es la potencia de transmisión máxima permitida por el móvil i .

De (2.4) se observa que si la SIR medida se encuentra muy por debajo del nivel de SIR objetivo, la potencia de transmisión podría exceder un máximo permitido para el dispositivo móvil, por lo cual este algoritmo sugiere elegir el mínimo valor entre el nivel de potencia máximo y el obtenido al aplicar SDPC. En consecuencia, DCPC permite que un móvil transmita con la potencia máxima cuando se está experimentando baja calidad del enlace, sin embargo, esto no garantiza que se alcance el nivel de SIR objetivo, y además genera alto consumo de energía de los dispositivos móviles e interferencia con otros usuarios [35].

2.2.1.5. Control de Potencia Distribuido Generalizado con Restricciones

El algoritmo de Control de Potencia Distribuido Generalizado con Restricciones (GDCPC, *Generalized Distributed Constrained Power Control*) introduce una mejora al algoritmo DCPC [37] ya que permite transmitir con un nivel de potencia

tal que no se alcance el máximo permitido cuando la calidad del enlace es baja. La expresión para el ajuste de potencia se muestra en la ecuación 2.5 [35].

$$p_i(n+1) = \begin{cases} p_i(n) \frac{SIR_i^{obj}}{SIR_i(n)}, & \text{si } p_i(n) \frac{SIR_i^{obj}}{SIR_i(n)} \leq p_i^{max} \\ p'_i, & \text{si } p_i(n) \frac{SIR_i^{obj}}{SIR_i(n)} > p_i^{max} \end{cases} \quad (2.5)$$

$$0 \leq p'_i \leq p_i^{max}$$

Como se ve en (2.5) el buen funcionamiento del algoritmo depende del valor p'_i elegido, para el caso en que la SIR medida en la estación base se encuentre lejos del valor de SIR objetivo.

2.2.2. Algoritmos de control de potencia por pasos

2.2.2.1. Control de Potencia de Paso Fijo

El algoritmo de Control de Potencia de Paso Fijo (FSPC, *Fixed Step Power Control*) realiza el control de potencia en tiempo discreto y requiere realimentación de información desde la estación base. Para el caso del enlace de subida, se requiere conocer únicamente la SIR recibida en la estación base. Como primera medida, se define para el sistema una SIR objetivo, si la SIR percibida se encuentra por debajo de ese valor, la estación base enviará un comando al móvil indicando que debe incrementar la potencia de transmisión, si por el contrario el nivel de SIR está por encima, el comando de ajuste indicará una disminución de la potencia [38]. La ecuación que describe el algoritmo se presenta en 2.6, donde todas las variables se encuentran en unidades logarítmicas:

$$p_i(n+1) = p_i(n) + \delta * \text{sign} [SIR_i^{obj} - SIR_i(n)] \quad (2.6)$$

De (2.6) se observa que la potencia se incrementa o disminuye mediante un paso de tamaño fijo δ , que es típicamente de 1 dB. Aunque este algoritmo resulta fácil de implementar, no es capaz de seguir los cambios rápidos del canal radio de manera eficiente. En situaciones en las que se tiene desvanecimiento profundo, por ejemplo, los dispositivos móviles deben disminuir el nivel de potencia de

transmisión con el ánimo de mitigar la interferencia total del sistema, sin embargo, este paso de 1 dB no permite que la actualización de potencia sea tan rápida como se necesita [39].

2.2.2.2. Control de Potencia de Paso Adaptativo

El algoritmo de Control de Potencia de Paso Adaptativo (ASPC, *Adaptive Step Power Control*), resulta de una combinación entre un mecanismo de adaptación y los algoritmos DCPC y FSPC, los cuales son reescritos en (2.7) y (2.8) respectivamente.

$$p(n+1) = \min [p_i^{max}, p_i(n) + \delta * e(n)] \quad (2.7)$$

$$p(n+1) = \min [p_i^{max}, p_i(n) + \delta * \text{sign } e(n)] \quad (2.8)$$

Donde $e(n) = SIR_i^{Obj} - SIR_i(n)$.

El mecanismo de adaptación conocido como método de Paso Adaptativo (AS, *Adaptive Step*), se obtiene a partir de la ecuación 2.9.

$$\alpha(n, x) = \frac{1}{2} [1 + xu(n)u(n-1)], \quad x \in \{-1, 1\} \quad (2.9)$$

De donde, $u(n) = \text{sign}[e(n)] \in \{-1, 1\}$ corresponde al comando de control de potencia enviado al móvil desde la estación base. En la ecuación 2.9 se observa que $\alpha(n, 1)$ toma el valor de 1, cuando el último comando de control es igual al comando del instante anterior $u(n-1)$, si por el contrario, los dos últimos comandos son diferentes, el valor de $\alpha(n, 1)$ se hace igual a 0. Lo anterior se resume en la expresión 2.10.

$$\alpha(n, 1) = \begin{cases} 1, & \text{si } u(n) = u(n-1) \\ 0, & \text{si } u(n) \neq u(n-1) \end{cases} \quad (2.10)$$

La ecuación (2.11) describe el comportamiento del método AS propuesto en [35].

$$\tilde{e}(n) = \alpha(n, 1)\tilde{e}(n-1) + \delta_e u(n) \quad (2.11)$$

Donde, $\tilde{e}(n)$ es la reconstrucción de $e(n)$ y δ_e es un parámetro que controla la velocidad de actualización.

Finalmente, en (2.12) se presenta el algoritmo ASPC. La estación base genera los comandos $u(n)$ tal como sucede en el algoritmo FSPC, y se transmiten hacia el dispositivo móvil, en el cual se aplica el método AS para generar una reconstrucción de $e(n)$.

$$p(n + 1) = \min [p_i^{max}, \quad p(n) + \delta * \tilde{e}(n)] \quad (2.12)$$

Como se ve en (2.12) el algoritmo depende del valor de la reconstrucción de $e(n)$, el cual depende a su vez de δ_e , por lo cual, el buen desempeño del algoritmo se ve condicionado por la elección de dicho parámetro, ya que si toma valores muy pequeños, la red no puede seguir los cambios rápidos del canal.

2.2.3. Algoritmos de control de potencia basados en Teoría de Juegos

La Teoría de Juegos (GT, *Game Theory*) es el estudio de modelos matemáticos con un comportamiento estratégico, en situaciones en las que las decisiones de una entidad que participa en el “juego” afectan el resto de entidades involucradas [40]. Esta técnica ha sido ampliamente usada para modelar situaciones de conflicto o negociación en diferentes áreas, tales como economía, ciencias políticas, lógica, ciencias computacionales, comunicaciones, entre otras.

Una situación que es modelada como un juego, debe tener ciertos parámetros fundamentales, los jugadores, las acciones o estrategias, los beneficios y el conocimiento o desconocimiento de la información del juego, ya que se asume que los jugadores son entidades racionales que persiguen unos objetivos bien definidos [41].

Dentro de la Teoría de Juegos hay dos ramas principales, la Teoría de Juegos No Cooperativa (NCGT, *Non-Cooperative Game Theory*) y la Cooperativa (CGT, *Cooperative Game Theory*), la principal diferencia entre ambas radica en que en el modelo NCGT los jugadores buscan obtener el máximo beneficio para sí mismos, sin importar los beneficios obtenidos por los otros jugadores, mientras que en el modelo CGT las acciones a ejecutar se basan en los resultados obtenidos por los demás miembros del juego, procurando obtener un beneficio común.

En (2.16) se muestra la representación matemática de un juego estratégico para un conjunto finito de jugadores [42]:

$$G = \{N, (S_i)_{i \in N}, (U_i)_{i \in N}\} \quad (2.16)$$

Donde $N = \{1, 2, \dots, n\}$ representa el conjunto de jugadores, S_i es un conjunto de acciones o estrategias para cada jugador $i \in N$ y U_i es la función de utilidad o el beneficio obtenido por el jugador i al llevar a cabo una determinada acción.

Aplicando lo anterior al control de potencia, se tiene que N representa el conjunto de equipos de usuario, el conjunto de estrategias S_i corresponde al grupo de potencias utilizables por el UE y U_i es el beneficio obtenido por el UE al escoger un valor de potencia dado, representado mediante la SIR alcanzada por el UE [42].

A continuación se describen algunos de los algoritmos de Control de Potencia basados en Teoría de Juegos.

2.2.3.1. Control de Potencia basado en la función Sigmoide

En [43] se define el control de potencia basado en un juego no cooperativo para una red radio cognitiva⁴ en términos del conjunto de jugadores o UE, el conjunto de estrategias o potencias de transmisión y la función de costo.

$$G = \{N, (P_i), J_i(\cdot)\} \quad (2.17)$$

Cada UE selecciona su estrategia con el fin de minimizar la función de costo $J_i(P_i, SIR_i(\mathbf{P}))$. Como se observa en (2.18) consiste en una suma ponderada de potencias y la función cuadrática del error de SIR, teniendo como base la función sigmoide (σ).

$$J_i(P_i, SIR_i(\mathbf{P})) = [SIR_i^{obj} - SIR_i(\mathbf{P})]^2 + \frac{2}{\theta_i(\mathbf{P}_{-i})} \sigma\left(\frac{b_i}{c_i} \theta_i(\mathbf{P}_{-i}), a\right) P_i \quad (2.18)$$

Donde:

$$\theta_i(\mathbf{P}_{-i}) = \frac{p_i}{SIR_i(\mathbf{P})}$$

b_i, c_i son factores de ponderación no negativos.

$\sigma(\cdot)$ representa la función sigmoide, definida como se muestra en la ecuación 2.19.

⁴ Término genérico usado para describir una red en la que sus nodos inalámbricos son capaces de alterar parámetros particulares de transmisión o recepción, basados en la observación del entorno. Esto permite optimizar el uso del espectro de radio frecuencia y la posibilidad de reducir la interferencia a otros usuarios [44].

$$\sigma(x, a) = \frac{2}{1 + e^{-ax}} - 1 \quad (2.19)$$

La función de costo seleccionada en [43], la cual se basa en la función sigmoide, es la clave para que cada UE pueda escoger su potencia de transmisión eficientemente, es decir que, permite mantener un buen nivel de SIR, evitando el consumo excesivo de potencia [45]. Cada usuario actualiza la potencia usando únicamente la información de su propio nivel de interferencia, por lo que puede ser implementado de manera distribuida. El algoritmo de actualización de potencia se muestra en la ecuación 2.20.

$$p(n+1) = \theta_i(n)SIR_i^{obj} - \theta_i(n)\sigma\left(\frac{b_i}{c_i}\theta_i(n), a\right) \quad (2.20)$$

En (2.20) se observa que la potencia se incrementa si la SIR medida se encuentra por debajo de la SIR objetivo y disminuye, en caso contrario. La convergencia a una solución adecuada de potencia depende del factor sigmoide o de ajuste (a), el cual controla la velocidad de actualización de potencia. Entre más grande sea el valor de a , el incremento de potencia es menor y el decremento es mayor.

2.2.3.2. Control de Potencia basado en el equilibrio de Nash

En [46] se define el problema de control de potencia como un juego no-cooperativo en términos del conjunto de UE, potencias de transmisión y la función de costo.

$$G = \{N, (P_i), J_i(\cdot)\} \quad (2.21)$$

Cada UE trata de minimizar la función de costo $J_i(P_i, SIR_i(\mathbf{P}))$, que como se ve en (2.22) depende del valor de potencia y de la función cuadrática del error de SIR.

$$J_i(P_i, SIR_i(\mathbf{P})) = b_i P_i + c_i (SIR_i^{obj} - SIR_i(\mathbf{P}))^2 \quad (2.22)$$

La función de costo posee dos constantes de ponderación no negativas b_i y c_i . Al escoger el factor $\frac{b_i}{c_i} > 1$ se hace mayor énfasis en el consumo de potencia mientras que si se elige $\frac{b_i}{c_i} < 1$ se da más importancia al error de SIR [46].

Aplicando las condiciones necesarias para hallar el equilibrio de Nash se obtiene la expresión de actualización de potencia en (2.23).

$$p(n+1) = p_i(n) \frac{SIR_i^{Obj}}{SIR_i(n)} - \frac{b_i}{2c_i} \left(\frac{p_i(n)}{SIR_i(n)} \right)^2 \quad (2.23)$$

Este algoritmo posee un término cuadrático lo que hace que el tiempo de convergencia sea más rápido en comparación con los algoritmos lineales. Una ventaja significativa del algoritmo es que los equipos de usuario pueden escoger si transmiten o no de acuerdo a la relación que exista entre la utilidad obtenida y el consumo de potencia.

2.2.3.3. Modelo de control de potencia basado en teoría de juegos

Este algoritmo utiliza una representación como juego estratégico no cooperativo que se desarrolla en cada instante de tiempo t , denotado como $G = (N, \{P_n\}, \{U_n\}, \{F_n\})$ donde N representa el conjunto de usuarios, P_n es el conjunto de estrategias que corresponde a un conjunto discreto de potencias utilizables por el UE, U_n es el beneficio obtenido por el UE al aplicar una estrategia, que corresponde a la SINR alcanzada por cada UE. F_n es la función de satisfacción impuesta para cada comunicación, definida por la ecuación 2.24.

$$F_n = \{p_n \in P_n: \Gamma_n + \beta \geq U_n(p_n) \geq \Gamma_n\} \quad (2.24)$$

En (2.24) se observa que cada usuario busca alcanzar o superar ligeramente un umbral (Γ_n), el cual corresponde a la SINR establecida para su servicio. Además, se determina una cota superior, con lo cual se procura causar la menor interferencia posible sobre las comunicaciones de los demás usuarios.

En este algoritmo cada móvil actualiza su potencia de transmisión de acuerdo a un conjunto de probabilidades $\pi_n(t) = \{\pi_{n,1}(t), \dots, \pi_{n,p_n}(t)\}$, las cuales tienen correspondencia uno a uno con el conjunto de potencias establecidas por el sistema. La estación base determina la utilidad alcanzada o la SINR obtenida en el instante anterior y envía este dato al equipo de usuario para que actualice dichas probabilidades [41].

En una red heterogénea, a diferencia de una homogénea, se tienen estaciones base de diferentes características, esto es, potencia de trasmisión, rango de cobertura, ubicación, número de usuarios que puede atender, entre otras. Sin embargo, la diferencia más significativa radica en que este tipo de redes introducen un mayor nivel de interferencia que las homogéneas. Teniendo en cuenta esto, se considera que los algoritmos vistos anteriormente son adaptables a redes heterogéneas, ya que todos incluyen parámetros apropiados para la medición de interferencia.

Las características de los algoritmos de control de potencia analizados se resumen en la tabla 2.2.

Tabla 3.2. Elementos característicos de operación.

| Esquema de control de potencia | | Elementos característicos |
|------------------------------------|-------|---|
| Algoritmos de Control Distribuidos | DPC | <ul style="list-style-type: none"> - Tiene un factor de normalización que previene que la potencia de transmisión sea demasiado grande o pequeña. - Intercambio de información entre BS por lo cual no es totalmente distribuido. |
| | FDPC | <ul style="list-style-type: none"> - No necesita comunicación entre las BS. - No permite niveles altos de potencia. - Al incrementar el número de iteraciones la potencia tiende a cero. |
| | SDPC | <ul style="list-style-type: none"> - Operación simple. - No requiere infraestructura adicional. - Baja vulnerabilidad de la red. - Debido a la variabilidad del canal, requiere un tiempo de convergencia rápido. |
| | DCPC | <ul style="list-style-type: none"> - Limita la potencia de transmisión del móvil, de tal forma que no supere la máxima permitida. - No impide al móvil transmitir con el nivel de potencia máximo, por lo cual produce interferencia a los dispositivos cercanos. |
| | GDCPC | <ul style="list-style-type: none"> - No transmite con el nivel de potencia máximo permitido para los móviles. - El buen funcionamiento del algoritmo depende del valor de potencia elegido. |

| | | |
|--|--|---|
| Algoritmos de Control por Pasos | FSPC | <ul style="list-style-type: none"> - De fácil implementación. - El paso de tamaño fijo impide que la actualización de potencia sea lo suficientemente rápida. |
| | ASPC | <ul style="list-style-type: none"> - Al ser de paso adaptable la actualización de potencia se realiza rápidamente. - Capaz de seguir los cambios rápidos del canal. - El desempeño del algoritmo depende del parámetro que controla la velocidad de actualización (δ_e). |
| Algoritmos basados en Teoría de Juegos | Control de Potencia basado en función Sigmoide | <ul style="list-style-type: none"> - Introduce una función de costo que permite mantener un nivel adecuado de SIR sin un consumo elevado de potencia. - El método de iteración utilizado es de punto fijo por lo que la velocidad de convergencia es lenta. |
| | Control de Potencia basado en Equilibrio de Nash | <ul style="list-style-type: none"> - Converge más rápido que los algoritmos que poseen únicamente términos lineales. - UE pueden escoger si transmiten o no según la utilidad que obtengan. - La convergencia depende de la cuidadosa selección de los factores de ponderación. - Existe la probabilidad de que la potencia calculada resulte negativa. |
| | Modelo de Control de Potencia basado en Teoría de Juegos | <ul style="list-style-type: none"> - Cálculo de potencia realizado desde la estimación de probabilidades. - Inclusión del Aprendizaje Reforzado (RL, <i>Reinforcement Learning</i>). - Converge con pocas iteraciones del algoritmo haciendo un uso eficiente de la energía. - Valores discretos de potencia. |

Con base en el estudio realizado, se decide implementar el modelo de Control de Potencia basado en GT, ya que incluye el concepto de aprendizaje reforzado. El cual es de especial importancia para el presente trabajo de grado dado que permite seleccionar de manera dinámica los valores de potencia, teniendo en cuenta las condiciones del entorno y de acuerdo a esto, ajustar el sistema para obtener el mejor desempeño posible.

En el capítulo III se realiza una descripción detallada del modelo de Control de Potencia basado en Teoría de Juegos, aplicado a redes heterogéneas.

CAPÍTULO III. MODELO DE CONTROL DE POTENCIA BASADO EN TEORÍA DE JUEGOS EN UNA RED HETEROGÉNEA.

En esta sección se realiza una descripción de las características principales del sistema de comunicaciones, del modelo de Control de Potencia basado en Teoría de Juegos (GT), así como del modelo de Control Ideal de Potencia (IPC, *Ideal Power Control*), con el fin de establecer un punto de comparación con respecto a GT.

3.1. DEFINICIÓN DEL SISTEMA

Para el análisis de la incidencia del Control de Potencia sobre la capacidad de la red, se definió la realización de una simulación a nivel de sistema⁵, en la que se tiene una red de comunicaciones limitada por interferencia de portadora única⁶, que presenta las siguientes características:

- Arquitectura heterogénea de dos niveles: el nivel superior conformado por una microcelda, y el nivel inferior por K número de femtoceldas.
- Proporciona servicio a dos tipos de usuarios: micro Usuarios (mU, *micro User*) los cuales están asociados a la micro Estación Base (mBS, *micro Base Station*) y los Femto Usuarios (FU, *Femto User*) conectados al Punto de Acceso Femtocelular (FAP).
- Ofrece servicios de voz y datos, en un ambiente urbano.
- Los usuarios transmiten utilizando un canal cuya frecuencia portadora es 1700 Mhz.

La figura 3.1 ilustra el escenario de simulación, que tiene un área de 1 km^2 y sobre la cual se ubica aleatoriamente un número fijo de usuarios siguiendo una distribución uniforme.

⁵ En una simulación a nivel de sistema se realiza un análisis global del comportamiento del sistema.

⁶ En una red limitada por interferencia de única portadora, todas las comunicaciones de los usuarios se realizan sobre la misma portadora generando un nivel de interferencia superior a la potencia percibida por la BS y por ende un valor de SINR bajo.

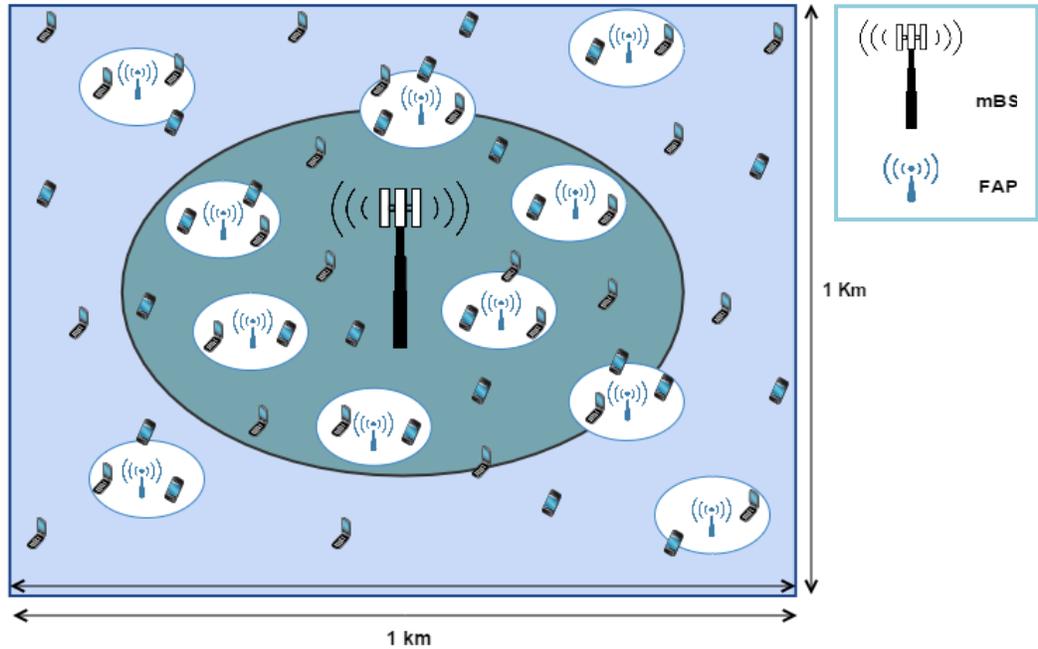


Figura 3. 1. Escenario de simulación.

A partir de las premisas anteriores se obtiene el diagrama de bloques general del sistema, como se muestra en la figura 3.2, el cual tiene dos características importantes:

- Cada FAP asocia a los UE que se encuentren dentro del área de servicio de su celda y los identifica con el subíndice propio de la celda, es decir, los UE asociados al FAP_1 reciben el nombre de FU_1 y así sucesivamente.
- Cada Estación Base (FAP o mBS) atiende a los UE asociados a su celda e identifica como interferencia las señales recibidas de los UE pertenecientes a otras celdas (flechas de color rojo).

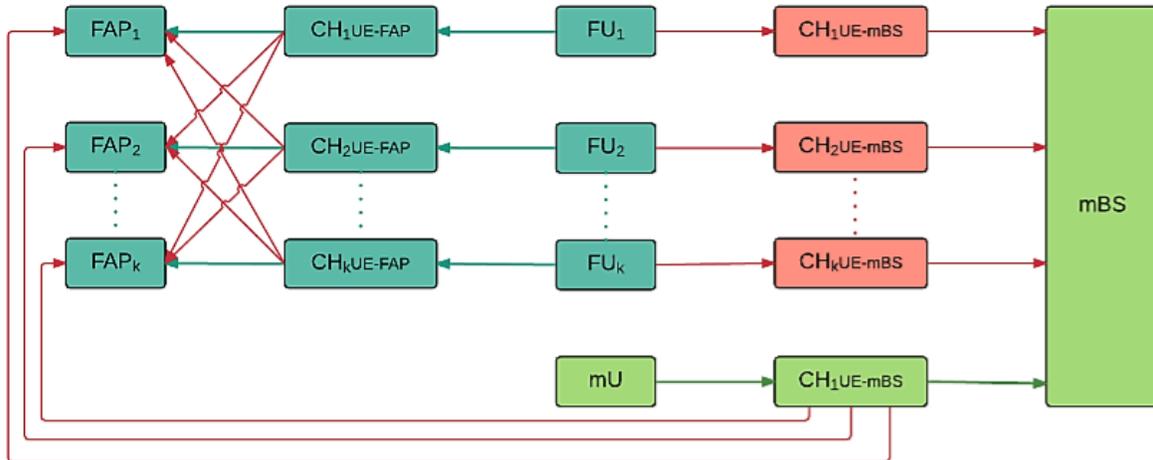


Figura 3. 2. Diagrama de bloques general del sistema.

Otro aspecto importante es el canal de comunicaciones (CH), en el que se emplea el modelo de propagación para ambientes interiores, exteriores y peatonales. Este modelo es válido para enlaces Sin Línea de Vista (NLOS, *Non Line Of Sight*), y describe el peor caso de propagación [47]. El Desvanecimiento por Sombra (SF, *Shadow Fading*) se modela mediante una variable aleatoria D con distribución normal y desviación estándar de 5dB, de manera que las pérdidas de propagación L quedan representadas por la expresión 3.1.

$$L [dB] = 49 + 40 \log_{10} [d(km)] + 30 \log_{10} [f(MHz)] + D[dB] \quad (3.1)$$

Donde, d es la distancia en kilómetros entre la BS y el UE y f es la frecuencia portadora en MHz.

3.2. DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL DEL SISTEMA

El procedimiento que describe el comportamiento general del sistema se presenta a continuación:

1. Los usuarios que se encuentran en el interior y exterior de la microcelda transmiten una señal.
2. Se aplican los efectos de atenuación y desvanecimiento del canal a las señales transmitidas por los UE.
3. Cada UE se asocia a la BS (FAP o mBS) más cercana.

4. Se asigna una potencia de transmisión que se mantiene a lo largo de la simulación a los UE que quedan por fuera del radio de cobertura de la microcelda.
5. Cada BS atiende a los usuarios que se encuentran asociados a su celda e identifica como interferencia la señal proveniente de los otros UE del sistema.
6. En cada BS y UE del sistema se implementa el algoritmo de PC correspondiente.
7. Se calcula la probabilidad de degradación teniendo en cuenta la cantidad de UE atendidos con relación al número total de UE que se encuentran dentro de la celda de análisis.
8. La condición de finalización depende del número de iteraciones, las cuales han sido establecidas en 1000, teniendo en cuenta que en la mayoría de las simulaciones realizadas, el comportamiento del sistema converge alrededor de las 1000 iteraciones.

Al tratarse de una simulación a nivel de sistema de tipo estático, el procedimiento descrito se repite para cada uno de los UE presentes en el sistema.

Con base en lo anterior se obtiene el diagrama de flujo general del sistema que se muestra en la figura 3.3, en el cual se observa que el primer paso de la simulación es la determinación y configuración de las variables necesarias para generar el escenario de estudio. Una vez hecho esto se ubica aleatoriamente los UE y los FAP y se realiza la asociación de los usuarios a la Estación Base que se encuentre a menor distancia. Luego se lleva a cabo el Control de Potencia, el cual se realiza de dos maneras, aplicando el algoritmo de GT e IPC, siendo este último el punto de referencia para determinar el comportamiento del modelo de PC basado en GT. Posteriormente, se calcula la SINR para determinar el número de usuarios atendidos y con esto obtener la probabilidad de degradación del sistema, lo cual permite realizar un análisis de la capacidad del sistema de comunicaciones.

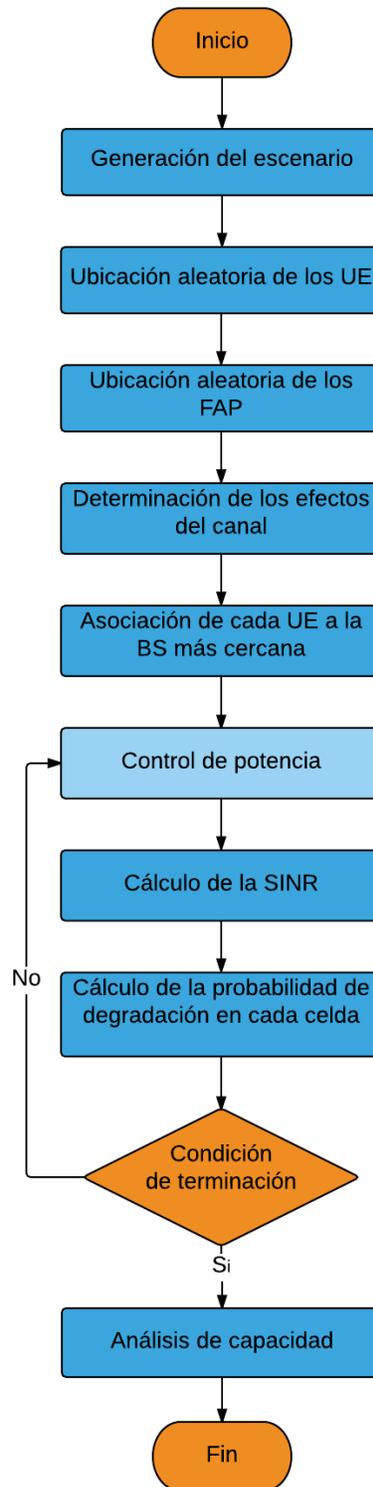


Figura 3. 3. Diagrama de flujo general del sistema.

3.3. MODELO DE CONTROL IDEAL DE POTENCIA

El Control Ideal de Potencia (IPC) busca mitigar el nivel de interferencia presente en el sistema. Al aplicar esta técnica, las potencias recibidas en la estación base (mBS o FAP) de todos los UE son aproximadamente iguales, sin importar la distancia a la cual se encuentren, con lo que se disminuye el problema de interferencia por móvil cercano/lejano [41].

Al implementar IPC, es necesario conocer el valor de SINR que en un instante determinado percibe la BS de cada una de las conexiones UE-BS. Este valor se obtiene mediante la expresión 3.2.

$$SINR_i = \frac{\alpha_i P_{ti}}{\eta + \sum_{j=1, j \neq i}^N \alpha_j P_{tj}} \quad i, j \in \mathbb{N} \quad (3.2)$$

Donde, α_i es la ganancia del sistema⁷ que experimenta el usuario i , P_{ti} corresponde a la potencia con la cual transmite el usuario i –ésimo, η es el ruido térmico del sistema y N representa el número de usuarios presentes en la celda de análisis⁸.

Para realizar el análisis de Control de Potencia, se toma el sistema de ecuaciones originado por la SINR que se experimenta en cada comunicación, planteando el sistema de ecuaciones 3.3.

$$\begin{aligned} \eta_1 + \sum_{j=1, j \neq 1}^N \alpha_j P_{tj} &= \frac{\alpha_1 P_{t1}}{SINR_1}, \\ \eta_2 + \sum_{j=1, j \neq 2}^N \alpha_j P_{tj} &= \frac{\alpha_2 P_{t2}}{SINR_2}, \\ &\vdots \\ \eta_N + \sum_{j=1, j \neq N}^N \alpha_j P_{tj} &= \frac{\alpha_N P_{tN}}{SINR_N} \end{aligned} \quad (3.3)$$

⁷ Tiene en cuenta las ganancias y pérdidas que experimenta la señal en el trayecto entre el usuario y la estación base.

⁸ Según la estación que efectúe el PC, la celda de análisis puede ser la microcelda o cualquiera de las femtoceldas.

En este sistema de ecuaciones se define $\eta = \{\eta_1, \dots, \eta_N\}$ como un vector de ruido térmico de orden $N \times 1$, $\alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_N\}$ como el vector de ganancias del sistema de orden $1 \times N$, $SINR = \{SINR_1, \dots, SINR_N\}$ el vector de orden $N \times 1$ que contiene el requisito de SINR para cada UE presente en una celda, y finalmente $P = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$ como el vector conformado por las potencias de transmisión necesarias para cumplir con el valor de SINR requerido. La expresión 3.4 corresponde a un arreglo matricial de ecuaciones, en el que P es el vector de incógnitas.

$$\begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \vdots \\ \eta_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_1}{SINR_1} & -\alpha_2 & \cdots & -\alpha_N \\ -\alpha_1 & \frac{\alpha_2}{SINR_2} & \ddots & -\alpha_N \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & \cdots & \frac{\alpha_N}{SINR_N} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_N \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Para facilitar la deducción de la potencia de transmisión de cada UE teniendo en cuenta el total de dispositivos que conforman la red, el anterior sistema de ecuaciones queda expresado en función del sistema lineal que se muestra en la ecuación 3.5.

$$AP = \eta \quad (3.5)$$

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

$$A = \begin{cases} -\alpha_j & i \neq j \\ \frac{\alpha_i}{SINR_i} & i = j \end{cases} \quad \forall i, j \in \mathbb{N} \quad (3.6)$$

Así, el vector de potencias de transmisión está dado por la ecuación 3.7.

$$P = A^{-1}\eta \quad (3.7)$$

Con la expresión anterior se obtiene el valor de potencia de transmisión que debe ser asignado a cada UE. Sin embargo, es necesario ajustar este resultado, ya que no tiene en cuenta los usuarios que se encuentran fuera del rango de cobertura de cada Estación Base (mBS o FAP). En la ecuación 3.8, se incluye el valor de interferencia intercelda, es decir, la interferencia generada por los UE asociados a las demás celdas.

$$SINR_i = \frac{\alpha_i P_{ti}}{\eta + i_0 + \sum_{j=1, j \neq i}^N \alpha_j P_{tj}} \quad i, j \in \mathbb{N} \quad (3.8)$$

Donde, i_0 corresponde a la interferencia que percibe la mBS o cada FAP debida a los UE que se encuentran por fuera de su rango de cobertura. Se define en la expresión 3.9.

$$i_0 = \sum_{m=N+1}^M \alpha_m P_{tm} \quad (3.9)$$

Así, α_m representa la ganancia del enlace m -ésimo y P_{tm} la potencia de transmisión del UE m -ésimo.

De esta manera, el sistema de ecuaciones lineales resultante y su correspondiente solución se muestran en (3.10) y (3.11), respectivamente.

$$AP = \eta + i_0 \quad (3.10)$$

$$P = A^{-1}(\eta + i_0) \quad (3.11)$$

Con la expresión 3.11, se obtiene la potencia de transmisión de los UE asociados a la celda de análisis, teniendo en cuenta el nivel de interferencia intercelda. Este resultado se implementó en simulación con el ánimo de establecer un punto de comparación con el control de potencia basado en Teoría de Juegos.

En la figura 3.4 se muestra el diagrama de flujo del modelo IPC, en el cual el bloque de color verde representa el proceso que lleva a cabo un UE, y los bloques de color azul representan los procesos que ejecuta la Estación Base que atiende al UE.

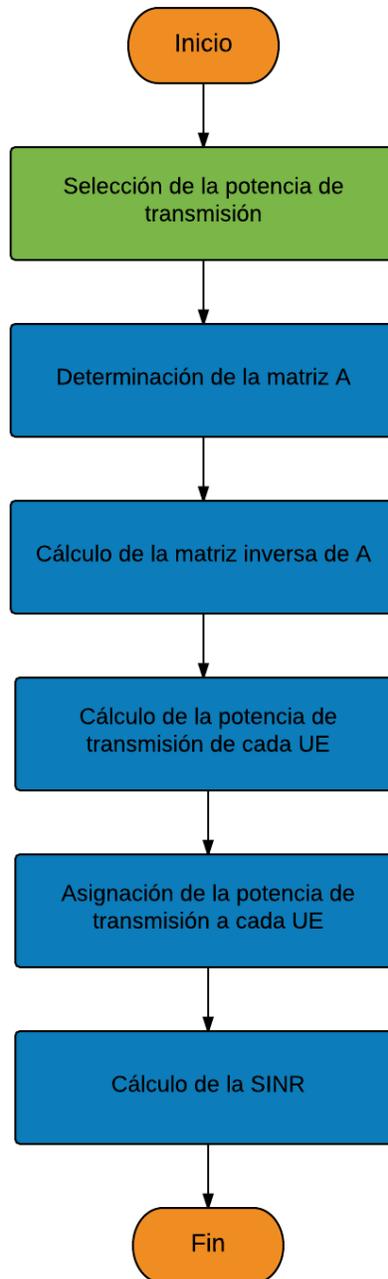


Figura 3. 4. Diagrama de flujo del Control Ideal de Potencia.

3.4. MODELO BASADO EN TEORÍA DE JUEGOS

Este modelo de control de potencia se basa en un juego no cooperativo, que incluye el Aprendizaje Reforzado (RL) como técnica para seleccionar de manera dinámica los valores de potencia que permitan un buen desempeño del sistema

móvil celular. A continuación, se identifican los elementos propios de la Teoría de Juegos antes de realizar la descripción del algoritmo.

3.4.1. Definición del juego

La expresión 3.12 muestra la representación normal del juego G .

$$G = (N, \{P_n\}_{n \in N}, \{U_n\}_{n \in N}, \{F_n\}_{n \in N}) \quad (3.12)$$

Donde,

N : Corresponde al número de usuarios al interior de la celda de análisis.

P_n : Representa el conjunto de estrategias, conformado por 13 niveles de potencia utilizables por el UE.

U_n : Es el conjunto de utilidades del juego, es decir, el beneficio obtenido al aplicar una estrategia $p_n \in P_n$. Está dado por la expresión 3.13, que corresponde a la SINR alcanzada por cada UE al aplicar una potencia determinada.

$$U_n(p_n) = SINR_n = \frac{\alpha_n P_{tn}}{\eta + i_0 + \sum_{j=1, j \neq n}^N \alpha_j P_{tj}} \quad \forall n, j \in \mathbb{N} \quad (3.13)$$

Donde α_n es la ganancia del sistema experimentada por el UE n -ésimo, η es la potencia de ruido térmico, i_0 representa la interferencia que percibe la mBS o un FAP, debida a los usuarios que no se encuentran dentro de su rango de cobertura, la cual se obtiene mediante la ecuación 3.14.

$$i_0 = \sum_{j=N+1}^M \alpha_j P_{tj} \quad (3.14)$$

F_n : Es la función de satisfacción de cada comunicación, y se define mediante la expresión 3.15.

$$F_n = \{p_n \in P_n : \Gamma_n + \beta \geq u_n(p_n) \geq \Gamma_n\} \quad (3.15)$$

En (3.15) es posible observar que un usuario es satisfecho si la utilidad obtenida al aplicar una estrategia determinada, iguala o supera ligeramente un valor umbral (Γ_n), el cual corresponde a la SINR establecida para un servicio. La cota superior dada por $\Gamma_n + \beta$, procura causar la menor interferencia posible sobre las comunicaciones de los demás usuarios del sistema.

3.4.2. Descripción del algoritmo

Para realizar el Control de Potencia basado en la Teoría de Juegos, el algoritmo ejecuta los procedimientos teniendo en cuenta los puntos que se explican a continuación [40]:

- Para cualquier instante de tiempo t existe un vector de probabilidades $\Pi_n(t) = \{\pi_1(t), \pi_2(t), \dots, \pi_{10}(t)\}$ que tiene correspondencia uno a uno con los elementos de P_n para el usuario n . Los valores iniciales del vector se escogen de manera arbitraria, de tal forma que la suma sea igual a uno.
- En el instante $t = 0$, cada UE selecciona una potencia de transmisión inicial p_n de acuerdo al elemento con mayor probabilidad del conjunto P_n . La Estación Base determina la utilidad obtenida con la estrategia aplicada y envía esta información al UE para que actualice sus estrategias.
- En el instante $t > 0$, cada UE procede a calcular un valor $b_{n,t}$, el cual se define mediante la expresión 3.16.

$$b_{n,t} = \frac{M_n + U_{n,t-1} - \Gamma_n}{2M_n} \quad (3.16)$$

Donde M_n es el valor máximo que puede tomar la función de utilidad, $U_{n,t-1}$ corresponde a la utilidad, es decir, la SINR obtenida en el instante anterior y Γ_n es la SINR mínima requerida por el usuario n -ésimo para el servicio solicitado.

- Partiendo de los resultados obtenidos se actualiza la probabilidad para cada potencia que conforma el conjunto P_n del usuario n , según la ecuación 3.17.

$$\pi_n(t) = \begin{cases} g'(\pi_n(t-1)), & \text{si } \beta \geq U_{n,t} - \Gamma_n \geq 0 \\ g(\pi_n(t-1)), & \text{otro caso} \end{cases} \quad (3.17)$$

Donde β es un parámetro que depende de la tolerancia del sistema a la interferencia, el cual ha sido establecido en 0.03. Las funciones g y g' se definen en las ecuaciones 3.18 y 3.19, respectivamente.

$$g'(\pi_n(t)) = \pi_n(t-1) + \lambda_{n,t} b_{n,t} (1_{\{p_n(t)=p_n\}} - \pi_n(t-1)) \quad (3.18)$$

$$g(\pi_n(t)) = \pi_n(t-1) + \lambda_{n,t} b_{n,t} (1_{\{p_n(t) \neq p_n\}} - \pi_n(t-1)) \quad (3.19)$$

Donde $\lambda_{n,t} = \frac{1}{1+t}$ es la tasa de aprendizaje (RL) para cada UE [40].

En las expresiones 3.18 y 3.19 es posible notar que, si la SINR se encuentra dentro del rango permitido, la probabilidad de la potencia de transmisión elegida se incrementa, con lo cual se mantiene la estrategia adoptada por el UE. En cambio, si la SINR no alcanza o sobrepasa el límite permitido, la probabilidad de la potencia seleccionada disminuye, haciendo que el UE modifique sus estrategias.

En la figura 3.5 se ilustra el diagrama de flujo del Control de Potencia basado en Teoría de Juegos, que en comparación con el diagrama de IPC, evidencia una disminución de los procesos ejecutados por la Estación Base.

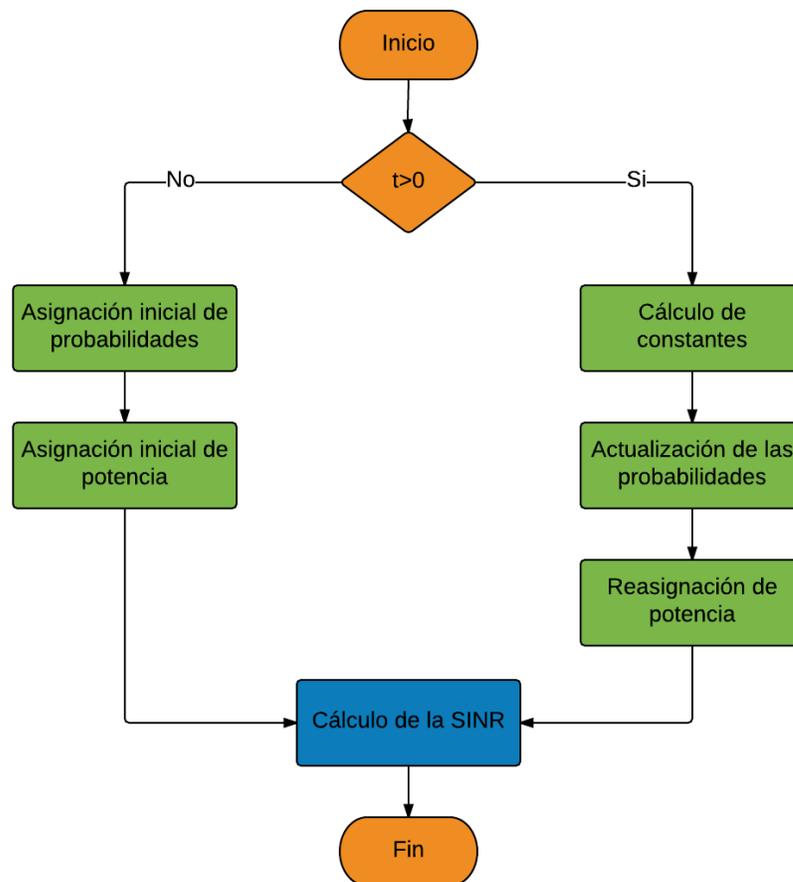


Figura 3. 5. Diagrama de flujo del control de potencia basado en GT.

En el capítulo siguiente se describen las características de los escenarios y casos de simulación definidos para la ejecución de la pruebas, y se presentan los resultados con su análisis correspondiente.

CAPÍTULO IV. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con base en los diagramas elaborados en el capítulo anterior y teniendo en cuenta las restricciones del sistema que se muestran a continuación, en el presente capítulo se desarrolla la metodología de simulación que conlleva a la obtención y análisis de los resultados.

4.1. LIMITACIONES DEL SISTEMA

El sistema a simular presenta una serie de limitaciones, las cuales se mencionan a continuación:

- **Modelo de propagación:** el modelo de propagación utilizado no tiene en cuenta las alturas de los UE ni de las estaciones base [47], tampoco las pérdidas por lluvia o gases, ya que la frecuencia de operación del sistema es menor a 10 GHz.
- **Única portadora:** todos los UE transmiten hacia su BS con la misma frecuencia de operación, lo cual genera un nivel de interferencia alto.
- **Control de potencia en el UL:** dado que la condición de interferencias es más crítica en UL que en DL, la implementación del control de potencia se hace solo en este sentido de la comunicación.
- **Movilidad:** el sistema diseñado considera a los usuarios estáticos dentro del escenario de simulación.
- **Trasposos:** debido a que el sistema no considera la movilidad de los usuarios, se evita el proceso de trasposos, lo cual agrega simplicidad al modelado del sistema y disminuye la lógica requerida para la implementación de los algoritmos.

4.2. DESARROLLO METODOLÓGICO

La metodología adoptada para la ejecución de las simulaciones dentro del desarrollo del trabajo de grado, es el resultado de una adaptación realizada a la metodología de simulación descrita en [48] y [49] y consta de las etapas descritas a continuación:

- 1. Selección de la herramienta de simulación:** se tienen dos herramientas de simulación propuestas, a partir de estas, se escoge la más adecuada para el desarrollo del trabajo.

2. **Codificación del sistema:** se realiza la codificación del sistema de comunicaciones heterogéneo definido.
3. **Definición de los escenarios y casos de simulación:** se definen los escenarios y casos de simulación para la ejecución de las pruebas, y se definen sus características técnicas.
4. **Ejecución de las pruebas:** teniendo los escenarios, los casos y los parámetros completamente definidos, se ejecutan las pruebas de simulación.
5. **Análisis de resultados:** una vez finalizada la etapa de pruebas y teniendo en cuenta los requisitos de calidad del sistema, se presenta el análisis de los resultados obtenidos.

4.2.1. Selección de la herramienta de simulación

Durante el proceso de selección de la herramienta de simulación, se tuvieron en cuenta las necesidades del proyecto, como son, operaciones y funciones matemáticas, elaboración de gráficas y un entorno de trabajo agradable. Para esto, se analizaron dos opciones, Scilab 5.4.1 y Matlab R2010a, las cuales cumplen con los requisitos de programación para el desarrollo del trabajo de grado.

La principal ventaja de Scilab es el hecho de ser un software libre y de código abierto, sin embargo, teniendo en cuenta que la Universidad del Cauca tiene las licencias necesarias para trabajar con Matlab, y que éste software cuenta con mayor reconocimiento frente a la comunidad científica e investigativa, a nivel internacional, se escogió Matlab como la herramienta de simulación para el presente trabajo.

4.2.2. Codificación del sistema

La codificación en Matlab se realiza mediante el uso de estructuras, lo que proporciona mayor flexibilidad, ya que permite manipular fácilmente los parámetros del sistema. Se definen tres estructuras básicas, la primera denominada "FemtoCelda", contiene información acerca de la ubicación de cada FAP en el escenario de simulación, su identificación, la potencia que recibe de cada UE, entre otros parámetros; la segunda llamada "Usuarios", contiene información correspondiente a la ubicación del UE en el escenario, potencia de transmisión, efectos del canal de comunicaciones sobre la señal de cada UE, tipo del servicio al cual desea acceder, SINR obtenida en cierto instante de tiempo, distancia a la mBS y al FAP más cercano, entre otros; y una tercera estructura

denominada “microcelda” la cual tiene parámetros como su ubicación y la potencia que recibe de los usuarios.

4.2.3. Definición de los escenarios y casos de simulación

Se considera un sistema de comunicaciones con un área de 1 km^2 , en el que se tienen 150 femtoceldas de 40 m de radio y una microcelda de 400 m o 200 m de radio, lo cual genera dos escenarios de simulación. Se incluyen 500 usuarios de manera aleatoria siguiendo una distribución uniforme de media 1/2 y desviación estándar igual a 1/12.

Para analizar la capacidad⁹ del sistema, se definieron tres casos de simulación, en los cuales se prestan servicios diferentes, es decir, el valor de SINR objetivo varía en cada caso. La tabla 4.1 describe los escenarios y casos de simulación.

Tabla 4. 1. Escenarios y casos de simulación

| Escenarios de simulación | | | |
|---|---|---|-------------------|
| Escenario 1 | | Escenario 2 | |
| Área | 1 km ² | Área | 1 km ² |
| Número femtoceldas | 150 | Número femtoceldas | 150 |
| Radio microcelda | 400 m | Radio microcelda | 200 m |
| Radio femtocelda | 40 m | Radio femtocelda | 40 m |
| Casos de simulación | | | |
| Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Servicio: voz • Sin PC • PC basado en GT y en IPC | <ul style="list-style-type: none"> • Servicio: datos • Sin PC • PC basado en GT y en IPC | <ul style="list-style-type: none"> • Servicio: voz y datos • Sin PC • PC basado en GT y en IPC | |

⁹ Entendida como la cantidad de usuarios que la red atiende de manera simultánea.

4.2.3.1. Definición de las características de los escenarios de simulación

La tabla 4.2 resume las características técnicas y los parámetros seleccionados para la configuración de los escenarios de simulación propuestos.

Tabla 4. 2. Parámetros de los escenarios de simulación

| Característica | Valor |
|--|---|
| Frecuencia de operación | 1700 MHz |
| Servicio implementado | Voz y datos |
| Requerimiento de SINR | -20 dB y -14 dB ¹⁰ |
| Cantidad de UE | 500 |
| Potencias de transmisión | -Inf dBm ¹¹ , 1dBm, 4dBm, 7dBm, 10dBm, 13dBm, 16dBm, 19dBm, 22dBm, 25dBm, 28dBm, 31dBm, 34dBm. |
| Potencia de transmisión de UE fuera de la microcelda | 31dBm |
| Ganancia de antena de la mBS | 20dB |
| Ganancia de antena del UE | 0dB |
| Ancho de banda | 3.84 MHz |
| Potencia de ruido térmico | -101.75dBm |
| Figura de ruido | 7.4dB |

4.2.4. Simulación y análisis de resultados

Para analizar cómo se afecta la capacidad de una red heterogénea al implementar un algoritmo de PC, las pruebas iniciales de los diferentes casos se realizaron sin control de potencia (ver apéndice A). Así, los usuarios seleccionaron su potencia de transmisión de forma aleatoria, realizando este proceso 1000 veces, para finalmente obtener datos sobre la capacidad de la red. El resumen de dichos resultados se encuentra consignado en la tabla 4.3.

¹⁰ En sistemas limitados por interferencia con portadora única, los valores de SINR son menores que cero, debido a la interferencia generada por los UE que mantienen comunicaciones activas.

¹¹ Corresponde a un valor de potencia igual a 0 watts.

Tabla 4. 3. Resumen de la capacidad obtenida sin control de potencia

| | Escenario 1 | | | Escenario 2 | | |
|---------------|-------------|--------|--------|-------------|--------|--------|
| | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 |
| Capacidad (%) | 18.2% | 16.9% | 20.5% | 22.9% | 23.6% | 25.5% |

Los resultados de capacidad obtenidos cuando no se aplica ningún mecanismo de control son bajos para todos los escenarios y casos, ratificando la necesidad del control de potencia como estrategia para la mitigación de la interferencia y el consecuente incremento en la capacidad de la red de comunicaciones. Por otra parte, se esperaría que el sistema atienda un mayor número de usuarios cuando el requisito de SINR es más bajo, sin embargo, los resultados no coinciden con la teoría ya que el proceso de asignación de potencias se realizó de forma aleatoria.

A continuación se presentan las pruebas realizadas con la implementación del modelo basado en Teoría de Juegos (GT) y el modelo de Control Ideal de Potencia (IPC) y los resultados obtenidos.

4.2.4.1. Escenario 1: 400 metros

La figura 4.1 muestra el primer escenario de simulación, en el cual, el triángulo negro representa la ubicación de la Micro Estación Base (mBS), mientras que los cuadrados azules representan los FAP y los círculos corresponden a los UE ubicados aleatoriamente en el sistema.

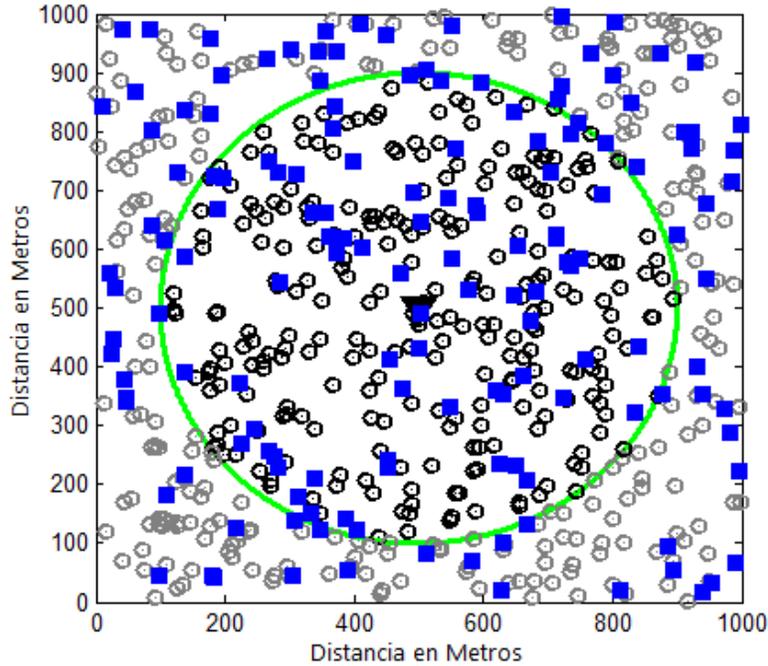


Figura 4. 1. Primer escenario de simulación.

- **Caso 1 : voz**

En la figura 4.2 se muestra el resultado de la implementación del modelo de PC basado en GT, donde los círculos verdes corresponden a usuarios cuyo requerimiento de SINR fue satisfecho mientras que los círculos negros representan a los usuarios que no lograron conectarse al sistema y los de color gris, a los usuarios que se encuentran fuera de la zona de cobertura de la microcelda.

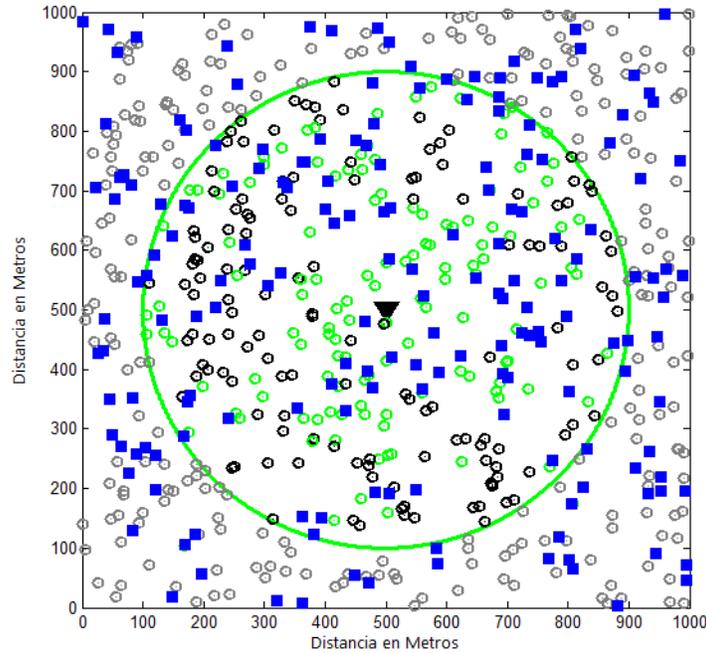


Figura 4. 2. Resultado obtenido con GT, escenario 1 – voz.

En este caso, de los 263 usuarios que se encuentran al interior de la microcelda, 127 son atendidos satisfactoriamente, lo que corresponde a un 48.3% de la totalidad de usuarios, esto evidencia que la aplicación del modelo de PC aumentó la capacidad de la red, aproximadamente en un 30%, en comparación con las simulaciones sin aplicar ningún proceso de control de potencia que dieron como resultado una capacidad promedio de 18,2%. De los 127 usuarios atendidos, 97 están asociados a los FAP y 30 a la mBS, es decir que el 76,4% de los usuarios atendidos corresponden a Femo Usuarios (FU), lo que indica que la capacidad de la red se soporta principalmente en los FAP.

La figura 4.3a muestra la variación de la probabilidad de cada nivel de potencia para un mU que se encuentra a 63,6 m de la mBS, el cual inicia transmitiendo con una potencia de 1dBm, que como se ve en la figura 4.3b no satisface su requerimiento de SINR, razón por la cual el algoritmo hace que la probabilidad de dicha potencia disminuya y aumenta la probabilidad de las demás. Al cabo de 250 iteraciones, el algoritmo asigna una potencia de 19dBm con la que el usuario obtiene una utilidad que se encuentra dentro del rango deseado, como se observa en la curva de variación de SINR.

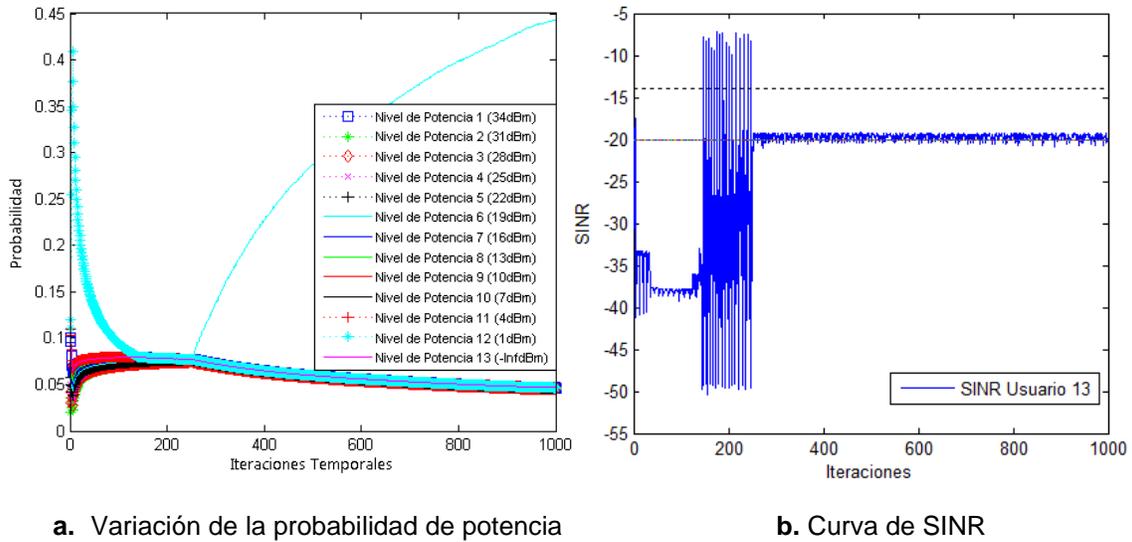


Figura 4. 3. Resultados de un mU a 63,6 m de la mBS.

En la figura 4.4a se observa la gráfica de la variación de la probabilidad de potencia de un UE ubicado a una distancia de 364 m de la mBS. Este usuario no logró conectarse al sistema debido a que las condiciones de interferencia no le permitieron encontrar una potencia con la que obtuviera una utilidad por encima de la SINR objetivo.

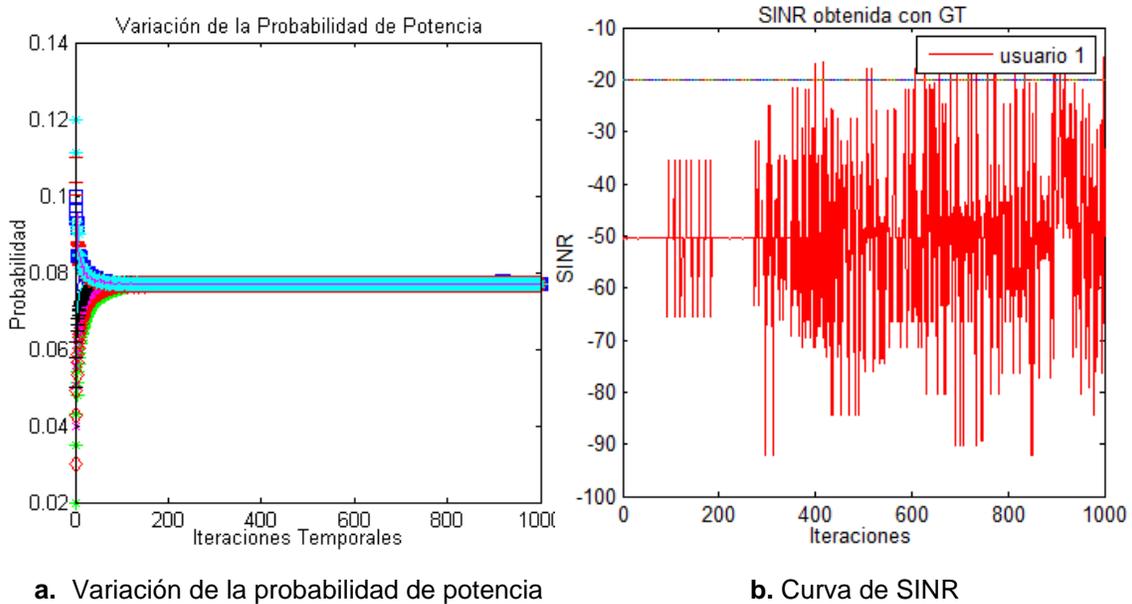
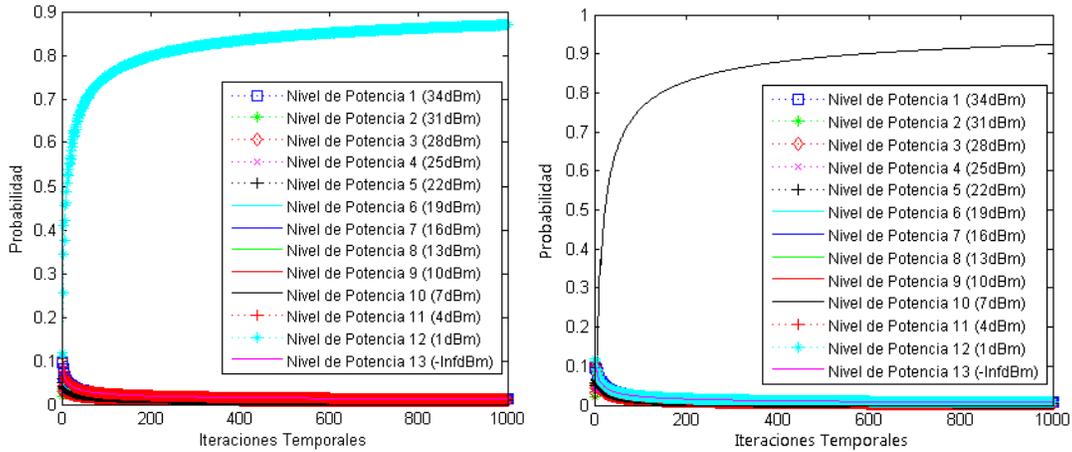


Figura 4. 4. Resultados de un UE no conectado

En las figuras 4.5a y 4.5b se observa la variación de la probabilidad de potencia para dos FU ubicados a 14.6 m y 25.8 m de su FAP. Las figuras 4.6a y 4.6b

muestran la gráfica del mismo parámetro para dos mU situados a una distancia de 169.4 m y 97.4 m de la mBS.

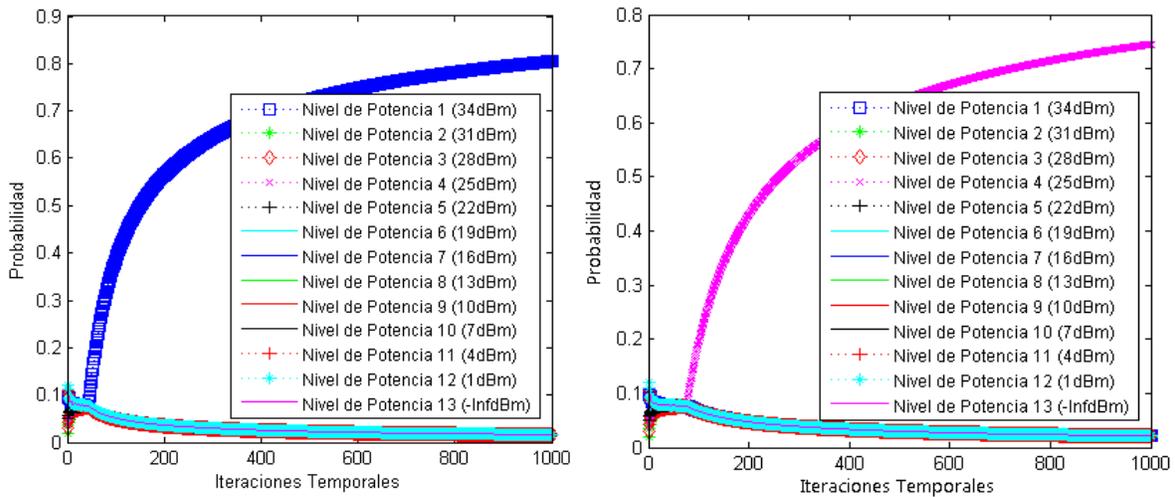
Estas gráficas muestran la incidencia de la distancia de los UE en la elección de su potencia, puesto que los UE que se encontraron más lejos de su mBS o FAP necesitaron una potencia más alta que el UE que se ubicó más cerca.



a. UE a 14.6 m de un FAP

b. UE a 25.8 m de un FAP

Figura 4. 5. Variación de la probabilidad de potencia de FU.



a. UE a 169.4 m de la mBS

b. UE a 97.4 m de la mBS

Figura 4. 6. Variación de la probabilidad de potencia de mU.

El resultado de aplicar IPC sobre este caso de simulación se observa en la figura 4.7; fueron atendidos 98 usuarios, lo cual representa el 37.3% del total de UE dentro del radio de cobertura de la mBS. Este resultado evidencia una disminución en la capacidad total del sistema con respecto al obtenido tras la implementación del modelo basado en GT, pero muestra un aumento en la capacidad con respecto al caso en el que no se aplicó ningún modelo de control de potencia.

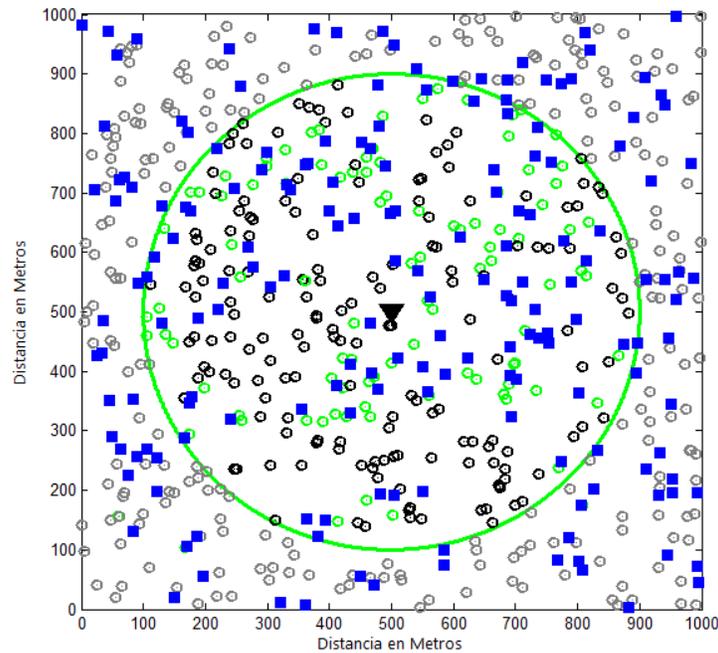


Figura 4. 7. Resultado obtenido con IPC, escenario 1 – voz.

La figura 4.8 muestra la variación de la SINR de cinco UE que se conectaron al sistema, cuatro de ellos asociados a un FAP y uno a la mBS. Se aprecia que durante las primeras iteraciones, las SINR de todos los UE variaron entre -60dB y -10dB aproximadamente, debido a las condiciones iniciales del sistema de comunicaciones, sin embargo, cuando los UE aprendieron cual estrategia les generó la mejor utilidad, la SINR de cada uno alcanzó el umbral establecido para el servicio de voz y se mantuvo en este valor. Se observa que el usuario 25 (rojo) alcanzó la SINR objetivo hasta después de las 200 iteraciones, siendo el que más demoró en alcanzarla, este resultado se debe a que este UE está asociado a la mBS y requiere una potencia más alta para poder superar la interferencia causada por los FU.

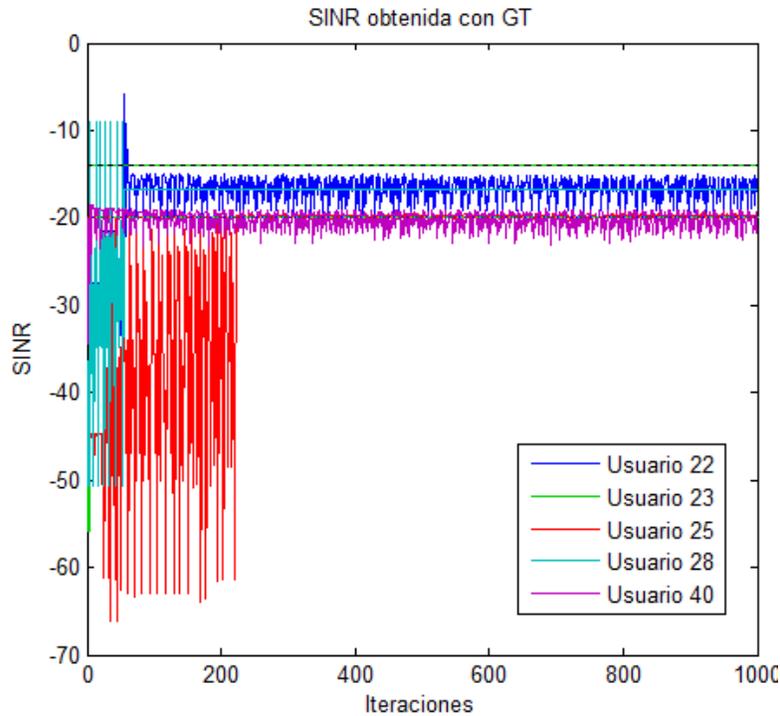


Figura 4. 8. Variación de la SINR de cinco UE.

Las figuras 4.9a y 4.9b muestran la evolución de la probabilidad de degradación del sistema cuando se implementa el modelo basado en GT y el modelo IPC respectivamente. Se aprecia que con la aplicación del algoritmo basado en GT se reduce progresivamente la probabilidad de degradación, alcanzando un valor mínimo de 0.57, más bajo que el obtenido con la aplicación de IPC (0.62). Se observa también que después de las 800 iteraciones la probabilidad de degradación con GT aumenta un poco debido al cambio de las condiciones del sistema.

De acuerdo al tipo de usuario en la red, se registraron en la tabla 4.4 los resultados de capacidad para cada modelo de control de potencia. Es posible observar que los dos modelos atienden el mismo número de FU, esto, debido a que los dos encuentran soluciones de potencia adecuadas para dichos usuarios, sin embargo, los valores de potencia encontrados por el modelo basado en GT son más bajos que los encontrados por IPC (ver apéndice B). Así, al transmitir con menor potencia los FU reducen la interferencia emitida sobre los mU, permitiendo atender más usuarios de este tipo.

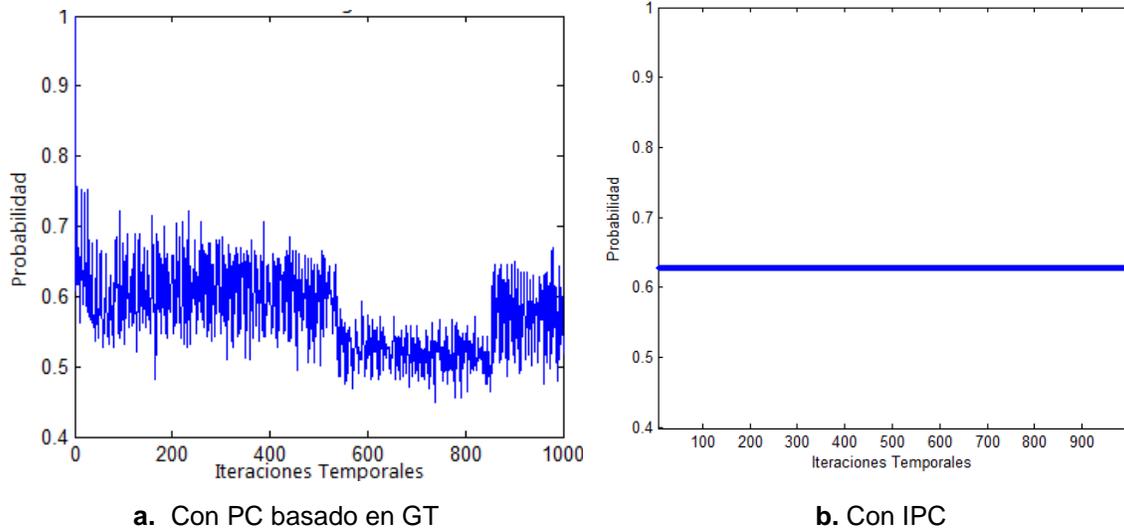


Figura 4. 9. Probabilidad de degradación.

Tabla 4. 4. Capacidad según el tipo de usuario, escenario 1- voz.

| Tipo de UE | Total UE dentro de la microcelda | Total Conectados GT | Total Conectados GT (%) | Total Conectados IPC | Total Conectados IPC (%) |
|--------------|----------------------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------|
| FU | 144 | 97 | 36.88 | 97 | 36.88 |
| mU | 119 | 30 | 11.40 | 1 | 0.38 |
| Total | 263 | 127 | 48.3 | 98 | 37.3 |

Para analizar el impacto que tiene la cantidad de usuarios en la capacidad de la red, se realizaron 10 pruebas reduciendo a 300 el número de UE. En la tabla 4.5 se encuentran registrados los resultados obtenidos. Se aprecia que el promedio de capacidad obtenido con GT es de 57.19% y con IPC de 40.5%, ambos valores superiores a los obtenidos en las pruebas ejecutadas con 500 UE, lo que indica que al reducir el número de usuarios en el escenario, disminuye también el nivel de interferencia permitiendo a los algoritmos y en especial al modelo basado en GT encontrar mejores soluciones de potencia e incrementar la capacidad.

Tabla 4. 5. Resultados obtenidos, escenario 1 - voz - 300 Usuarios.

| Prueba No | Total Usuarios | Usuarios Atendidos con GT | Usuarios Atendidos con GT (%) | Usuarios Atendidos con IPC | Usuarios Atendidos con IPC (%) |
|-----------|----------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 1 | 160 | 94 | 58,750 | 65 | 40,625 |
| 2 | 152 | 86 | 56,578 | 54 | 35,526 |
| 3 | 152 | 84 | 55,263 | 58 | 38,157 |

| | | | | | |
|-----------------------|-----|------|--------|------|--------|
| 4 | 138 | 79 | 57,246 | 62 | 44,927 |
| 5 | 152 | 97 | 63,815 | 59 | 38,815 |
| 6 | 143 | 82 | 57,342 | 61 | 42,657 |
| 7 | 166 | 96 | 57,831 | 69 | 41,566 |
| 8 | 160 | 81 | 50,625 | 70 | 43,75 |
| 9 | 149 | 89 | 59,731 | 57 | 38,255 |
| 10 | 157 | 86 | 54,777 | 64 | 40,764 |
| Promedio Total | | 87,4 | 57,196 | 61,9 | 40,50 |

- **Caso 2: datos**

En este caso el requerimiento de SINR aumenta a -14dB . Al realizar las simulaciones de la red heterogénea sin aplicar ningún proceso de control de potencia, se obtuvo una capacidad promedio de $16,98\%$, un valor muy cercano al obtenido en el caso 1.

Después de implementar el modelo de control de potencia basado en GT, se obtuvo el resultado de la figura 4.10, en donde los círculos negros representan los usuarios que no alcanzaron la SINR objetivo mientras que los círculos rojos corresponden a los usuarios que fueron atendidos satisfactoriamente por la red.

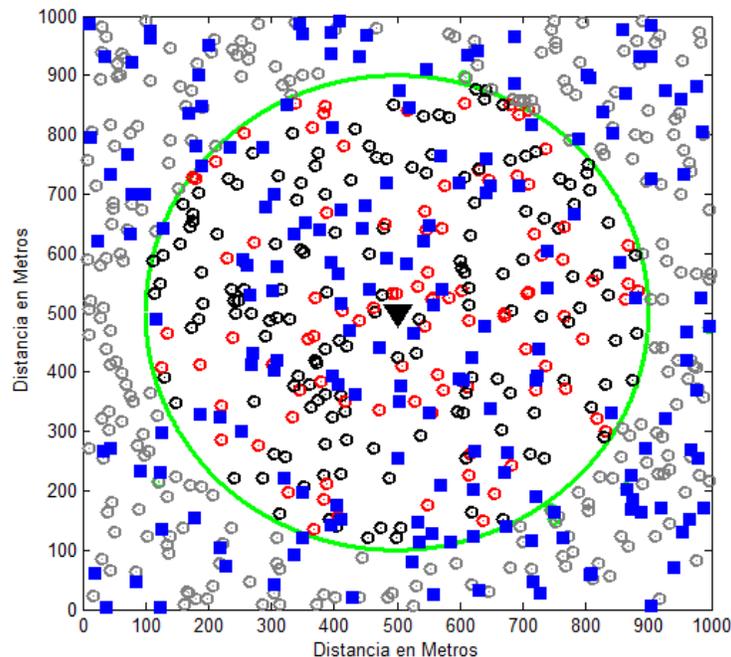


Figura 4. 10. Resultado obtenido con GT, escenario 1 – datos.

Los resultados evidenciaron una disminución de la capacidad de la red con respecto al caso 1, dado que de un total de 244 usuarios al interior de la microcelda, solo el 40.57% alcanzó un nivel satisfactorio de SINR, no obstante, esta capacidad aumenta, al compararla con el caso en el que no se aplica ningún tipo de control de potencia.

En la figura 4.11a se observa la variación de la probabilidad de potencia de un usuario localizado a 112,2 m de la mBS. Durante las primeras iteraciones este selecciona diferentes potencias que dan como resultado bajos niveles de SINR, luego el algoritmo le asigna la máxima potencia permitida (34dBm), sin embargo, la SINR obtenida se encuentra por encima del umbral, como se observa en 4.11b, por esto la probabilidad de dicha potencia disminuye y se aumenta la probabilidad de las demás para encontrar una potencia adecuada. Después de 150 iteraciones el UE escoge transmitir con 25dBm, potencia que le garantiza que la SINR se encuentre dentro del rango permitido.

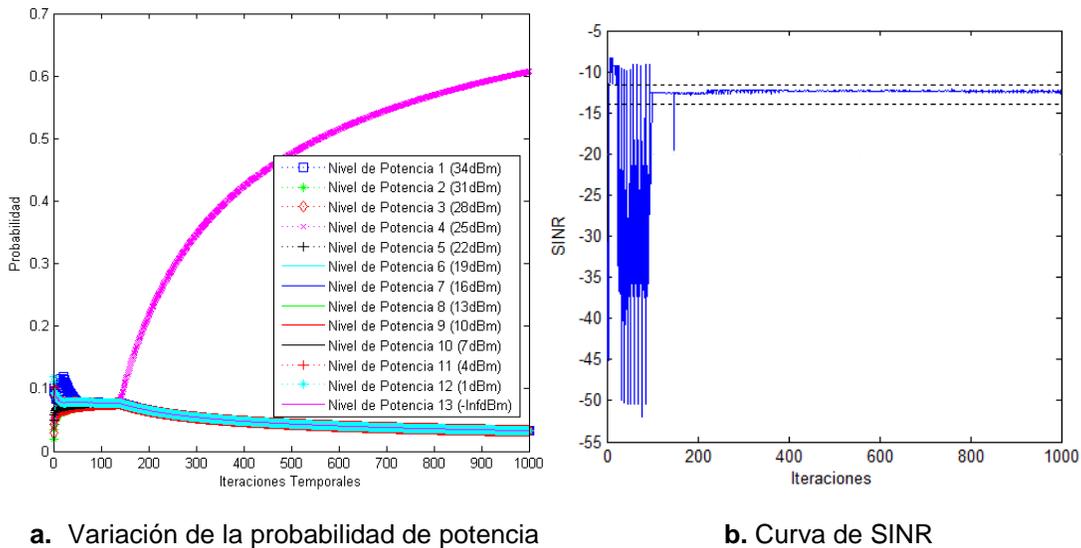
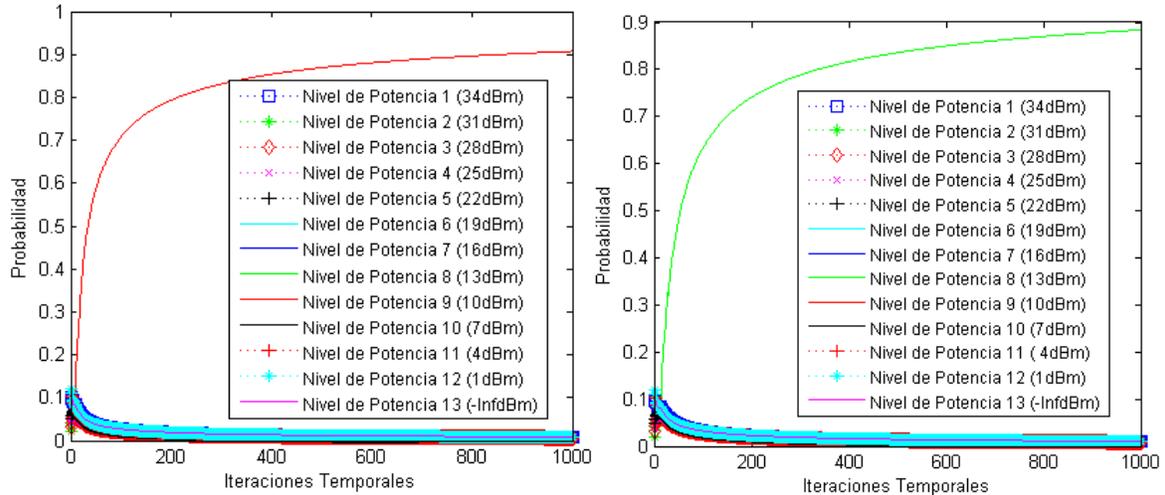


Figura 4. 11. Resultados de un mU a 112.2 m de la mBS.

La variación de la probabilidad de potencia de dos FU se muestra en las figuras 4.12a y 4.12b, respectivamente. Al comparar estas figuras, se observa que el UE que se encuentra a 22.4 m de su FAP necesitó una menor potencia (10dBm) para conectarse al sistema que el UE que se ubicó a 38.7 m (13dBm), lo que indica que el algoritmo evita un consumo innecesario de la potencia de transmisión por parte de los UE que se encuentran cerca de su FAP.



a. UE a 22.4 m de un FAP

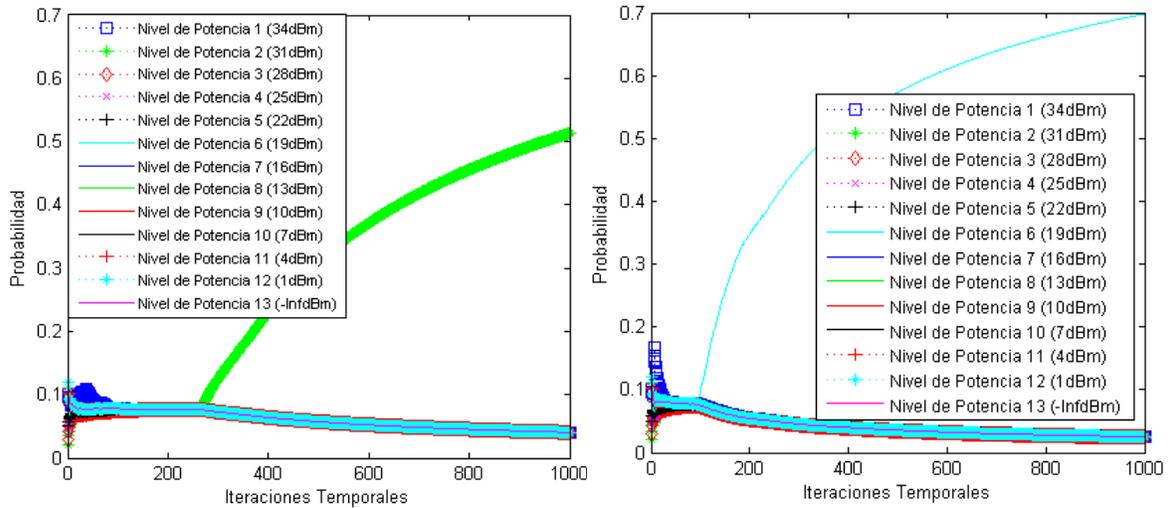
b. UE a 38.7 m de un FAP

Figura 4. 12. Variación de la probabilidad de potencia de dos FU.

Comparando las figuras 4.12a y 4.5b, se nota que a pesar de que ambos UE se encuentran aproximadamente a la misma distancia de un FAP, el UE que accedió al servicio de voz requirió una potencia menor (7dBm) que el UE que se conectó con datos (10dBm), lo que demuestra que el requerimiento de SINR influye en la elección de la potencia de transmisión. Por esta razón el nivel de interferencia en este caso aumentó, disminuyendo la capacidad del sistema en comparación con el resultado obtenido en el caso 1.

En las figuras 4.13a y 4.13b se muestran las curvas de variación de la probabilidad de potencia para dos mU ubicados a 122.7 m y 78.3 m de la mBS, respectivamente. Este resultado indica que el algoritmo de PC basado en GT asigna dinámicamente las potencias de transmisión en función de la distancia de los usuarios a su estación base, de manera que los UE que se encuentran cerca de la mBS transmiten con menos potencia que los más lejanos.

En la figura 4.14 se presenta las curvas de SINR de 5 usuarios. Solo los usuarios 24 y 55 obtuvieron una SINR dentro del rango permitido. La SINR del resto de usuarios se mantuvo cerca de los valores umbrales, sin embargo ninguno pudo alcanzarlos debido a que el valor de potencia requerido no se encontraba dentro de los niveles que dispone el algoritmo.



a. UE a 122.7 m de la mBS

b. UE a 78.3 m de la mBS

Figura 4. 13. Variación de la probabilidad de potencia de dos mU.

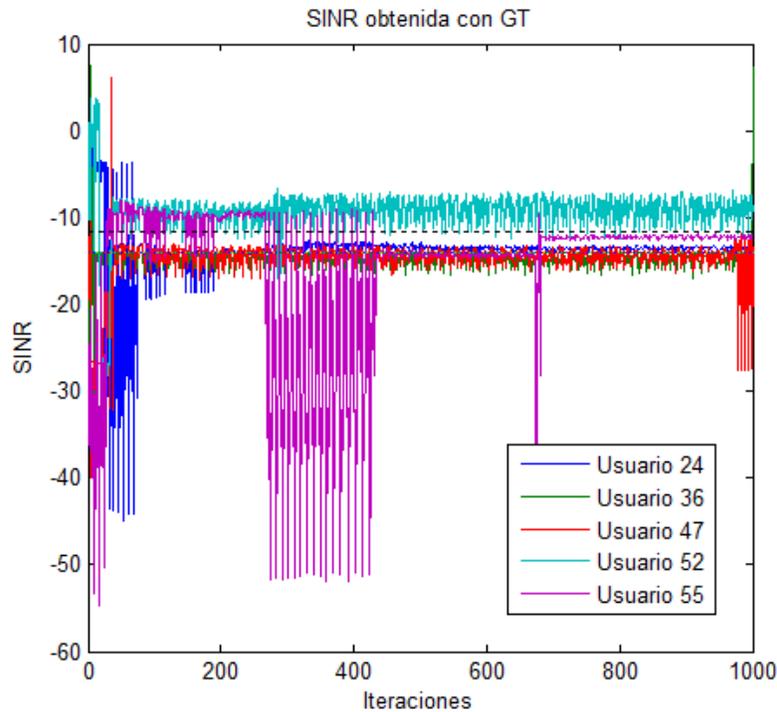


Figura 4. 14. Variación de la SINR de cinco UE.

La implementación del modelo IPC sobre este caso de simulación arroja como resultado 79 UE atendidos, lo que representa el 32.37% del total de UE al interior de la microcelda; el escenario resultante se muestra en la figura 4.15. Comparando este resultado con el obtenido al aplicar el algoritmo de PC basado en GT, se observa que la capacidad del sistema aumentó 8% cuando se

implementó GT como mecanismo de PC, debido a que este algoritmo consiguió una mayor reducción en el nivel de interferencia del sistema.

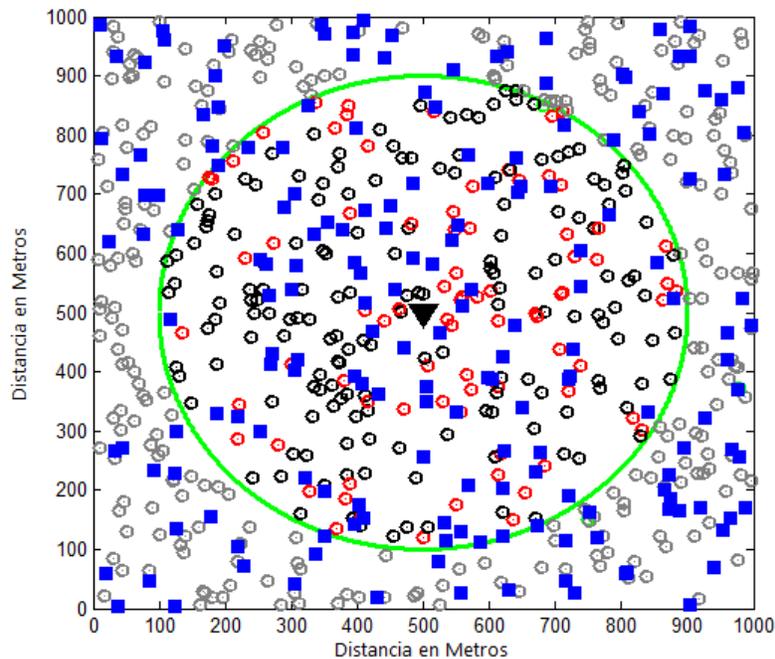


Figura 4. 15. Resultado obtenido con IPC, escenario 1 – datos.

La probabilidad de degradación en la microcelda para los dos algoritmos de control de potencia, se observa en las figuras 4.16a y 4.16b. Comparando la curva de probabilidad de degradación obtenida con GT en este caso y la misma curva obtenida en el caso 1, se evidencia una disminución en la capacidad del sistema, sin embargo, para este caso de simulación, el algoritmo de GT proporcionó un aumento en la capacidad en relación con el algoritmo de IPC.

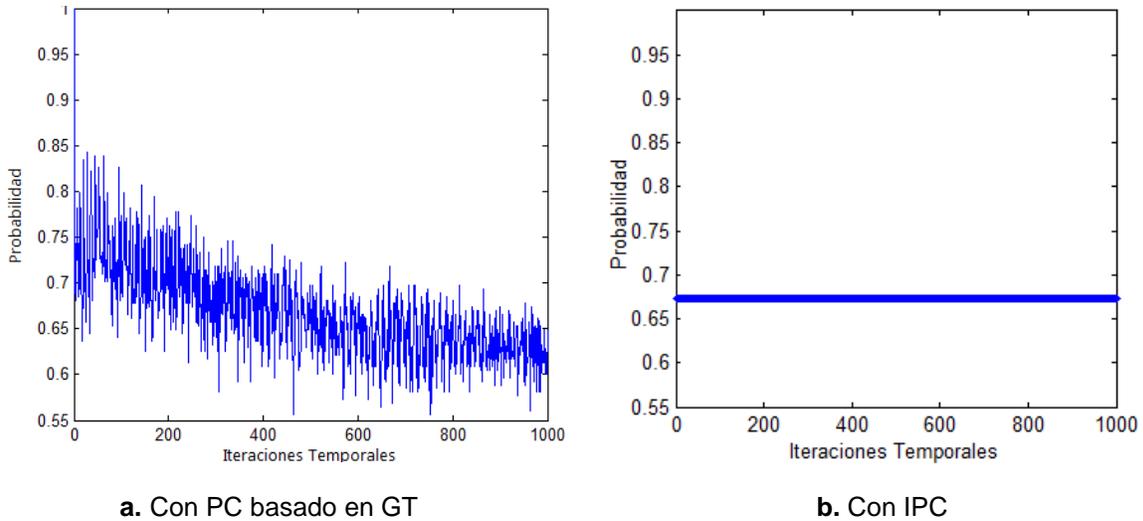


Figura 4. 16. Probabilidad de degradación.

En la tabla 4.6 se encuentran registrados los resultados de capacidad de los dos modelos de PC de acuerdo al tipo de usuario en la red. Como ocurrió en el caso 1, los dos modelos atendieron el mismo número de FU, sin embargo, las soluciones de potencia encontradas por el modelo de PC basado en GT son menores que las encontradas por IPC (ver apéndice B). Así, al transmitir con menor potencia los FU reducen la interferencia emitida sobre los mU, permitiendo atender más usuarios de este tipo.

Tabla 4. 6. Capacidad según el tipo de usuario, escenario 1 – datos.

| Tipo de UE | Total UE dentro de la microcelda | Total Conectados GT | Total Conectados GT (%) | Total Conectados IPC | Total Conectados IPC (%) |
|--------------|----------------------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------|
| FU | 142 | 79 | 32.37 | 79 | 32.37 |
| mU | 102 | 20 | 8.19 | 0 | 0 |
| Total | 244 | 99 | 40.57 | 79 | 32.37 |

Al igual que en el caso 1, se realizaron 10 pruebas reduciendo el número de usuarios a 300. En la tabla 4.7 se observa que el porcentaje promedio de capacidad obtenido con GT es del 45,3% y con IPC es de 38,27%, ambos valores superan a los obtenidos en las pruebas ejecutadas con 500 usuarios, lo que indica que la disminución de UE implicó una reducción del nivel de interferencia, permitiendo a los algoritmos encontrar mejores soluciones de potencia e incrementar la capacidad.

Tabla 4. 7. Resultados obtenidos, escenario 1 - datos - 300 Usuarios.

| Prueba No | Total Usuarios | Usuarios Atendidos con GT | Usuarios Atendidos con GT (%) | Usuarios Atendidos con IPC | Usuarios Atendidos con IPC (%) |
|-----------------------|----------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 1 | 138 | 73 | 52,898 | 61 | 44,202 |
| 2 | 149 | 76 | 51,006 | 62 | 41,610 |
| 3 | 149 | 75 | 50,335 | 67 | 44,966 |
| 4 | 162 | 58 | 35,802 | 49 | 30,246 |
| 5 | 150 | 79 | 52,666 | 63 | 42 |
| 6 | 137 | 59 | 43,065 | 45 | 32,846 |
| 7 | 141 | 64 | 45,390 | 56 | 39,716 |
| 8 | 140 | 53 | 37,857 | 42 | 30 |
| 9 | 152 | 69 | 45,098 | 69 | 45,098 |
| 10 | 162 | 63 | 38,888 | 52 | 32,098 |
| Promedio Total | | 66,9 | 45,3 | 56,6 | 38,278 |

- **Caso 3: voz y datos**

En este caso de simulación el sistema ofreció los servicios de voz y datos simultáneamente, de manera que a cada UE se le asignó de forma aleatoria un requerimiento de SINR; -20dB para voz o -14dB para datos. Sin control de potencia la capacidad promedio fue de 20,52%.

El resultado obtenido con la implementación del modelo basado en GT se presenta en la figura 4.17, en la cual, los círculos de color verde representan los UE que accedieron al servicio de voz y los de color rojo, los UE que se conectaron con el servicio de datos. El total de UE conectados fue de 118, de los cuales, 56 se conectaron con voz y 62 con datos, sin embargo, en la mayoría de las pruebas realizadas el número de usuarios atendidos con el servicio de voz superó a los atendidos con el servicio de datos. Esto, debido a que a los usuarios con el servicio de voz se les facilita encontrar una potencia de transmisión adecuada al tener una SINR objetivo más baja.

La capacidad resultante fue de 45.38%, al incluir en el escenario usuarios con un requerimiento de SINR alto, la capacidad disminuye en comparación con el caso 1, debido a que los usuarios conectados con el servicio de datos deben transmitir con potencias más altas e incrementan el nivel de interferencia de la red.

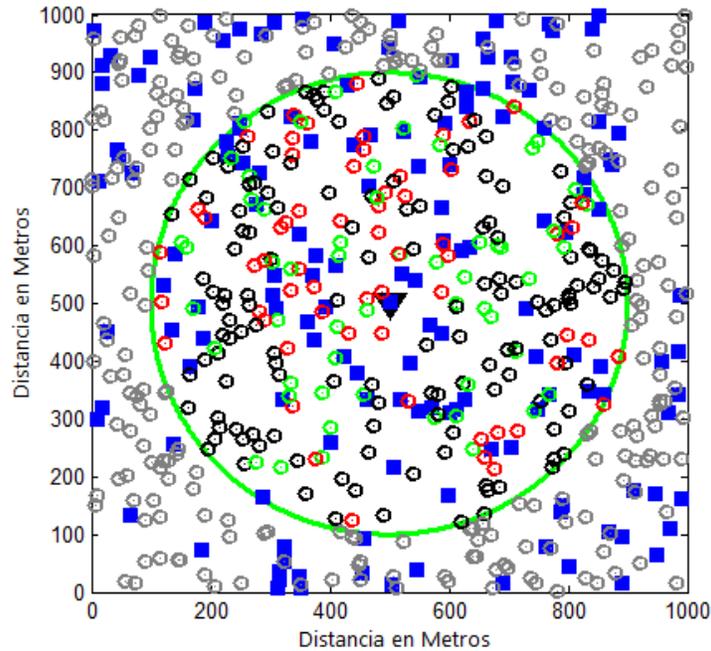


Figura 4. 17. Resultado obtenido con GT, escenario 1 – voz y datos.

Las figuras 4.18a y 4.18b muestran la variación de la probabilidad de potencia de dos FU, el primero se encuentra a 13.6 m y se conecta con voz y el segundo está ubicado a 15.8 m del FAP y accede al servicio de datos. Al comparar las figuras, se aprecia que aunque los dos UE se encuentran casi a la misma distancia del FAP, el UE que accedió al servicio de voz requirió una potencia de transmisión de 1dBm, menor que la potencia utilizada por el UE que accedió al servicio de datos, que fue de 7dBm.

Las curvas de variación de la probabilidad de potencia de dos mU se presentan en las figuras 4.19a y 4.19b. El UE ubicado a 80 m de la mBS requirió de una potencia igual a 22dBm para conectarse al sistema, mientras que uno ubicado a 105 m necesitó de 31dBm, lo que indica que el algoritmo de PC basado en GT, independientemente del servicio al cual desea acceder el UE, permite un consumo eficiente de su batería, ya que garantiza que este transmita con la menor potencia posible.

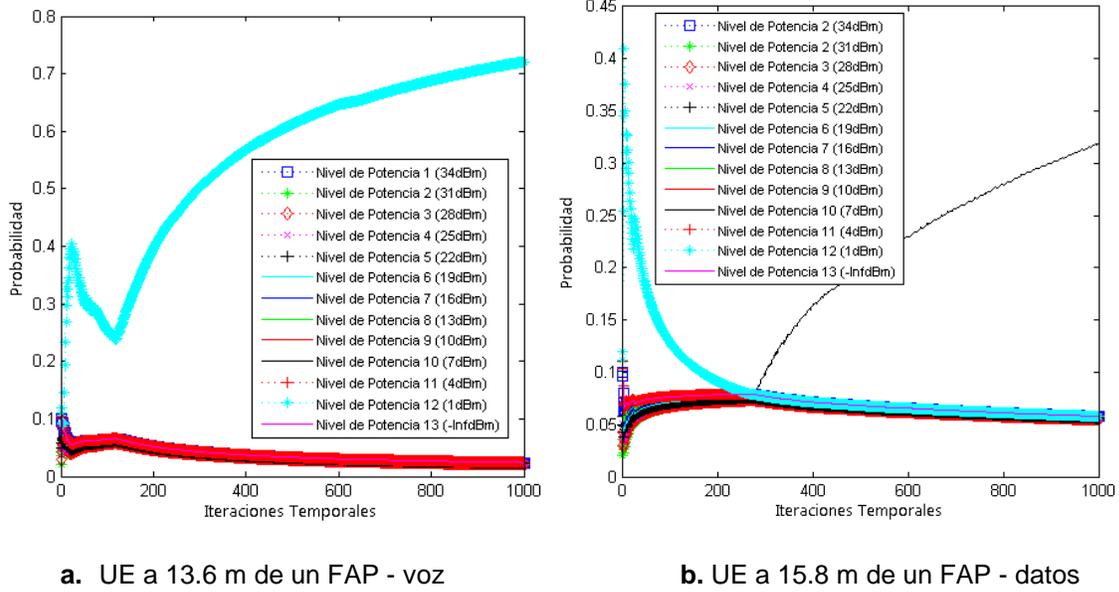


Figura 4. 18. Variación de la probabilidad de potencia de dos FU.

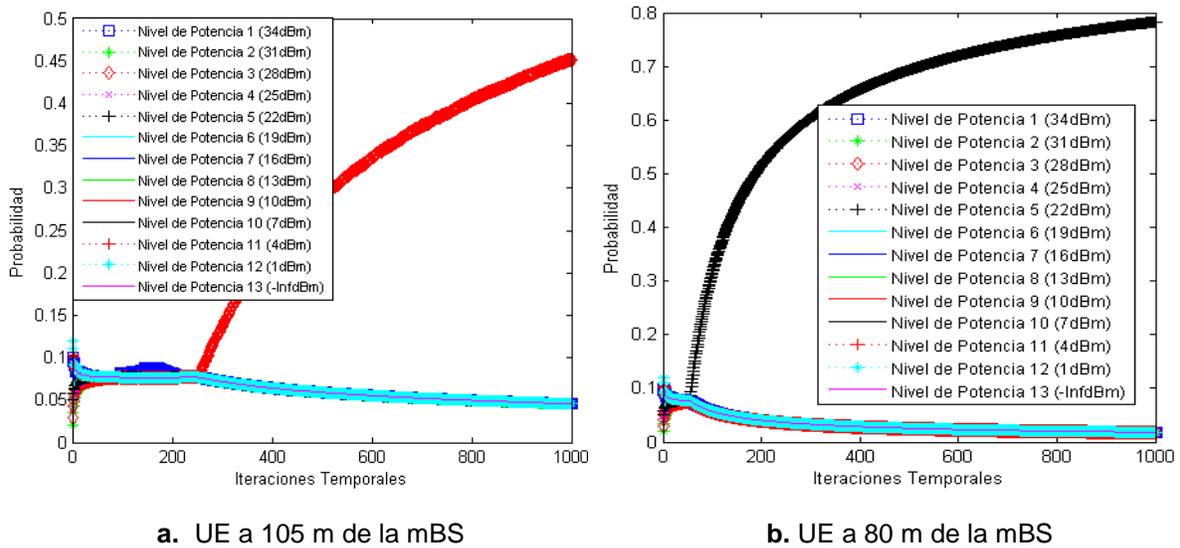


Figura 4. 19. Variación de la probabilidad de potencia de dos mU.

Las curvas de SINR obtenidas para cuatro UE atendidos se muestran en la figura 4.20, tres de ellos con el servicio de voz y uno con el servicio de datos. Se aprecia que la SINR de los UE, durante las primeras iteraciones, varió en un rango de -50dB a 0dB debido a las condiciones iniciales del sistema de comunicaciones, sin embargo en la iteración 50 la SINR de cada uno, alcanzó el umbral establecido para el servicio correspondiente y se mantuvo en este valor. Se observa que las

fluctuaciones son menores para el usuario que accedió con el servicio de datos (rojo) gracias a que se encontraba ubicado a poca distancia de su FAP y encontró más rápido una potencia que le permitió superar el nivel de interferencia causado por los demás usuarios.

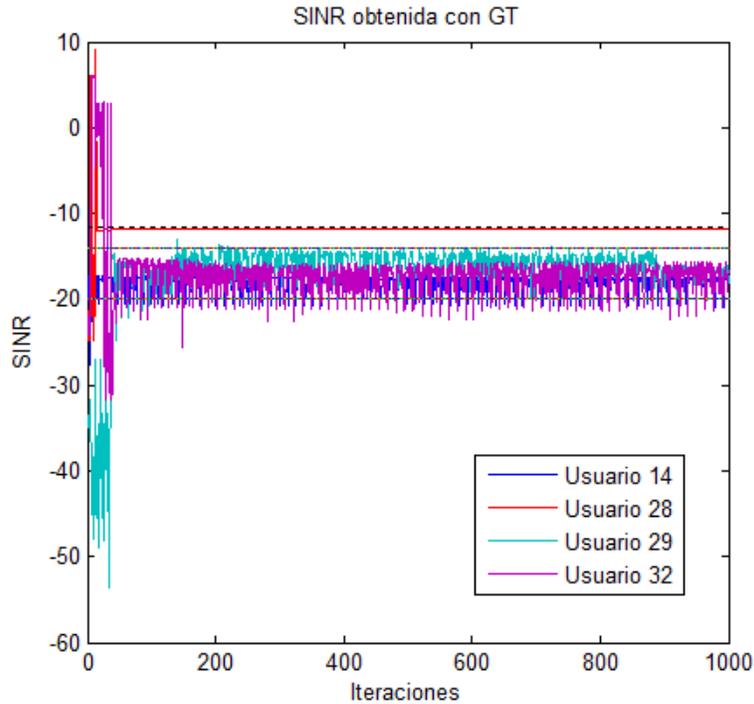


Figura 4. 20. Variación de la SINR de cuatro UE.

En la figura 4.21 se muestra el resultado obtenido al aplicar IPC, en este caso se atendieron 96 usuarios, es decir, 36.92% del total de UE al interior de la microcelda; de estos usuarios, 42 se conectaron con voz y 54 con datos. El porcentaje de UE conectados disminuyó 8.46% en relación al porcentaje obtenido tras la aplicación del modelo basado en GT. La disminución de la capacidad del sistema, se hace evidente en las figuras 4.22a y 4.22b, en las cuales se observa que la curva de probabilidad de degradación del sistema cuando se aplica GT decrece rápidamente hasta estabilizarse en un valor por debajo de 0.51, mientras que con IPC se mantiene constante en 0.64.

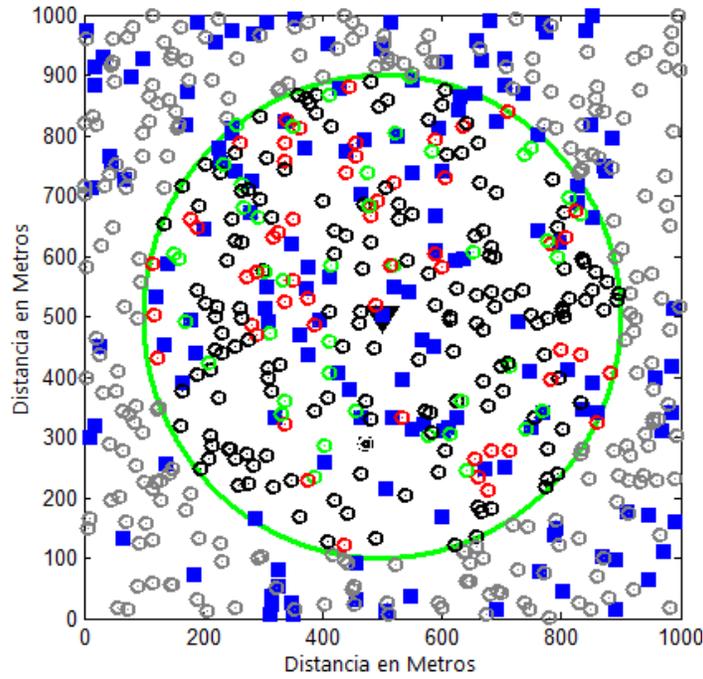


Figura 4. 21. Resultado obtenido con IPC, escenario 1 – voz y datos.

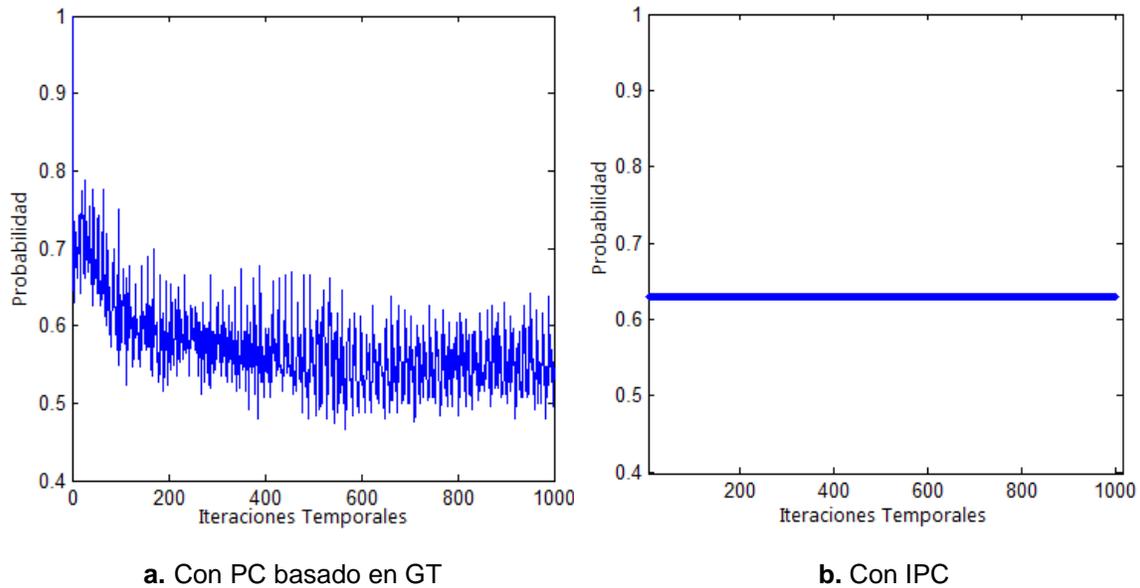


Figura 4. 22. Probabilidad de degradación.

Los resultados de la capacidad obtenida al aplicar los dos algoritmos de PC, de acuerdo al tipo de usuario, se presentan en la tabla 4.8. Tanto el modelo basado en GT como el modelo IPC permitió a la red atender un total de 95 FU, para entender este comportamiento se revisaron las soluciones de potencia de cada

modelo y se observó que el modelo basado en GT encontró potencias de transmisión más bajas que el modelo IPC. Es por esto que con GT, los FU reducen su nivel de interferencia permitiendo a más mU obtener la SINR requerida y ser atendidos satisfactoriamente.

Tabla 4. 8. Capacidad según el tipo de usuario, escenario 1 – voz y datos.

| Tipo de UE | Total UE dentro de la microcelda | Total Conectados GT | Total Conectados GT (%) | Total Conectados IPC | Total Conectados IPC (%) |
|--------------|----------------------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------|
| FU | 137 | 95 | 36.538 | 95 | 36.538 |
| mU | 123 | 23 | 8.846 | 1 | 0.384 |
| Total | 260 | 118 | 45.384 | 96 | 36.923 |

4.2.4.2. Escenario 2: 200 metros

La figura 4.23 ilustra el escenario de simulación 2, donde el radio de la microcelda se disminuyó a 200 metros, con el objetivo de analizar cómo cambia la capacidad de la red con esta modificación.

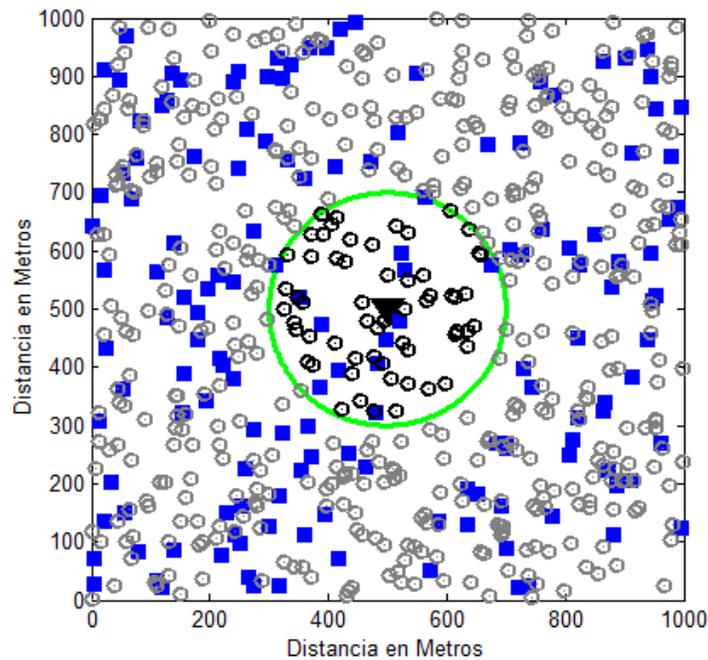


Figura 4. 23. Segundo escenario de simulación.

- **Caso 1: voz**

Las simulaciones realizadas sin control de potencia dieron como resultado una capacidad promedio de 22.9%.

En la figura 4.24 se muestra el escenario obtenido al aplicar el modelo basado en GT. De 73 usuarios al interior de la microcelda son atendidos satisfactoriamente (verdes) 54 UE, lo que equivale a un 73.97%. Este valor de capacidad es superior en un 51.07% al obtenido sin aplicar control de potencia y al resultado del escenario 1 en un 25.67%, confirmando que la implementación de un esquema de PC reduce el nivel de interferencia permitiendo atender más usuarios y que la reducción del tamaño de una celda aumenta la capacidad de la misma.

La variación de la probabilidad de potencia de un usuario que se encuentra a 26.56 m de su FAP se muestra en la figura 4.25a. Inicialmente la probabilidad asociada al nivel de potencia 12, es decir 1dBm, empieza a crecer rápidamente, sin embargo después de la iteración 35 decrece debido al cambio de las condiciones del sistema, disminuyendo también su SINR, como se observa en la figura 4.25b. Después de la iteración 150 el sistema cambia de nuevo, y aumenta la probabilidad de esta potencia, con la cual alcanza la SINR requerida.

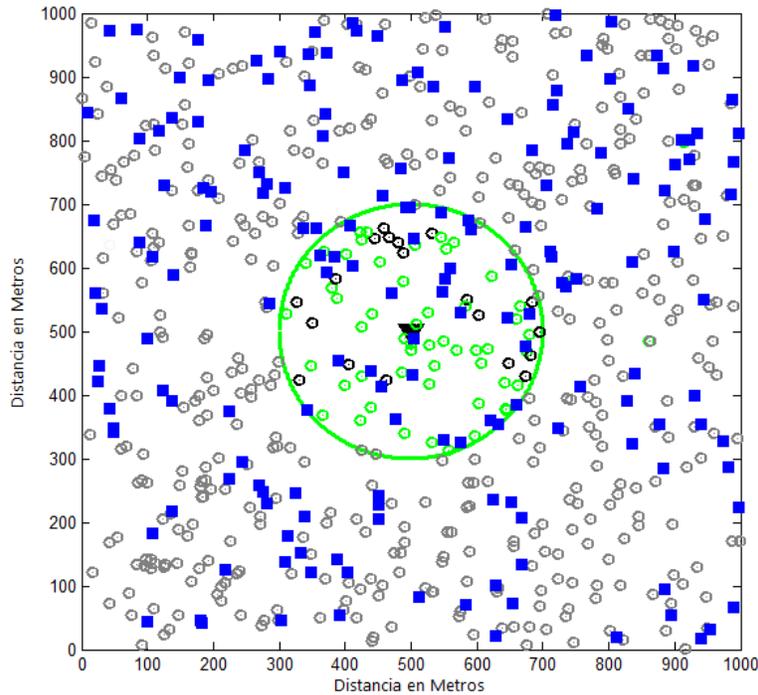


Figura 4. 24. Resultado obtenido con GT, escenario 2 – voz.

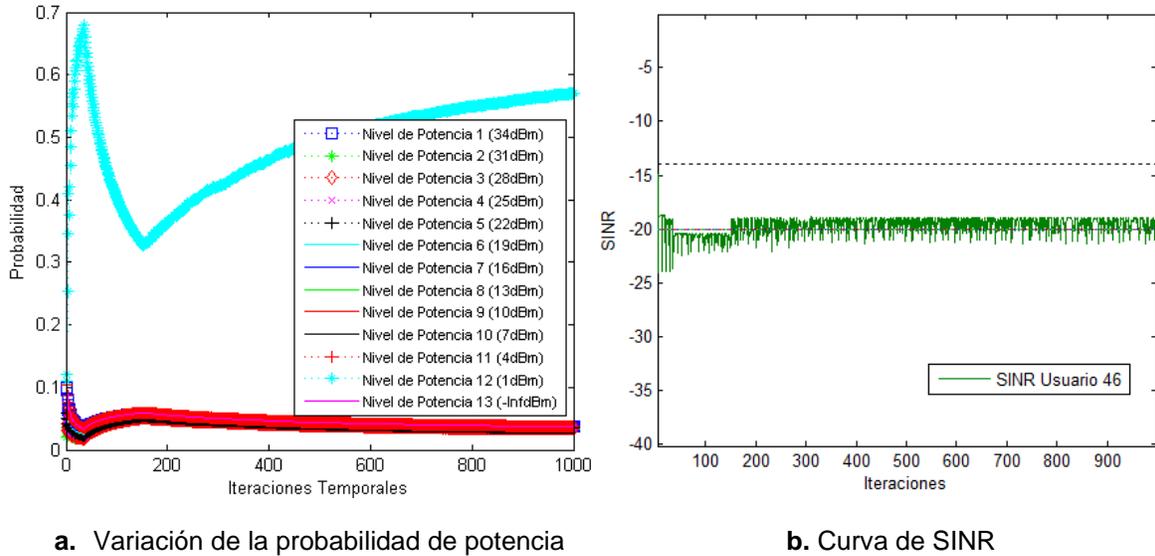


Figura 4. 25. Resultados de un FU a 26,56 m de un FAP.

En las figuras 4.26a y 4.26b se muestran las curvas de variación de probabilidad de potencia, para dos UE ubicados a 19,6 m y a 32,2 m de su FAP. Se observa que, al igual que en los casos del escenario 1, el FU ubicado más cerca del FAP necesitó de una menor potencia para conectarse que el FU más lejano.

En el caso 2 del escenario 1 se muestra un UE ubicado a 22.4 m de un FAP que utilizó una potencia de 10dBm para conectarse, mientras que para este caso, uno ubicado a 19.6 m de su FAP empleó una potencia de 4dBm, lo cual indica que al tener celdas con menor radio de cobertura, los UE requieren menor potencia de transmisión para conectarse, debido a que la interferencia al interior de la celda es menor.

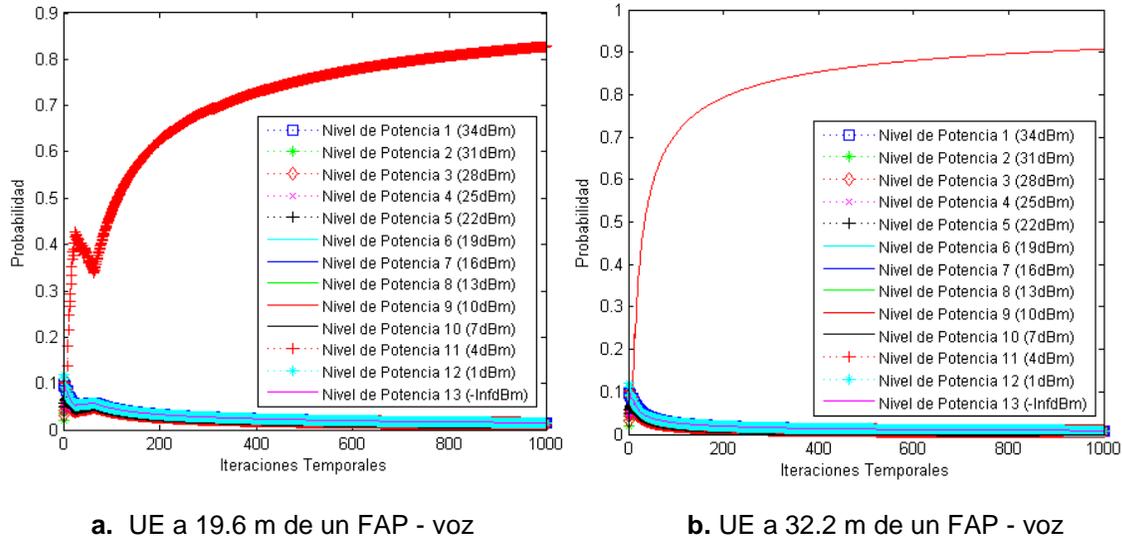


Figura 4. 26. Variación de la probabilidad de potencia.

Las curvas de SINR obtenidas para cinco UE conectados se muestran en la figura 4.27. La mayoría de los UE tardaron aproximadamente 150 iteraciones en aprender la estrategia que les generó una utilidad dentro de los límites establecidos por el requerimiento de SINR y el índice de tolerancia a la interferencia del sistema. El UE 19 mantuvo su SINR por debajo del objetivo durante 550 iteraciones aproximadamente, luego tardó 30 iteraciones en encontrar una potencia de transmisión que le permitiera establecer la SINR por encima del umbral. Adicionalmente, en este caso las curvas presentan una menor fluctuación que las gráficas del escenario 1.

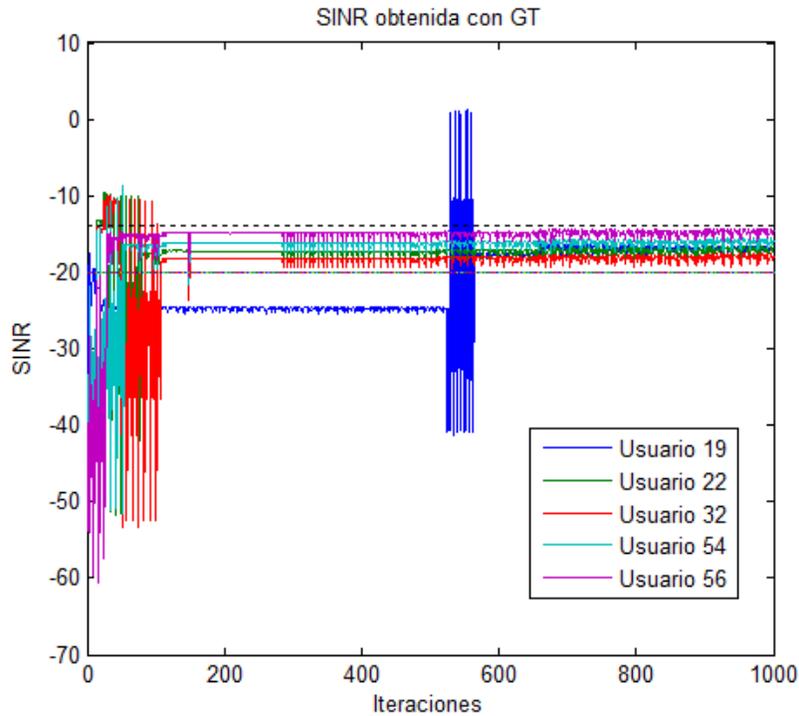


Figura 4. 27. Variación de la SINR de cuatro UE

Con la aplicación del Control Ideal de Potencia se obtuvieron 41 UE conectados, como se observa en la figura 4.28. Comparando este resultado con el obtenido al implementar el algoritmo de PC basado en GT se evidencia una disminución de la capacidad del 17.81%, sin embargo esta aumenta en un 18.86% si se compara con el valor obtenido al aplicar IPC en el caso 1 del escenario 1.

Dicha disminución en la capacidad también se aprecia en las curvas de probabilidad de degradación de las figuras 4.29a y 4.29b, obtenidas para GT e IPC, en donde se observa que la curva de GT tiende a valores cercanos a 0.2 a diferencia de la curva de IPC, la cual se mantiene constante en un valor de 0.44.

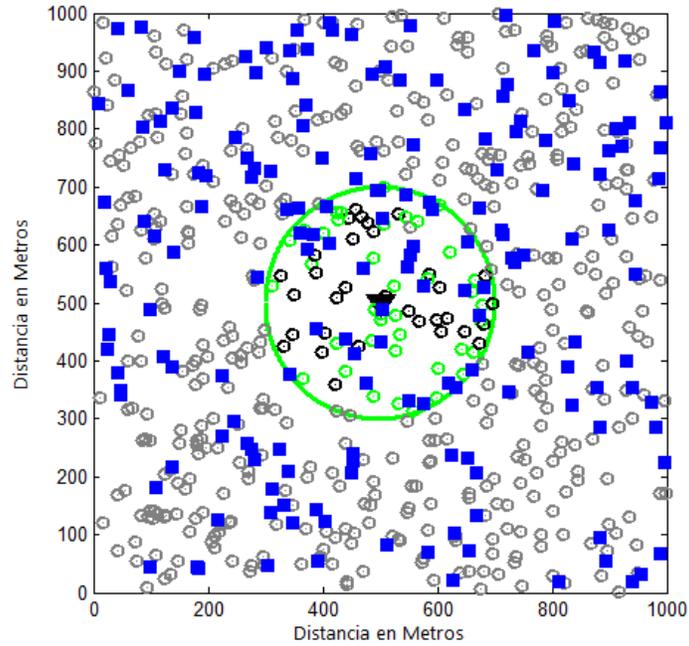


Figura 4. 28. Resultado obtenido con IPC, escenario 2 – voz.

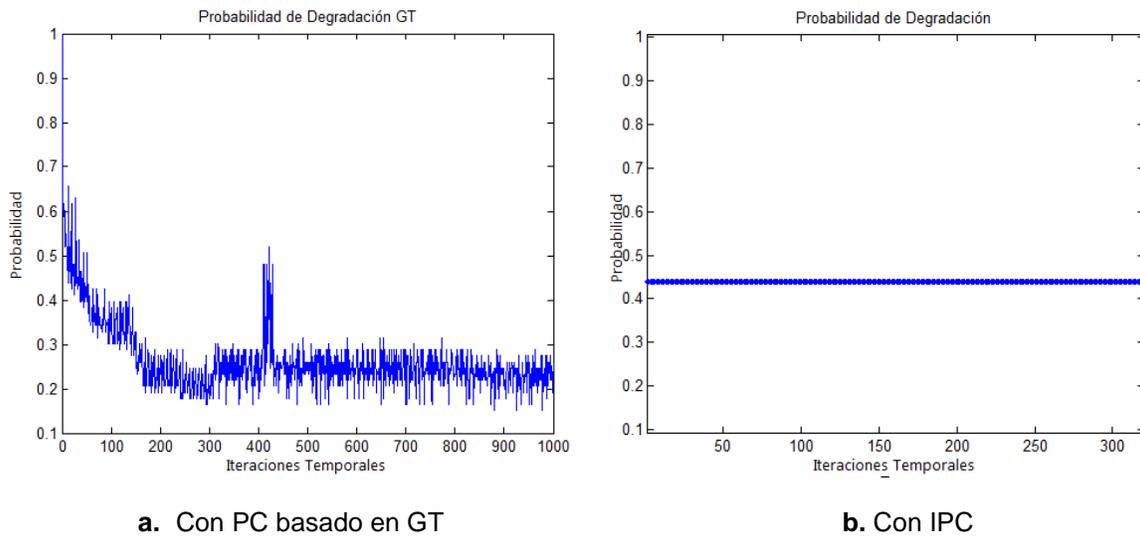


Figura 4. 29. Probabilidad de degradación.

De acuerdo a los tipos de usuario existentes en la red, en la tabla 4.9 se registran los resultados de capacidad obtenidos aplicando los dos modelos de control de potencia. Al igual que en el primer escenario, los dos modelos atienden satisfactoriamente el mismo número de FU, sin embargo la diferencia entre estos radica en el número de mU atendidos. Debido a que el modelo basado en GT

encuentra soluciones de potencia para FU más bajas que IPC, estos usuarios reducen la interferencia producida sobre los mU permitiéndole al sistema atender muchos más mU. Adicionalmente las potencias seleccionadas en este caso (ver apéndice B) son menores que en el escenario 1, razón por la cual se reduce la interferencia al interior de la microcelda y por ende aumenta la capacidad.

Tabla 4. 9. Capacidad según el tipo de usuario, escenario 2 – voz.

| Tipo de UE | Total UE dentro de la microcelda | Total Conectados GT | Total Conectados GT (%) | Total Conectados IPC | Total Conectados IPC (%) |
|--------------|----------------------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------|
| FU | 55 | 41 | 56.16 | 41 | 56.16 |
| mU | 18 | 13 | 17.8 | 0 | 0 |
| Total | 73 | 54 | 73.97 | 41 | 56.16 |

- **Caso 2: datos**

Al ejecutar las pruebas sin control de potencia en este caso, se obtuvo un 23.6% de capacidad promedio. Se esperaba que este valor fuera más pequeño que el valor obtenido en el caso anterior, según conceptos teóricos, sin embargo debido a la aleatoriedad del proceso de asignación de potencia los valores promedio obtenidos no reflejan los cambios en los requerimientos de SINR.

Con la implementación del modelo basado en GT, 42 de 67 usuarios localizados al interior de la microcelda alcanzan un nivel satisfactorio de SINR lo que equivale a un 62.68%, como se muestra en la figura 4.30. Haciendo una comparación de este valor con el obtenido en el caso 2 del escenario 1, se observa un incremento en la capacidad del sistema del 22.11%, esto debido a la reducción del nivel de interferencia dentro de la celda al disminuir el tamaño de la misma.

En la figura 4.31a se presenta la curva de variación de la probabilidad de potencia de un UE a 120.7 m de la mBS. Inicialmente la probabilidad asociada a 34dBm es más alta que las demás, sin embargo con este valor la SINR sobrepasa el umbral superior, de manera que dicha probabilidad decrece. Entre las iteraciones 200 y 460 el algoritmo no es capaz de encontrar una potencia adecuada, como se observa en la figura 4.31b. A partir de la iteración 460 el sistema aumenta la probabilidad de la potencia de 28dBm, con la cual alcanza la SINR requerida.

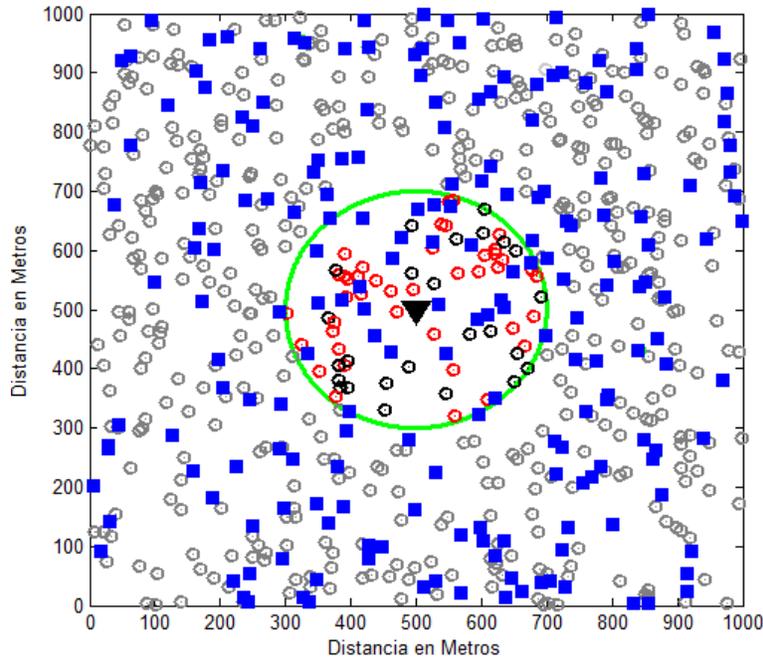
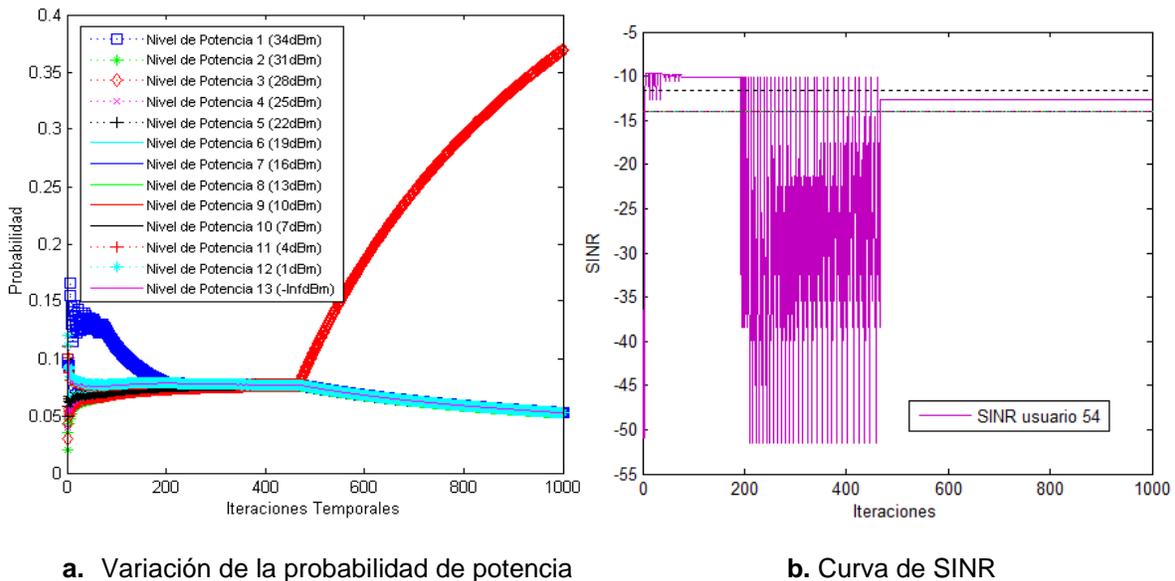


Figura 4. 30. Resultado obtenido con GT, escenario 2 – datos.



a. Variación de la probabilidad de potencia

b. Curva de SINR

Figura 4. 31. Resultados de un UE a 120.7 m de la mBS.

En las figuras 4.32a y 4.32b se muestra la potencia de transmisión escogida por dos usuarios a 75.2 m y 130 m de la mBS, respectivamente. El primero transmite con 19dBm mientras que el segundo lo hace con 25dBm, lo cual evidencia el impacto que tiene la distancia en la selección de la potencia. En el caso 2 del escenario 1, se muestra un UE ubicado a 122 m que transmitió con 31dBm, mientras que en este caso el UE localizado a 130 m transmitió con una potencia

mucho menor, es decir que los UE en este escenario requieren menor potencia de transmisión para conectarse, debido a que la interferencia al interior de la celda es menor.

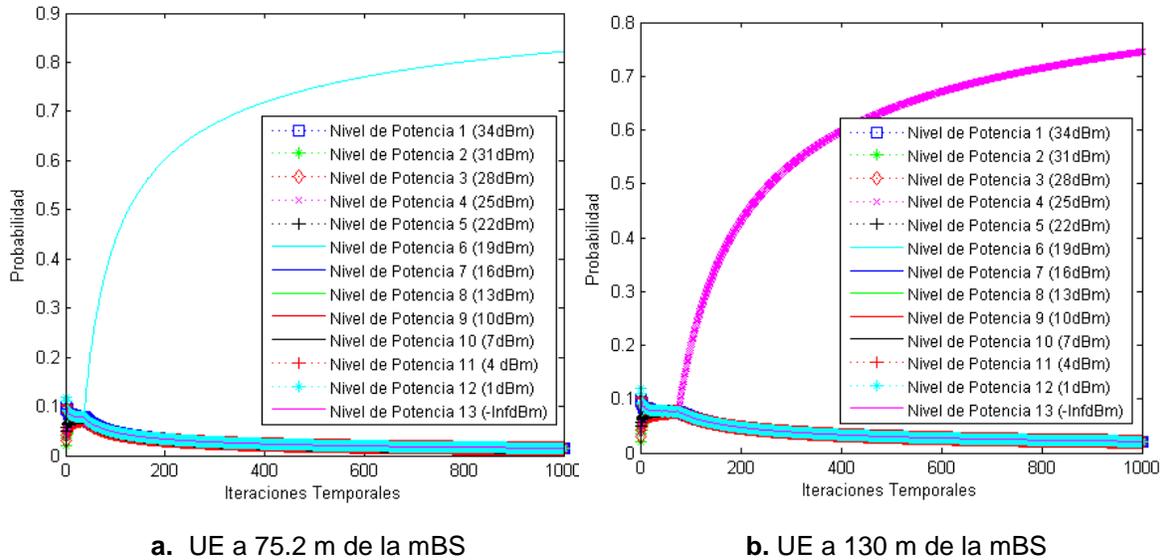


Figura 4. 32. Variación de la probabilidad de potencia de dos mU.

La figura 4.33 muestra la variación de la SINR de cuatro UE que se conectaron al sistema y uno que no logró hacerlo (usuario 120). Se observa que durante las primeras iteraciones la SINR de los UE conectados experimentaron grandes fluctuaciones, pero 3 de ellos lograron converger a un valor por encima del umbral establecido para el servicio de datos en un periodo de tiempo muy corto, mientras que la SINR de otro UE (usuario 55) se mantuvo en un valor por encima del umbral hasta que finalmente en la iteración 760 alcanzó una SINR superior al requerimiento por lo que consiguió conectarse al sistema. La SINR obtenida por el UE que no se conectó al sistema vario entre -20dB y 10dB, esto debido a que la potencia requerida por el usuario para alcanzar la SINR objetivo no se encuentra dentro de los niveles que dispone el algoritmo.

En la figura 4.34 se presenta el escenario obtenido tras la aplicación del modelo IPC, lograron conectarse al servicio de datos 34 UE, lo que equivale a una capacidad del 50.74%. Se observa que la capacidad del sistema disminuyó 11.94% en comparación con la capacidad obtenida al implementar el algoritmo de PC basado en GT, sin embargo, este resultado es mejor que el obtenido al aplicar IPC en la microcelda de 400 m, donde solo se atendió el 32.37% de los usuarios al interior de la celda.

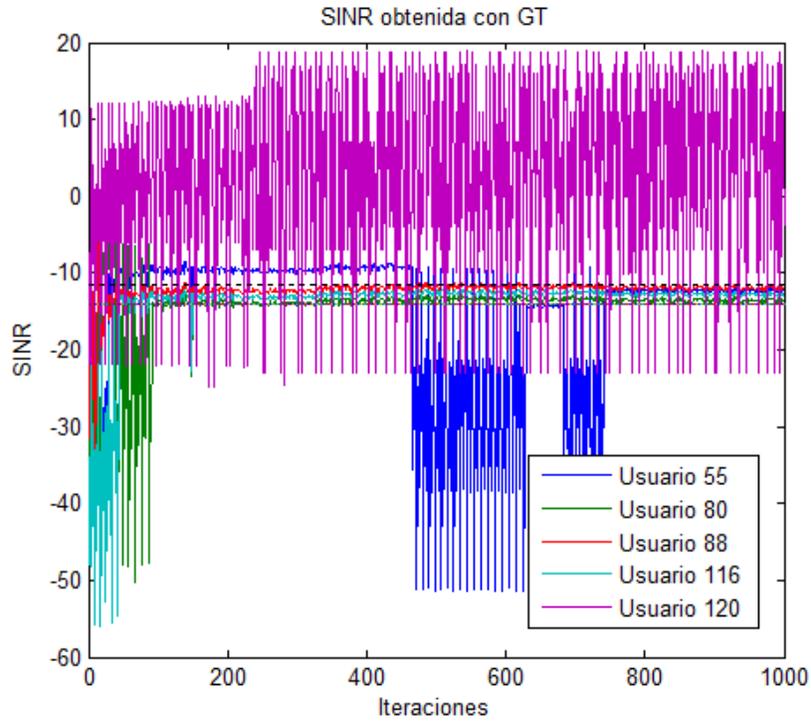


Figura 4. 33. Variación de la SINR de cinco UE.

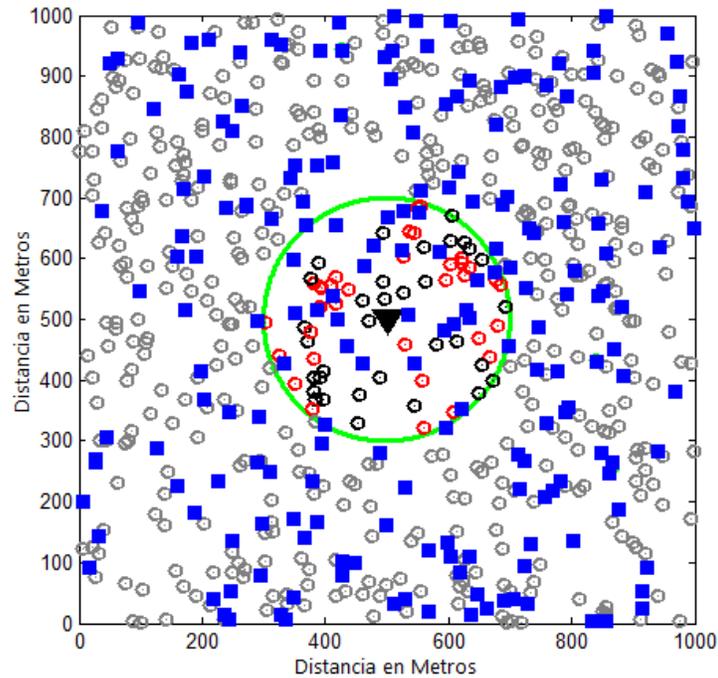


Figura 4. 34. Resultado obtenido con IPC, escenario 2 – datos.

Las figuras 4.35a y 4.35b muestran las curvas de la probabilidad de degradación obtenidas con la aplicación de los dos modelos de PC, ratificando la superioridad

de GT frente a IPC en términos de capacidad. Estas curvas reflejan un deterioro de la capacidad del sistema en comparación a las obtenidas para el caso en que los usuarios accedieron al servicio de voz.

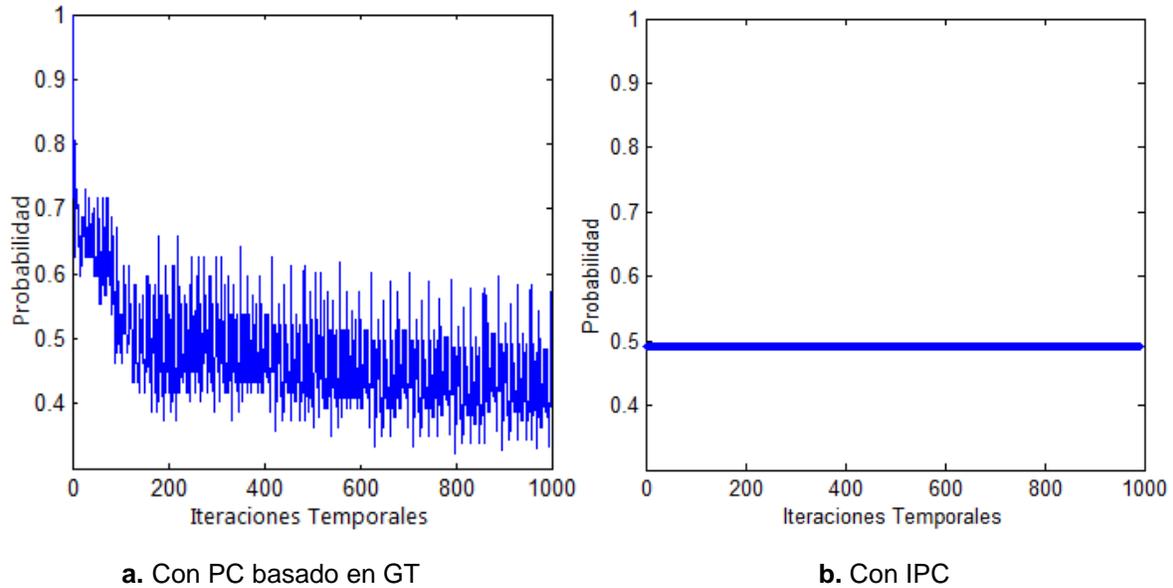


Figura 4. 35. Probabilidad de degradación.

En la tabla 4.10 se presentan los resultados de capacidad de acuerdo a los dos tipos de usuarios existentes en la red. El factor determinante en la capacidad del sistema radica en el número de mU conectados, ya que las potencias asignadas a los FU por el modelo basado en GT son menores a las encontradas por IPC, con lo cual los FU reducen su nivel de interferencia permitiendo a un mayor número de mU ser atendidos.

Tabla 4. 10. Capacidad según el tipo de usuario, escenario 2 – datos.

| Tipo de UE | Total UE dentro de la microcelda | Total Atendidos GT | Total Atendidos GT (%) | Total Atendidos IPC | Total Atendidos IPC (%) |
|--------------|----------------------------------|--------------------|------------------------|---------------------|-------------------------|
| FU | 40 | 31 | 46.26 | 31 | 46.26 |
| mU | 27 | 11 | 16.42 | 3 | 4.47 |
| Total | 67 | 42 | 62.68 | 34 | 50.74 |

- **Caso 3: voz y datos**

La capacidad del sistema sin aplicar ningún mecanismo de control de potencia es de 25.52%. En la figura 4.36 se presenta el escenario obtenido con la implementación del modelo basado en GT, en el cual, el total de UE conectados fue de 40, de los cuales, 24 se conectaron con voz (verdes) y 16 con datos (rojos).

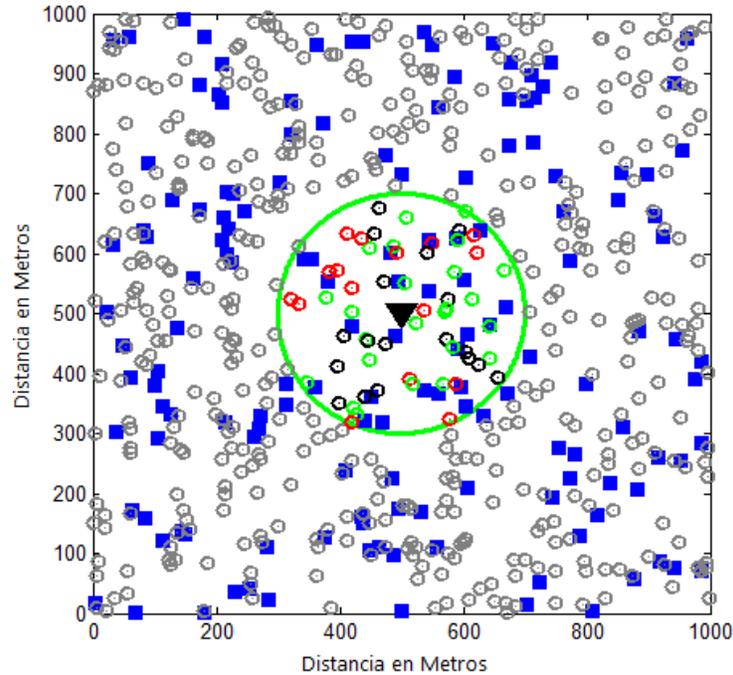


Figura 4. 36. Resultado obtenido con GT, escenario 2 – voz y datos.

El porcentaje de usuarios atendidos es de 68,965%. Al comparar este valor con el obtenido en el caso 3 del primer escenario se evidencia una mejora de 23.58% en la capacidad del sistema, esto debido a que la cantidad de UE presentes en la microcelda es menor lo que reduce la interferencia en esta. La capacidad obtenida en este caso disminuyó un 5% en comparación con el caso donde sólo se ofreció el servicio de voz, mientras que aumentó un 6.28% en comparación con el caso 2, en el cual se ofreció únicamente el servicio de datos.

Las figuras 4.37a y 4.37b muestran la variación de la probabilidad de potencia de dos UE, uno de ellos se ubicó a 80,4 m de la mBS y accedió al servicio de voz, el otro está a una distancia de 72,3 m de la misma y accede al servicio de datos. Estas probabilidades de potencia evidencian el comportamiento del algoritmo, el cual después de pocas iteraciones encuentra la potencia de transmisión que le permite a cada usuario conectarse a su servicio, particularmente, el UE que accedió a datos requirió una potencia de 22dBm, superior a la potencia requerida por el UE que accedió a voz, de 16dBm.

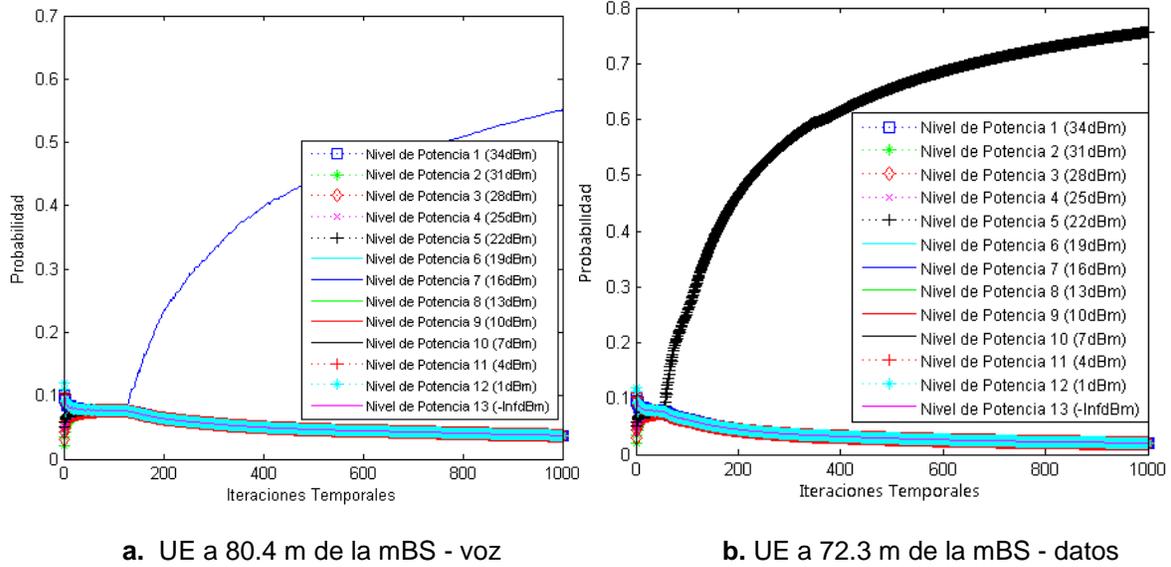


Figura 4. 37. Variación de la probabilidad de potencia de dos mU.

En las figuras 4.38 y 4.39, se muestran los resultados obtenidos para dos UE que se conectaron al mismo servicio pero que están a diferentes distancias de su respectivos FAP. De las curvas de SINR obtenidas para ambos UE se aprecia que el algoritmo estabilizó sus SINR en un valor por encima del umbral, aproximadamente después de las 10 iteraciones. Además al comparar las curvas de variación de la probabilidad de potencia, se observa que el UE más lejano requirió una potencia de transmisión más alta que el UE más cercano a la MBS.

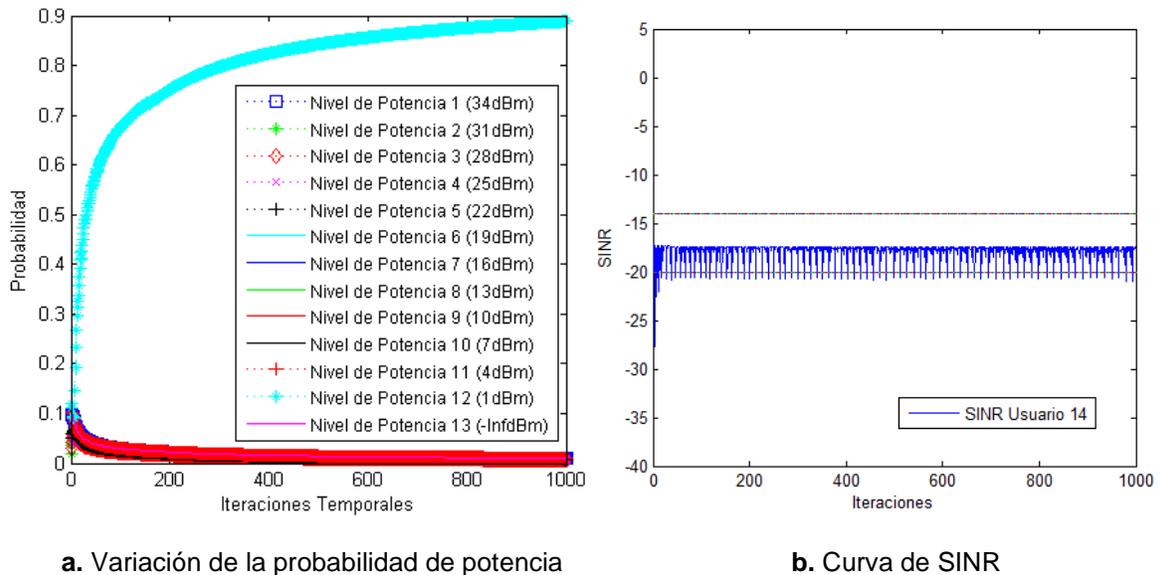


Figura 4. 38. Resultado de un usuario a 17.8 m de un FAP.

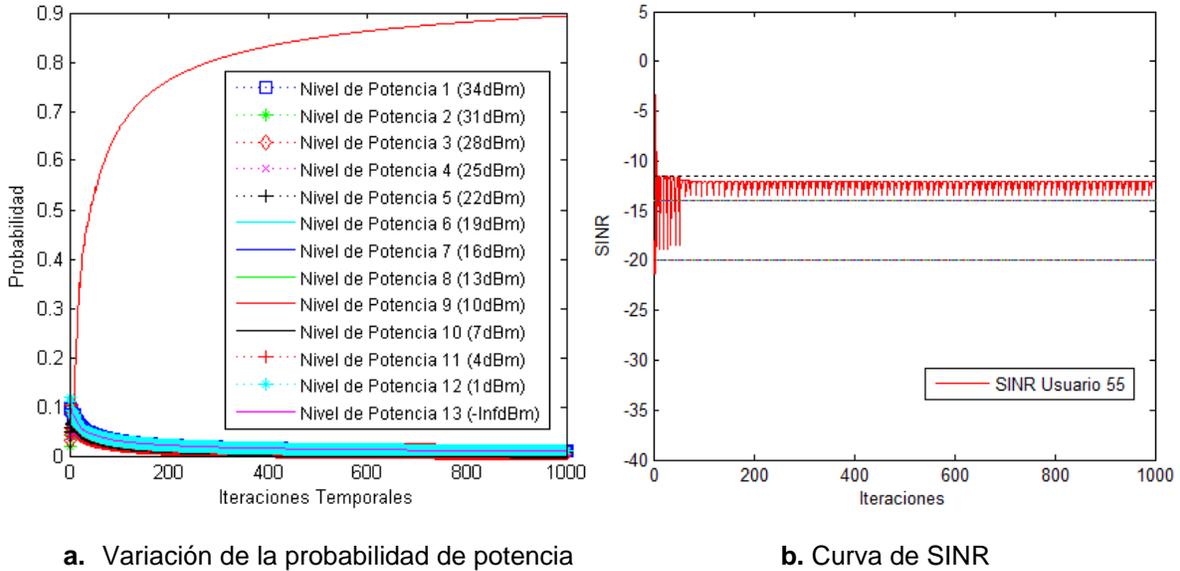


Figura 4. 39. Resultado de un usuario a 27.6 m de un FAP.

La figura 4.40 muestra las curvas de SINR de 4 UE. Los usuarios 33 y 34 con servicio de voz y los usuarios 30 y 41 con datos. Se observa que durante las primeras iteraciones las SINR variaron entre un amplio rango de valores para luego converger dentro del rango deseado.

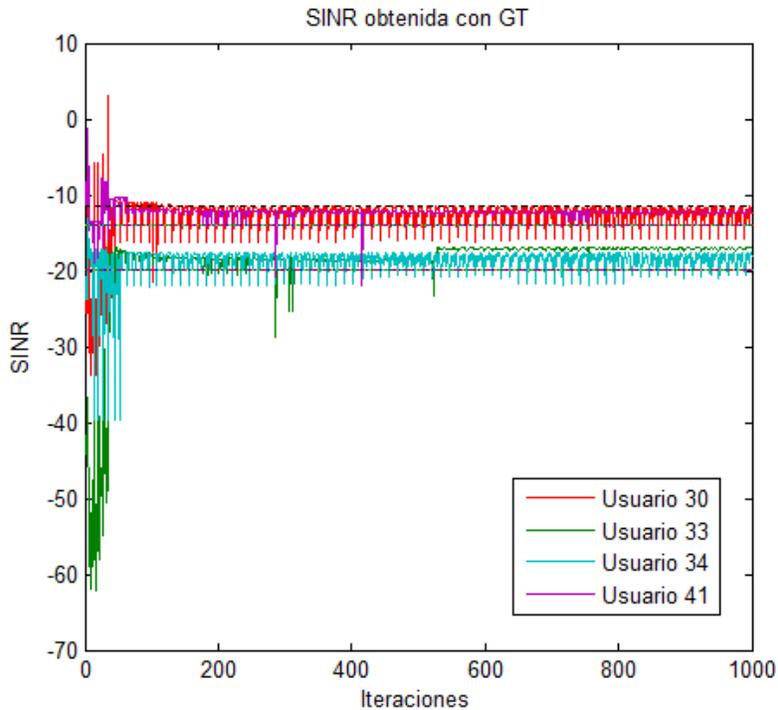


Figura 4. 40. Variación de la SINR de cuatro UE.

Con la implementación del Control Ideal de Potencia se atendieron a 31 UE como se aprecia en la figura 4.41, lo que equivale al 53.4% del total de UE dentro del radio de cobertura de la mBS. Este resultado con respecto al obtenido al aplicar el algoritmo de PC basado en la GT, muestra un deterioro en la capacidad del sistema del 15.51%, ya que como se observa en la curva de probabilidad de degradación obtenida con IPC de la figura 4.42a, este algoritmo no permite disminuir la probabilidad de degradación, a diferencia del algoritmo de GT.

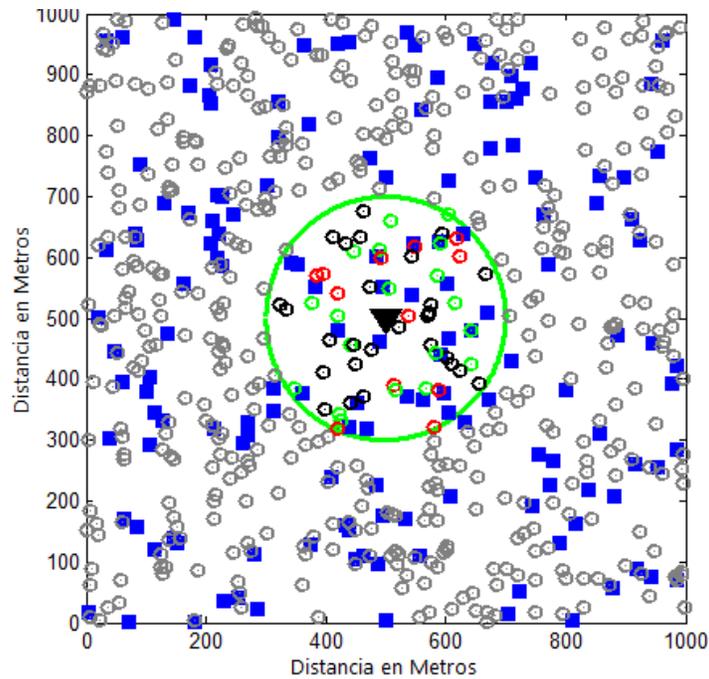


Figura 4. 41. Resultado obtenido con IPC, escenario 2 – voz y datos.

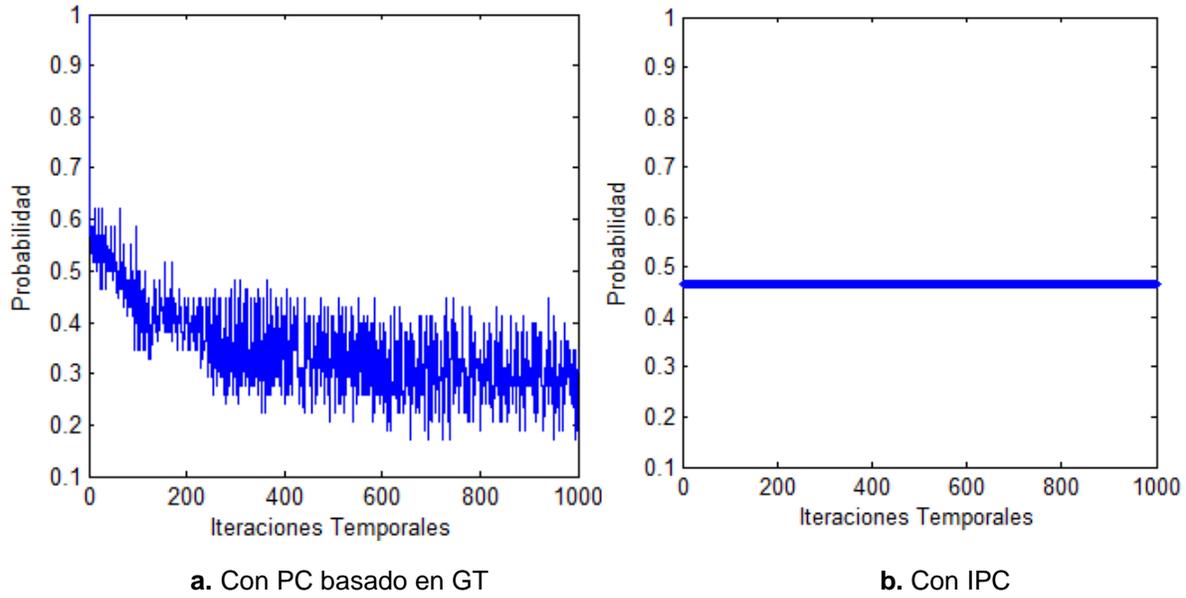


Figura 4. 42. Probabilidad de degradación.

En la tabla 4.11 se observa que de 41 FU que se encuentran al interior de la microcelda, la red es capaz de atender satisfactoriamente a 29 de ellos, es decir que del total de usuarios atendidos con GT, el 72.5% son FU, lo que indica que la capacidad total de la red en su mayoría se soporta en los FAP. Adicionalmente, es posible observar que los modelos de control de potencia atienden el mismo número de FU debido a que las soluciones de potencia encontradas por el modelo basado en GT son menores que las soluciones encontradas por IPC (ver apéndice B). Así, si los FU transmiten con menor potencia, reducen la interferencia producida sobre los mU, permitiendo atender más Micro Usuarios.

Tabla 4. 11. Capacidad según el tipo de usuario.

| Tipo de UE | Total UE dentro de la microcelda | Total Conectados GT | Total Conectados GT (%) | Total Conectados IPC | Total Conectados IPC (%) |
|--------------|----------------------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------|
| FU | 41 | 29 | 50% | 29 | 50% |
| mU | 17 | 11 | 18.965% | 2 | 3,448% |
| Total | 58 | 40 | 68,965 | 31 | 53,448 |

4.3. Resumen de Resultados

La tabla 4.12 contiene un resumen de los resultados obtenidos en los escenarios 1 y 2. Esta tabla evidencia que la implementación de un algoritmo de control de potencia aumentó la capacidad de la red y que el algoritmo basado en GT presentó un mejor desempeño frente al algoritmo IPC, debido a que con IPC se

discretizaron los valores de potencia encontrados lo que hizo que este perdiera precisión. Adicionalmente revela el impacto que tiene la reducción del tamaño de la celda en la capacidad del sistema, puesto que este valor en todos los casos del escenario 2, superó significativamente a los obtenidos en el escenario 1.

Tabla 4. 12. Resumen de resultados.

| | Escenario 1 | | | | | | Escenario 2 | | | | | |
|-----------------------------|-------------|------|--------|------|--------|------|-------------|------|--------|------|--------|------|
| | Caso 1 | | Caso 2 | | Caso 3 | | Caso 1 | | Caso 2 | | Caso 3 | |
| | GT | IPC | GT | IPC | GT | IPC | GT | IPC | GT | IPC | GT | IPC |
| Capacidad (%) | 48.3 | 37.3 | 40.5 | 32.3 | 45.3 | 36.9 | 73.9 | 51.1 | 62.6 | 50.7 | 68.9 | 53.4 |
| Probabilidad de degradación | 0.51 | 0.62 | 0.6 | 0.67 | 0.55 | 0.63 | 0.26 | 0.48 | 0.37 | 0.49 | 0.31 | 0.46 |

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. CONCLUSIONES

- ✓ Las pruebas realizadas con la implementación de los algoritmos de control de potencia muestran un aumento significativo en la capacidad de la red en comparación con el caso en que no se aplicó ningún mecanismo de control.
- ✓ Tanto el modelo basado en GT como el modelo IPC mitigan el problema de interferencia, sin embargo, la asignación dinámica de potencia que se realiza en el modelo basado en GT permite una mayor disminución del impacto que tiene la interferencia sobre la capacidad de la red, dado que las pruebas evidenciaron que los valores de potencia encontrados con GT son menores que con IPC.
- ✓ Las pruebas realizadas mostraron para los dos modelos de control de potencia un mismo número de FU atendidos, debido a que ambos encuentran soluciones de potencia adecuadas para dichos usuarios, sin embargo, los valores de potencia hallados con el modelo basado en GT para este tipo de usuarios son más bajos que con IPC. Así, al implementar PC basado en GT los FU reducen la interferencia emitida sobre los mU, por lo cual con este modelo se atienden más micro usuarios, incrementando la capacidad del sistema.
- ✓ Al incrementar la SINR objetivo en cada escenario de simulación se observó la disminución de la capacidad del sistema, esto debido a que los valores de potencia requeridos no se encuentran dentro de los valores disponibles por los algoritmos.
- ✓ El desempeño de los algoritmos de PC depende de la cantidad de niveles de potencia que utilicen, ya que las pruebas ejecutadas evidenciaron que la mayoría de usuarios que no fueron atendidos no encontraron un valor de potencia que les permitiera estabilizar su SINR dentro del rango requerido. En otras palabras, entre mayor sea el número de niveles disponibles será más fácil para el usuario encontrar una potencia de transmisión adecuada.
- ✓ Se observó un incremento en la capacidad al reducir el tamaño de la microcelda, ya que en este caso las potencias de transmisión encontradas por los algoritmos fueron menores, lo cual permitió disminuir el nivel de interferencia de la red.

5.2. TRABAJOS FUTUROS

Con base en la experiencia obtenida durante el desarrollo del trabajo de grado, se proponen los siguientes trabajos:

- ✓ **Implementación del modelo de PC basado en GT en una red heterogénea, teniendo en cuenta la movilidad de los UE:** en éste trabajo se ubicaron de manera aleatoria UE que mantuvieron su posición fija durante todo el periodo de simulación, por lo que sería interesante observar el efecto que tiene la movilidad sobre la capacidad de la red y los tiempos de convergencia del sistema.

- ✓ **Aplicación del modelo de PC en un escenario de simulación con varias microceldas:** debido a que en este trabajo se llevó a cabo el control de potencia en una única microcelda, se propone la implementación del modelo de PC en una red con varias microceldas, para analizar la probabilidad de degradación y capacidad del sistema.

- ✓ **Implementación de algoritmos de PC diferentes en femto y microusuarios:** en el presente trabajo se aplica el modelo de PC basado en GT tanto en FU como en mU, razón por la cual se propone realizar un análisis comparativo, implementando algoritmos de control diferentes en cada caso, con el fin de analizar cómo se afecta la capacidad de la red bajo estas condiciones.

- ✓ **Implementación de un algoritmo de asignación de frecuencia basado en Teoría de Juegos:** con el fin de hacer uso eficiente del espectro en situaciones en las que el nivel de interferencia presente en el sistema sobrepase el límite permitido, se propone realizar una adaptación al modelo de PC basado en GT para la asignación de frecuencia.

Apéndice A

En el presente apéndice se muestran los resultados de capacidad obtenidos sin aplicar ningún algoritmo de control de potencia. Para cada caso se realizaron 10 simulaciones, en cada una de las cuales se asignó 1000 veces de forma aleatoria una potencia de transmisión, para luego obtener la SINR y analizar si se encuentra o no conectado. Adicionalmente en cada simulación cambió la ubicación de los UE y los FAP y por ende, también el número de usuarios dentro del radio de cobertura de la microcelda.

A.1. Escenario 1: 400 metros

- **Caso 1: voz**

En la tabla A.1 se presenta el resumen de las capacidades obtenidas en cada una de las pruebas realizadas para el caso 1, donde la SINR objetivo fue de -20dB. El porcentaje promedio de usuarios conectados fue del 18.2%.

Tabla A. 1. Capacidad sin control de potencia. Escenario 1 – voz.

| Prueba No | Total Usuarios | Usuarios Atendidos | Usuarios Atendidos (%) |
|-----------------------|----------------|--------------------|------------------------|
| 1 | 237 | 48 | 20,253 |
| 2 | 251 | 47 | 18,725 |
| 3 | 256 | 50 | 19,531 |
| 4 | 250 | 29 | 11,6 |
| 5 | 239 | 45 | 18,828 |
| 6 | 221 | 47 | 21,266 |
| 7 | 261 | 56 | 21,455 |
| 8 | 246 | 25 | 10,162 |
| 9 | 264 | 55 | 20,833 |
| 10 | 268 | 52 | 19,402 |
| Promedio Total | | 45,4 | 18,205 |

- **Caso 2: datos**

El resumen de la capacidad obtenida en cada una de las simulaciones realizadas para el segundo caso, se muestra en la tabla A.2. El porcentaje promedio de usuarios conectados fue del 16.9%, menor que en el caso anterior.

Tabla A. 2. Capacidad sin control de potencia. Escenario 1 – datos.

| Prueba No | Total Usuarios | Usuarios Atendidos | Usuarios Atendidos (%) |
|-----------------------|----------------|--------------------|------------------------|
| 1 | 260 | 35 | 15,384 |
| 2 | 249 | 40 | 18,875 |
| 3 | 245 | 42 | 17,142 |
| 4 | 255 | 37 | 18,823 |
| 5 | 244 | 38 | 15,573 |
| 6 | 266 | 53 | 19,924 |
| 7 | 249 | 41 | 20,080 |
| 8 | 268 | 48 | 17,910 |
| 9 | 246 | 42 | 21,951 |
| 10 | 235 | 51 | 21,702 |
| Promedio Total | | 42,7 | 16,982 |

- **Caso 3: voz y datos**

En la tabla A.3 se muestra el resumen de los valores de capacidad obtenidos en cada una de las pruebas realizadas para el caso 3, en donde se asignan diferentes tipos de servicio a los usuarios. El porcentaje promedio de usuarios conectados fue del 20,52%, mayor que en los dos casos anteriores. Se puede observar que en 7 de 10 pruebas el sistema atendió más usuarios con el servicio de voz que de datos.

Tabla A. 3. Capacidad sin control de potencia. Escenario 1 – voz y datos.

| Prueba No | Total usuarios | Total usuarios voz | Usuarios atendidos voz | Total usuarios datos | Usuarios atendidos datos | Total usuarios atendidos | Usuarios atendidos (%) |
|---|----------------|--------------------|------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| 1 | 265 | 121 | 35 | 144 | 10 | 45 | 16,981 |
| 2 | 274 | 133 | 28 | 141 | 14 | 42 | 15,849 |
| 3 | 247 | 119 | 32 | 128 | 41 | 73 | 27,547 |
| 4 | 257 | 120 | 29 | 137 | 27 | 56 | 21,132 |
| 5 | 246 | 128 | 36 | 118 | 14 | 50 | 18,867 |
| 6 | 255 | 115 | 34 | 140 | 18 | 52 | 19,622 |
| 7 | 247 | 130 | 39 | 117 | 9 | 48 | 18,113 |
| 8 | 254 | 130 | 32 | 124 | 29 | 61 | 23,018 |
| 9 | 240 | 112 | 23 | 128 | 26 | 49 | 18,490 |
| 10 | 235 | 137 | 31 | 98 | 37 | 68 | 25,660 |
| Promedio total de usuarios atendidos | | | | | | 54,4 | 20,528 |

A.2. Escenario 2: 200 metros

- **Caso 1: voz**

Las capacidades obtenidas en las simulaciones ejecutadas para el caso 1 se presentan en la tabla A.4. El porcentaje promedio de usuarios conectados fue del 22.9%. Este valor es mayor que el porcentaje obtenido en los tres casos anteriores.

Tabla A. 4. Capacidad sin control de potencia. Escenario 2 – voz.

| Prueba No | Total usuarios | Usuarios atendidos | Usuarios atendidos (%) |
|-----------------------|----------------|--------------------|------------------------|
| 1 | 65 | 14 | 21,538 |
| 2 | 99 | 25 | 25,252 |
| 3 | 72 | 21 | 29,166 |
| 4 | 58 | 12 | 20,689 |
| 5 | 70 | 16 | 22,857 |
| 6 | 63 | 10 | 15,873 |
| 7 | 77 | 12 | 15,584 |
| 8 | 70 | 17 | 24,285 |
| 9 | 61 | 17 | 27,868 |
| 10 | 54 | 14 | 25,925 |
| Promedio total | | 15,8 | 22,904 |

- **Caso 2: Datos**

A continuación se observa el resumen de las capacidades obtenidas en las 10 simulaciones realizadas para el caso 2. Se observa en la figura A.5 que el promedio de usuarios atendidos aumenta con respecto al caso anterior.

Tabla A. 5. Capacidad sin control de potencia. Escenario 2 – datos.

| Prueba No | Total usuarios | Usuarios atendidos | Usuarios atendidos (%) |
|-----------|----------------|--------------------|------------------------|
| 1 | 73 | 16 | 21,917 |
| 2 | 61 | 10 | 16,393 |
| 3 | 53 | 12 | 22,641 |
| 4 | 60 | 14 | 23,333 |
| 5 | 56 | 18 | 32,142 |

| | | | |
|-----------------------|----|------|--------|
| 6 | 67 | 16 | 23,880 |
| 7 | 58 | 15 | 25,862 |
| 8 | 73 | 17 | 23,287 |
| 9 | 59 | 11 | 18,644 |
| 10 | 57 | 16 | 28,070 |
| Promedio total | | 14,5 | 23,617 |

- **Caso 3: voz y datos**

En la tabla A.6 se muestra el resumen de los valores de capacidad obtenidos en cada una de las pruebas realizadas para el caso 3. El porcentaje promedio de usuarios conectados fue del 25,5%, mayor que en los dos casos anteriores. Se aprecia que en 5 de 10 pruebas el sistema atendió más usuarios con el servicio de datos y solo en una prueba fueron atendidos igual número de usuarios con ambos servicios.

Tabla A. 6. Capacidad sin control de potencia. Escenario 2 – voz y datos.

| Prueba No | Total usuario | Total usuarios voz | Usuarios atendidos voz | Total usuarios datos | Total usuarios datos | Usuarios atendidos datos | Total atendidos (%) |
|---|----------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 1 | 56 | 31 | 6 | 25 | 9 | 15 | 26,785 |
| 2 | 62 | 25 | 11 | 37 | 11 | 22 | 35,483 |
| 3 | 60 | 31 | 8 | 29 | 4 | 12 | 20 |
| 4 | 67 | 42 | 5 | 25 | 13 | 18 | 26,865 |
| 5 | 57 | 32 | 11 | 25 | 6 | 17 | 29,824 |
| 6 | 69 | 39 | 7 | 30 | 10 | 17 | 24,637 |
| 7 | 63 | 36 | 6 | 27 | 8 | 14 | 22,222 |
| 8 | 72 | 37 | 8 | 35 | 2 | 10 | 13,888 |
| 9 | 61 | 28 | 7 | 33 | 5 | 12 | 19,672 |
| 10 | 61 | 30 | 8 | 31 | 14 | 22 | 36,065 |
| Promedio total de usuarios atendidos | | | | | | 15,9 | 25,544 |

Los resultados presentados anteriormente evidencian el bajo número de usuarios atendidos en todos los escenarios y casos, revelando la necesidad de un adecuado mecanismo de control de potencia que permita disminuir la interferencia del sistema y con ello incrementar la capacidad.

Adicionalmente se encuentra que al asignar la potencia de transmisión de manera aleatoria los resultados no coinciden con la teoría, puesto que se espera que en los casos en los que la SINR requerida es más baja, al sistema le sea más fácil atender un mayor número de usuarios.

Apéndice B

En el apéndice que se presenta a continuación se muestran los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo de control de potencia basado en GT y el modelo IPC. Por cada caso, se realizaron 10 pruebas y en cada una de ellas se ejecutó el modelo basado en GT 1000 veces. Cabe resaltar, que en cada simulación la ubicación de los UE, los FAP y el número de usuarios al interior de la microcelda cambió.

B.1. Escenario 1: 400 metros

- **Caso 1: Voz**

En la tabla B.1 se presenta el resumen de la capacidad obtenida en cada una de las pruebas realizadas, para el caso 1. Se observa que en todas las simulaciones realizadas el porcentaje de usuarios atendidos con GT supera al valor obtenido con IPC.

Tabla B. 1. Capacidad con control de potencia. Escenario 1 – voz.

| Prueba N° | Total usuarios | Usuarios atendidos GT | Usuarios atendidos GT (%) | Usuarios atendidos IPC | Usuarios atendidos IPC (%) |
|-----------|----------------|-----------------------|---------------------------|------------------------|----------------------------|
| 1 | 263 | 127 | 48,288 | 98 | 37,262 |
| 2 | 260 | 112 | 43,076 | 100 | 38,461 |
| 3 | 260 | 116 | 44,615 | 98 | 37,692 |
| 4 | 258 | 105 | 40,697 | 73 | 28,294 |
| 5 | 260 | 116 | 44,615 | 98 | 37,692 |
| 6 | 240 | 115 | 47,916 | 91 | 37,916 |
| 7 | 262 | 110 | 41,984 | 88 | 33,587 |
| 8 | 254 | 107 | 42,125 | 79 | 31,102 |
| 9 | 235 | 115 | 48,936 | 83 | 35,319 |
| 10 | 260 | 112 | 43,076 | 100 | 38,461 |

Para las pruebas realizadas se obtuvieron los resultados de capacidad en cada una de las femtoceldas dentro del área de cobertura de la mBS. Específicamente, para el caso de análisis presentado en el capítulo 4 (prueba N° 1), dichos resultados se consignaron en la tabla B.2. Se observa que ambos algoritmos atendieron el mismo número de FU, es decir que la diferencia en la capacidad total radica en que el modelo basado en GT permite atender más micro usuarios.

Tabla B. 2. Capacidad de cada FAP con control de potencia. Prueba 1.

| Nº FAP | FU asociados | FU atendidos GT – IPC | | | | | | |
|--------|--------------|-----------------------|----|---|---|--------------|------------|-----------|
| 1 | 1 | 1 | 31 | 2 | 2 | 63 | 1 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 32 | 2 | 2 | 64 | 3 | 3 |
| 3 | 2 | 1 | 33 | 0 | 0 | 65 | 1 | 1 |
| 4 | 5 | 5 | 34 | 1 | 1 | 66 | 1 | 1 |
| 5 | 2 | 0 | 35 | 0 | 0 | 67 | 1 | 1 |
| 6 | 2 | 0 | 36 | 2 | 2 | 68 | 2 | 2 |
| 7 | 2 | 0 | 37 | 1 | 1 | 69 | 0 | 0 |
| 8 | 1 | 0 | 38 | 3 | 3 | 70 | 2 | 2 |
| 9 | 0 | 0 | 39 | 1 | 1 | 71 | 2 | 2 |
| 10 | 3 | 1 | 40 | 1 | 1 | 72 | 1 | 1 |
| 11 | 2 | 2 | 41 | 2 | 2 | 73 | 1 | 1 |
| 12 | 0 | 0 | 42 | 0 | 0 | 74 | 2 | 2 |
| 13 | 3 | 1 | 43 | 1 | 1 | 75 | 3 | 2 |
| 14 | 2 | 1 | 44 | 1 | 0 | 76 | 2 | 2 |
| 15 | 1 | 0 | 45 | 1 | 1 | 77 | 0 | 0 |
| 16 | 2 | 1 | 46 | 3 | 3 | 78 | 0 | 0 |
| 17 | 5 | 2 | 47 | 4 | 3 | 79 | 0 | 0 |
| 18 | 2 | 0 | 48 | 3 | 1 | 80 | 5 | 1 |
| 19 | 2 | 2 | 49 | 2 | 1 | 81 | 4 | 4 |
| 20 | 4 | 2 | 50 | 2 | 2 | 82 | 3 | 2 |
| 21 | 2 | 1 | 51 | 1 | 1 | 83 | 3 | 2 |
| 22 | 2 | 0 | 52 | 0 | 0 | 84 | 2 | 2 |
| 23 | 1 | 1 | 53 | 3 | 3 | 85 | 0 | 0 |
| 24 | 3 | 2 | 54 | 0 | 0 | 86 | 1 | 1 |
| 25 | 3 | 2 | 55 | 1 | 1 | 87 | 0 | 0 |
| 26 | 0 | 0 | 56 | 0 | 0 | 88 | 2 | 1 |
| 27 | 0 | 0 | 57 | 1 | 0 | 89 | 3 | 1 |
| 28 | 0 | 0 | 58 | 2 | 1 | 90 | 1 | 0 |
| 29 | 1 | 1 | 59 | 0 | 0 | 91 | 1 | 1 |
| 30 | 2 | 2 | 60 | 0 | 0 | Total | 144 | 97 |
| | | | 61 | 0 | 0 | | | |
| | | | 62 | 1 | 1 | | | |

Las potencias de transmisión encontradas por los algoritmos para cada FU atendido al interior de la microcelda, correspondientes a la prueba N° 1, fueron registrados en la tabla B.3. Se aprecia que a la mayoría de FU se les asignaron valores de potencia menores por el algoritmo basado en GT que por IPC, por esta razón se reduce la interferencia sobre los mU. Adicionalmente, se observa que con GT las potencias no superan los 16dBm mientras que con IPC alcanzan la potencia máxima de transmisión por lo que algunos transmiten con más potencia de la que necesitan, causando más interferencia.

Tabla B. 3. Potencias asignadas por los algoritmos a los FU atendidos. Prueba 1.

| FU | Potencia con GT (dBm) | Potencia con IPC (dBm) |
|-----|-----------------------|------------------------|
| 1 | 4 | 7 |
| 5 | 7 | 7 |
| 14 | 1 | 4 |
| 15 | 1 | 7 |
| 16 | 7 | 7 |
| 22 | 10 | 19 |
| 23 | 16 | 4 |
| 26 | 1 | 4 |
| 28 | 4 | 16 |
| 29 | 1 | 13 |
| 33 | 1 | 1 |
| 40 | 4 | 1 |
| 42 | 1 | 1 |
| 43 | 1 | 4 |
| 46 | 10 | 16 |
| 48 | 1 | 7 |
| 53 | 7 | 7 |
| 54 | 1 | 7 |
| 56 | 4 | 13 |
| 79 | 1 | 4 |
| 82 | 13 | 25 |
| 83 | 16 | 31 |
| 87 | 10 | 13 |
| 91 | 13 | 10 |
| 92 | 1 | 10 |
| 94 | 1 | 10 |
| 95 | 1 | 1 |
| 98 | 1 | 1 |
| 102 | 1 | 4 |
| 106 | 1 | 16 |
| 107 | 10 | 13 |
| 108 | 1 | 7 |
| 115 | 16 | 25 |
| 117 | 7 | 22 |
| 118 | 16 | 34 |
| 125 | 1 | 4 |
| 129 | 1 | 13 |
| 130 | 1 | 4 |
| 135 | 1 | 10 |
| 141 | 1 | 10 |
| 143 | 1 | 1 |
| 145 | 10 | 22 |
| 151 | 7 | 10 |
| 157 | 1 | 4 |
| 162 | 10 | 19 |
| 165 | 1 | 10 |
| 166 | 1 | 13 |
| 170 | 1 | 10 |
| 171 | 1 | 13 |
| 177 | 1 | 13 |
| 178 | 4 | 7 |
| 184 | 16 | 13 |
| 187 | 1 | 1 |
| 190 | 1 | 7 |
| 191 | 1 | 1 |
| 192 | 1 | 1 |
| 193 | 1 | 13 |
| 195 | 1 | 1 |
| 204 | 1 | 10 |
| 207 | 4 | 19 |
| 210 | 1 | 13 |
| 212 | 1 | 19 |
| 216 | 16 | 13 |
| 222 | 7 | 22 |
| 223 | 16 | 4 |
| 224 | 1 | 13 |
| 226 | 7 | 19 |
| 228 | 1 | 1 |
| 232 | 1 | 1 |
| 234 | 1 | 7 |
| 235 | 4 | 7 |
| 237 | 1 | 1 |
| 240 | 1 | 1 |
| 244 | 1 | 1 |
| 249 | 1 | 1 |
| 252 | 16 | 16 |
| 256 | 1 | 4 |
| 257 | 7 | 7 |
| 258 | 1 | 7 |
| 263 | 1 | 7 |
| 270 | 1 | 7 |
| 272 | 1 | 4 |
| 276 | 16 | 22 |
| 277 | 1 | 10 |
| 278 | 7 | 10 |
| 281 | 10 | 22 |
| 282 | 1 | 4 |
| 284 | 1 | 7 |
| 286 | 1 | 4 |
| 288 | 1 | 1 |
| 292 | 7 | 10 |
| 299 | 1 | 1 |
| 308 | 7 | 10 |
| 312 | 16 | 16 |
| 317 | 16 | 7 |
| 329 | 1 | 1 |
| 330 | 16 | 22 |

- **Caso 2: Datos**

Para este caso de simulación, se registraron los resultados de capacidad en la tabla B.4. Se aprecia que en la mayoría de las pruebas realizadas el porcentaje de usuarios atendidos con GT supera al valor obtenido con IPC, sin embargo en 3 simulaciones el porcentaje con ambos algoritmos fue igual.

Tabla B. 4. Capacidad con control de potencia. Escenario 1 – datos.

| Prueba No | Total usuarios | Usuarios conectados GT | Usuarios conectados GT (%) | Usuarios conectados IPC | Usuarios conectados IPC (%) |
|-----------|----------------|------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 1 | 270 | 75 | 27,777 | 73 | 27,037 |
| 2 | 258 | 101 | 39,147 | 76 | 29,457 |
| 3 | 248 | 82 | 33,064 | 82 | 33,064 |
| 4 | 244 | 99 | 40,56 | 79 | 32,37 |
| 5 | 270 | 96 | 35,555 | 73 | 27,037 |
| 6 | 229 | 77 | 33,624 | 77 | 33,624 |
| 7 | 229 | 87 | 37,991 | 87 | 37,991 |
| 8 | 254 | 97 | 38,188 | 91 | 35,826 |
| 9 | 265 | 74 | 27,924 | 64 | 24,150 |
| 10 | 262 | 115 | 43,893 | 72 | 27,480 |

Los resultados de capacidad de cada una de las femtoceldas ubicadas al interior de la microcelda, para la prueba N° 4 se consignaron en la tabla B.5, donde ambos algoritmos atendieron el mismo número de FU.

Tabla B. 5. Capacidad de cada FAP con control de potencia. Prueba 4.

| N° FAP | FU Asociados | FU Atendidos GT-IPC | 20 | 3 | 3 | 41 | 1 | 0 |
|--------|--------------|---------------------|----|---|---|----|---|---|
| 1 | 5 | 4 | 21 | 3 | 0 | 42 | 2 | 1 |
| 2 | 1 | 0 | 22 | 0 | 0 | 43 | 2 | 1 |
| 3 | 2 | 1 | 23 | 1 | 0 | 44 | 2 | 2 |
| 4 | 2 | 0 | 24 | 2 | 1 | 45 | 3 | 3 |
| 5 | 2 | 1 | 25 | 3 | 3 | 46 | 1 | 1 |
| 6 | 3 | 3 | 26 | 0 | 0 | 47 | 3 | 2 |
| 7 | 3 | 1 | 27 | 3 | 3 | 48 | 3 | 2 |
| 8 | 3 | 2 | 28 | 2 | 1 | 49 | 0 | 0 |
| 9 | 1 | 1 | 29 | 3 | 3 | 50 | 3 | 1 |
| 10 | 1 | 0 | 30 | 2 | 2 | 51 | 0 | 0 |
| 11 | 2 | 1 | 31 | 4 | 4 | 52 | 3 | 1 |
| 12 | 0 | 0 | 32 | 0 | 0 | 53 | 1 | 1 |
| 13 | 0 | 0 | 33 | 1 | 0 | 54 | 0 | 0 |
| 14 | 2 | 1 | 34 | 0 | 0 | 55 | 1 | 0 |
| 15 | 2 | 0 | 35 | 0 | 0 | 56 | 1 | 1 |
| 16 | 0 | 0 | 36 | 0 | 0 | 57 | 1 | 0 |
| 17 | 1 | 0 | 37 | 1 | 1 | 58 | 4 | 1 |
| 18 | 1 | 1 | 38 | 2 | 2 | 59 | 2 | 0 |
| 19 | 1 | 1 | 39 | 1 | 0 | 60 | 3 | 1 |
| | | | 40 | 6 | 0 | 61 | 2 | 1 |

| | | | | | | | | |
|----|---|---|----|---|---|--------------|------------|-----------|
| 62 | 2 | 2 | 71 | 2 | 2 | 80 | 1 | 0 |
| 63 | 2 | 1 | 72 | 0 | 0 | 81 | 3 | 1 |
| 64 | 2 | 2 | 73 | 1 | 0 | 82 | 2 | 1 |
| 65 | 3 | 1 | 74 | 2 | 2 | 83 | 0 | 0 |
| 66 | 0 | 0 | 75 | 1 | 1 | 84 | 1 | 1 |
| 67 | 1 | 0 | 76 | 0 | 0 | 85 | 0 | 0 |
| 68 | 1 | 1 | 77 | 3 | 1 | 86 | 2 | 1 |
| 69 | 0 | 0 | 78 | 1 | 0 | 87 | 1 | 0 |
| 70 | 2 | 1 | 79 | 2 | 2 | Total | 142 | 79 |

En la tabla B.6 fueron registradas las potencias de transmisión encontradas por los algoritmos para cada FU atendido en la prueba N° 4. Se aprecia que 34 UE presentan valores de potencia menores con el algoritmo basado en GT que con IPC, mientras que solo a 5 UE se les asignó una menor potencia con la implementación de IPC, por esta razón con GT se reduce la interferencia sobre los mU permitiendo atender más usuarios de este tipo. Al resto de usuarios los dos algoritmos les asignaron la misma potencia. Adicionalmente, se observa que con GT las potencias no superan los 19dBm mientras que con IPC alcanzan los 34dBm por lo que algunos transmiten con más potencia de la necesaria.

Tabla B. 6. Potencias asignadas por los algoritmos a los FU atendidos. Prueba 4.

| FU | Potencia con GT (dBm) | Potencia con IPC (dBm) | | | | | | |
|----|-----------------------|------------------------|-----|----|----|-----|----|----|
| 6 | 1 | 1 | 73 | 13 | 13 | 154 | 19 | 22 |
| 9 | 13 | 13 | 74 | 19 | 31 | 157 | 10 | 16 |
| 10 | 1 | 1 | 76 | 7 | 7 | 161 | 7 | 13 |
| 15 | 7 | 7 | 81 | 1 | 1 | 165 | 22 | 34 |
| 18 | 7 | 7 | 84 | 7 | 7 | 170 | 13 | 19 |
| 21 | 10 | 10 | 86 | 1 | 1 | 175 | 1 | 4 |
| 28 | 1 | 1 | 95 | 7 | 7 | 177 | 1 | 1 |
| 35 | 22 | 22 | 104 | 19 | 25 | 178 | 13 | 22 |
| 41 | 16 | 16 | 111 | 7 | 7 | 179 | 16 | 19 |
| 42 | 16 | 4 | 114 | 7 | 7 | 181 | 7 | 7 |
| 45 | 13 | 4 | 116 | 7 | 7 | 183 | 16 | 22 |
| 46 | 1 | 1 | 121 | 10 | 10 | 185 | 4 | 4 |
| 54 | 1 | 1 | 123 | 16 | 10 | 186 | 10 | 13 |
| 55 | 7 | 7 | 128 | 16 | 16 | 187 | 1 | 1 |
| 58 | 10 | 10 | 129 | 4 | 4 | 188 | 22 | 16 |
| 62 | 7 | 7 | 130 | 4 | 7 | 191 | 1 | 1 |
| 67 | 4 | 4 | 133 | 7 | 13 | 197 | 4 | 7 |
| 70 | 19 | 19 | 134 | 4 | 7 | 198 | 1 | 1 |
| 72 | 19 | 10 | 143 | 16 | 22 | 200 | 13 | 22 |
| | | | 145 | 16 | 22 | 201 | 10 | 13 |
| | | | 150 | 10 | 13 | 202 | 4 | 10 |

| | | |
|------------|----|----|
| 211 | 10 | 10 |
| 216 | 10 | 25 |
| 226 | 7 | 13 |
| 227 | 1 | 1 |
| 230 | 7 | 13 |
| 232 | 4 | 10 |
| 237 | 4 | 4 |
| 246 | 1 | 1 |
| 250 | 4 | 10 |
| 251 | 4 | 13 |
| 255 | 1 | 1 |
| 259 | 7 | 7 |
| 260 | 16 | 19 |
| 261 | 13 | 22 |
| 262 | 13 | 16 |
| 263 | 7 | 7 |
| 265 | 4 | 7 |
| 268 | 10 | 13 |

- **Caso 3: voz y datos**

El resumen de la capacidad obtenida en las 10 simulaciones ejecutadas se muestra en la tabla B.7. En este caso se les asigna aleatoriamente a los usuarios una SINR objetivo, que puede ser -20dB (voz) o -14dB (datos). Al igual que en el caso 1, en todas las simulaciones realizadas el porcentaje de usuarios atendidos con GT supera el valor obtenido con IPC.

Tabla B. 7. Capacidad con control de potencia. Escenario 1 – voz y datos.

| Prueba No | Total usuarios | Usuarios conectados GT | Usuarios conectados GT (%) | Usuarios conectados IPC | Usuarios conectados IPC (%) |
|------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 248 | 116 | 46,774 | 119 | 47,983 |
| 2 | 254 | 100 | 39,370 | 60 | 23,622 |
| 3 | 265 | 77 | 29,056 | 76 | 28,679 |
| 4 | 260 | 118 | 45,384 | 96 | 36,923 |
| 5 | 251 | 87 | 34,661 | 86 | 34,262 |
| 6 | 248 | 100 | 40,322 | 89 | 35,887 |
| 7 | 232 | 85 | 36,637 | 84 | 36,206 |
| 8 | 265 | 77 | 29,056 | 76 | 28,679 |
| 9 | 260 | 120 | 46,153 | 76 | 29,230 |
| 10 | 273 | 93 | 34,065 | 82 | 30,036 |

Las pruebas realizadas arrojaron los valores de capacidad de cada una de las femtoceldas dentro del área de cobertura de la mBS. Para el caso de análisis presentado en el capítulo 4 (prueba N° 4) dichos resultados se consignaron en la tabla B.8. Se observa que al igual que en los casos anteriores, ambos algoritmos atendieron el mismo número de FU.

Tabla B. 8. Capacidad de cada FAP con control de potencia. Prueba 4.

| Nº FAP | FU Asociados | FU Atendidos GT-IPC |
|--------|--------------|---------------------|
| 1 | 6 | 5 |
| 2 | 1 | 1 |
| 3 | 5 | 2 |
| 4 | 1 | 1 |
| 5 | 3 | 3 |
| 6 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 |
| 10 | 4 | 3 |
| 11 | 1 | 1 |
| 12 | 0 | 0 |
| 13 | 1 | 1 |
| 14 | 3 | 1 |
| 15 | 1 | 1 |
| 16 | 2 | 0 |
| 17 | 3 | 3 |
| 18 | 1 | 1 |
| 19 | 1 | 1 |
| 20 | 2 | 2 |
| 21 | 2 | 0 |
| 22 | 1 | 1 |
| 23 | 5 | 5 |
| 24 | 1 | 0 |
| 25 | 1 | 0 |

| | | |
|----|---|---|
| 26 | 1 | 1 |
| 27 | 2 | 1 |
| 28 | 4 | 1 |
| 29 | 2 | 2 |
| 30 | 3 | 1 |
| 31 | 3 | 3 |
| 32 | 3 | 2 |
| 33 | 3 | 3 |
| 34 | 2 | 0 |
| 35 | 1 | 0 |
| 36 | 1 | 1 |
| 37 | 1 | 1 |
| 38 | 0 | 0 |
| 39 | 4 | 1 |
| 40 | 2 | 1 |
| 41 | 1 | 1 |
| 42 | 3 | 3 |
| 43 | 1 | 1 |
| 44 | 2 | 2 |
| 45 | 3 | 3 |
| 46 | 2 | 2 |
| 47 | 4 | 3 |
| 48 | 0 | 0 |
| 49 | 0 | 0 |
| 50 | 1 | 1 |
| 51 | 1 | 1 |
| 52 | 1 | 1 |

| | | |
|--------------|------------|-----------|
| 53 | 1 | 1 |
| 54 | 3 | 1 |
| 55 | 2 | 1 |
| 56 | 0 | 0 |
| 57 | 1 | 1 |
| 58 | 2 | 1 |
| 59 | 1 | 1 |
| 60 | 3 | 1 |
| 61 | 2 | 2 |
| 62 | 1 | 1 |
| 63 | 1 | 0 |
| 64 | 5 | 4 |
| 65 | 1 | 0 |
| 66 | 3 | 2 |
| 67 | 1 | 0 |
| 68 | 5 | 4 |
| 69 | 0 | 0 |
| 70 | 1 | 1 |
| 71 | 1 | 1 |
| 72 | 3 | 1 |
| 73 | 0 | 0 |
| 74 | 2 | 2 |
| 75 | 0 | 0 |
| 76 | 0 | 0 |
| 77 | 2 | 2 |
| Total | 137 | 95 |

En la tabla B.9 se registraron las potencias asignadas por los algoritmos para cada FU ubicado al interior de la microcelda, correspondientes a la prueba N° 4. Se aprecia que la mayoría de los valores de potencia encontrados por el algoritmo basado en GT son menores que los hallados por IPC, por esta razón se reduce la interferencia sobre los mU permitiéndole al algoritmo atender más usuarios de este tipo. Además, se observa que con GT no se supera los 22dBm mientras que con IPC se alcanza la potencia máxima de transmisión (34dBm) por lo que algunos UE transmiten con más potencia de la necesaria y causan mayor interferencia.

Tabla B. 9. Potencias asignadas por los algoritmos a los FU atendidos. Prueba 4.

| FU | Potencia con GT (dBm) | Potencia con IPC (dBm) |
|----|-----------------------|------------------------|
| 1 | 19 | 16 |

| | | |
|----|---|----|
| 3 | 1 | 10 |
| 4 | 1 | 19 |
| 18 | 7 | 16 |

| | | |
|----|----|----|
| 19 | 1 | 1 |
| 30 | 13 | 22 |
| 31 | 1 | 7 |

| | | | | | | | | |
|-----|----|----|-----|----|----|-----|----|----|
| 32 | 1 | 13 | 135 | 1 | 10 | 253 | 1 | 7 |
| 41 | 19 | 19 | 137 | 4 | 13 | 254 | 19 | 16 |
| 42 | 1 | 1 | 139 | 7 | 13 | 255 | 1 | 7 |
| 45 | 1 | 31 | 141 | 1 | 16 | 257 | 1 | 10 |
| 51 | 19 | 34 | 148 | 1 | 1 | 263 | 19 | 31 |
| 60 | 13 | 19 | 149 | 16 | 10 | 265 | 7 | 16 |
| 64 | 13 | 16 | 156 | 7 | 16 | 269 | 16 | 28 |
| 67 | 7 | 16 | 157 | 1 | 1 | 272 | 10 | 19 |
| 69 | 7 | 13 | 164 | 19 | 28 | 278 | 4 | 7 |
| 75 | 1 | 1 | 166 | 19 | 28 | 279 | 1 | 10 |
| 82 | 19 | 25 | 170 | 1 | 16 | 281 | 19 | 25 |
| 84 | 1 | 22 | 173 | 16 | 16 | 282 | 10 | 19 |
| 87 | 13 | 19 | 174 | 19 | 25 | 283 | 22 | 22 |
| 88 | 19 | 31 | 179 | 19 | 22 | 285 | 1 | 1 |
| 89 | 13 | 22 | 180 | 16 | 16 | 289 | 1 | 1 |
| 92 | 16 | 16 | 182 | 19 | 16 | 290 | 7 | 10 |
| 95 | 1 | 13 | 192 | 10 | 19 | 294 | 10 | 16 |
| 98 | 7 | 10 | 193 | 1 | 16 | 295 | 19 | 16 |
| 104 | 7 | 19 | 197 | 4 | 19 | 297 | 4 | 7 |
| 105 | 19 | 19 | 200 | 7 | 16 | 300 | 19 | 7 |
| 107 | 7 | 1 | 208 | 19 | 16 | 301 | 16 | 16 |
| 111 | 19 | 25 | 211 | 1 | 16 | 307 | 19 | 28 |
| 112 | 4 | 13 | 217 | 16 | 25 | 311 | 1 | 10 |
| 114 | 19 | 28 | 220 | 19 | 19 | 318 | 10 | 10 |
| 115 | 16 | 16 | 221 | 7 | 13 | 322 | 7 | 13 |
| 121 | 1 | 16 | 223 | 7 | 13 | 325 | 1 | 10 |
| 122 | 1 | 16 | 232 | 1 | 16 | 332 | 1 | 10 |
| 124 | 1 | 10 | 239 | 1 | 1 | 334 | 13 | 16 |
| 128 | 7 | 19 | 240 | 1 | 16 | | | |
| 130 | 7 | 19 | 244 | 22 | 25 | | | |

B.2. Escenario 2: 200 metros

- **Caso 1: voz**

En la tabla B.10 se registró la capacidad obtenida en cada una de las pruebas realizadas, para una microcelda de 200 metros y una SINR objetivo de -20dB. Se observa que en la mayoría de las simulaciones realizadas el porcentaje de usuarios atendidos con GT supera al valor obtenido con IPC, sin embargo en 3 simulaciones el porcentaje en ambos algoritmos fue igual.

Tabla B. 10. Capacidad con control de potencia. Escenario 2 – voz.

| Prueba No | Total usuarios | Usuarios conectados GT | Usuarios conectados GT(%) | Usuarios conectados IPC | Usuarios conectados IPC(%) |
|-----------|----------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1 | 53 | 42 | 79,245 | 39 | 73,584 |

| | | | | | |
|-----------|----|----|--------|----|--------|
| 2 | 73 | 54 | 73,972 | 41 | 56,164 |
| 3 | 65 | 51 | 78.461 | 49 | 75.384 |
| 4 | 73 | 33 | 45,205 | 31 | 42,465 |
| 5 | 48 | 34 | 70,833 | 34 | 70,833 |
| 6 | 64 | 49 | 76.562 | 46 | 71.875 |
| 7 | 55 | 42 | 76,363 | 32 | 58,181 |
| 8 | 60 | 47 | 78,333 | 47 | 78,333 |
| 9 | 62 | 41 | 66,129 | 35 | 56,451 |
| 10 | 60 | 31 | 51,666 | 31 | 51,666 |

Los resultados de capacidad obtenidos en cada una de las femtoceldas localizadas al interior de la microcelda para el caso de análisis presentado en el capítulo 4 (prueba N° 2) fueron registrados en la tabla B.11. Es posible ver que ambos algoritmos atendieron el mismo número de FU, lo que indica que la diferencia en la capacidad total de ambos algoritmos radica en que el modelo basado en GT permite atender más micro usuarios.

Tabla B. 11. Capacidad de cada FAP con control de potencia. Prueba 2.

| N° FAP | FU Asociados | FU Atendidos GT-IPC |
|---------------|---------------------|----------------------------|
| 1 | 1 | 0 |
| 2 | 1 | 1 |
| 3 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 |
| 5 | 1 | 1 |
| 6 | 1 | 1 |
| 7 | 2 | 0 |
| 8 | 2 | 2 |
| 9 | 3 | 1 |
| 10 | 1 | 1 |
| 11 | 0 | 0 |
| 12 | 3 | 3 |
| 13 | 4 | 1 |
| 14 | 3 | 3 |
| 15 | 2 | 2 |
| 16 | 1 | 1 |
| 17 | 4 | 2 |
| 18 | 0 | 0 |
| 19 | 1 | 1 |
| 20 | 4 | 4 |
| 21 | 4 | 2 |
| 22 | 4 | 4 |
| 23 | 0 | 0 |
| 24 | 1 | 1 |
| 25 | 1 | 1 |

| | | |
|--------------|----|----|
| 26 | 2 | 2 |
| 27 | 3 | 3 |
| 28 | 1 | 1 |
| 29 | 2 | 1 |
| 30 | 1 | 1 |
| 31 | 1 | 0 |
| 32 | 1 | 1 |
| Total | 55 | 41 |

En la tabla B.12 fueron registradas las potencias de transmisión encontradas por los algoritmos para cada FU atendido dentro de la microcelda, correspondientes a la prueba N° 2 (caso de análisis). Se aprecia que la mayoría de FU presentaron valores de potencia menores con el algoritmo basado en GT que con IPC, por esta razón con GT se reduce la interferencia sobre los mU permitiendo atender más usuarios de este tipo. Adicionalmente, se aprecia que con GT las potencias no superan los 16dBm mientras que con IPC alcanzan los 31dBm.

Tabla B. 12. Potencias asignadas por los algoritmos a los FU atendidos. Prueba 2.

| FU | Potencia con GT (dBm) | Potencia con IPC (dBm) |
|-----------|------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 16 | 31 |
| 23 | 13 | 28 |
| 28 | 13 | 28 |
| 31 | 16 | 28 |
| 46 | 1 | 22 |
| 50 | 10 | 22 |
| 54 | 13 | 31 |
| 64 | 13 | 31 |
| 71 | 10 | 28 |
| 75 | 10 | 28 |
| 89 | 16 | 31 |
| 114 | 4 | 28 |
| 132 | 16 | 7 |
| 135 | 13 | 28 |
| 139 | 1 | 22 |
| 154 | 4 | 13 |
| 175 | 7 | 22 |
| 179 | 7 | 19 |
| 187 | 7 | 19 |
| 256 | 1 | 13 |
| 265 | 10 | 19 |
| 300 | 16 | 13 |
| 310 | 1 | 10 |
| 311 | 4 | 22 |
| 322 | 1 | 7 |
| 340 | 16 | 16 |
| 341 | 13 | 16 |
| 359 | 4 | 13 |
| 362 | 4 | 16 |
| 375 | 10 | 22 |
| 377 | 10 | 16 |
| 380 | 1 | 13 |
| 399 | 7 | 19 |
| 410 | 13 | 25 |
| 414 | 1 | 16 |
| 449 | 16 | 10 |
| 453 | 16 | 7 |
| 479 | 13 | 13 |
| 482 | 7 | 19 |
| 483 | 7 | 10 |

- **Caso 2: Datos**

La capacidad obtenida en las pruebas realizadas para una microcelda de 200 metros de radio y una SINR objetivo de -14dB se registraron en la tabla B.13.

Tabla B. 13. Capacidad con control de potencia. Escenario 2 – datos.

| Prueba No | Total Usuarios | Usuarios Conectados GT | Usuarios Conectados GT(%) | Usuarios Conectados IPC | Usuarios Conectados IPC(%) |
|-----------|----------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1 | 60 | 31 | 51,666 | 31 | 51,666 |
| 2 | 73 | 29 | 39,726 | 29 | 39,726 |
| 3 | 48 | 20 | 41,666 | 17 | 35,416 |
| 4 | 73 | 43 | 58,904 | 30 | 41,0958 |
| 5 | 60 | 26 | 43,333 | 21 | 35 |
| 6 | 48 | 20 | 41,666 | 17 | 35,416 |
| 7 | 67 | 40 | 70,149 | 47 | 59,701 |
| 8 | 68 | 33 | 48,529 | 22 | 32,352 |
| 9 | 76 | 46 | 60,526 | 41 | 53,947 |
| 10 | 60 | 26 | 43,333 | 25 | 41,666 |

Los valores de capacidad obtenidos en las femtoceldas para el caso de análisis presentado en el capítulo 4 (prueba N° 7) se registraron en la tabla B.14.

Tabla B. 14. Capacidad de cada FAP con control de potencia. Prueba 7.

| N° FAP | FU Asociados | FU Atendidos |
|--------|--------------|--------------|
| 1 | 1 | 0 |
| 2 | 0 | 0 |
| 3 | 3 | 3 |
| 4 | 3 | 2 |
| 5 | 5 | 4 |
| 6 | 2 | 2 |
| 7 | 0 | 0 |
| 8 | 1 | 1 |
| 9 | 0 | 0 |
| 10 | 1 | 0 |
| 11 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 |
| 13 | 1 | 0 |
| 14 | 5 | 5 |
| 15 | 4 | 4 |
| 16 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 0 |
| 18 | 1 | 0 |
| 19 | 1 | 0 |

| | | |
|--------------|----|----|
| 20 | 1 | 0 |
| 21 | 1 | 0 |
| 22 | 3 | 3 |
| 23 | 1 | 1 |
| 24 | 3 | 3 |
| 25 | 1 | 1 |
| 26 | 2 | 2 |
| Total | 40 | 31 |

Las potencias de transmisión encontradas por los algoritmos para cada FU atendido dentro de la microcelda, correspondientes a la prueba N° 7 fueron registrados en la tabla B.15. Se aprecia que de 31 FU atendidos, 18 presentan valores de potencia menores con el algoritmo basado en GT que con IPC, mientras que solo a 4 UE se les asignó una menor potencia con la implementación de IPC, por esta razón con GT se reduce la interferencia sobre los mU permitiendo atender más usuarios de este tipo. A los usuarios restantes los algoritmos les asignaron la misma potencia. Adicionalmente, se observa que con GT las potencias no superan los 19dBm mientras que con IPC alcanzan 31dBm por lo que algunos transmiten con más potencia de la que necesitan causando más interferencia.

Tabla B. 15. Potencias asignadas por los algoritmos a los FU atendidos. Prueba 7.

| FU | Potencia con GT (dBm) | Potencia con IPC (dBm) |
|------------|------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 16 | 31 |
| 23 | 1 | 13 |
| 28 | 7 | 13 |
| 31 | 19 | 19 |
| 46 | 13 | 31 |
| 50 | 19 | 28 |
| 54 | 19 | 22 |
| 64 | 19 | 22 |
| 71 | 4 | 13 |
| 75 | 7 | 16 |
| 89 | 13 | 19 |
| 114 | 10 | 10 |
| 132 | 7 | 7 |
| 135 | 19 | 16 |
| 139 | 19 | 25 |
| 154 | 10 | 22 |

| | | |
|-----|----|----|
| 175 | 10 | 10 |
| 179 | 7 | 7 |
| 187 | 16 | 16 |
| 256 | 7 | 16 |
| 265 | 19 | 16 |
| 300 | 19 | 25 |
| 310 | 4 | 13 |
| 311 | 10 | 22 |
| 322 | 1 | 7 |
| 340 | 13 | 4 |
| 341 | 4 | 4 |
| 359 | 13 | 4 |
| 362 | 13 | 4 |
| 375 | 4 | 4 |
| 377 | 7 | 7 |

- **Caso 3: voz y datos**

En la tabla B.16 se registraron los resultados de capacidad obtenidos para las 10 pruebas realizadas teniendo usuarios con diferentes requisitos de SINR. Se observa que en 9 pruebas la capacidad resultante con GT supera a la obtenida con IPC mientras que solo en una ambos algoritmos atienden igual número de usuarios.

Tabla B. 16. Capacidad con control de potencia. Escenario 2 – voz y datos.

| Prueba No | Total usuarios | Usuarios conectados GT | Usuarios conectados GT(%) | Usuarios Conectados IPC | Usuarios conectados IPC(%) |
|-----------|----------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1 | 58 | 31 | 53,448 | 20 | 37,419 |
| 2 | 60 | 37 | 61,666 | 19 | 31,666 |
| 3 | 59 | 33 | 55,932 | 33 | 55,932 |
| 4 | 64 | 41 | 64,062 | 26 | 40,625 |
| 5 | 57 | 24 | 42,105 | 11 | 19,298 |
| 6 | 55 | 40 | 72,727 | 38 | 69,090 |
| 7 | 76 | 36 | 47,368 | 25 | 32,894 |
| 8 | 58 | 40 | 68,965 | 31 | 53,448 |
| 9 | 62 | 44 | 70,967 | 25 | 35,227 |
| 10 | 55 | 33 | 60 | 24 | 40 |

Para cada una de las pruebas realizadas se obtuvieron los resultados de capacidad de cada una de las femtoceldas dentro del área de cobertura de la mBS. Para el caso de análisis presentado en el capítulo 4 (prueba N° 8) dichos resultados se consignaron en la tabla B.8. Se observa que ambos modelos de control de potencia atendieron el mismo número de FU, es decir que la diferencia en la capacidad total obtenida por los algoritmos radica en que el modelo basado en GT permite atender más micro usuarios.

Tabla B. 17. Capacidad de cada FAP con control de potencia. Prueba 8.

| Nº FAP | FU Asociados | FU Atendidos |
|---------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 1 | 1 |
| 4 | 4 | 4 |
| 5 | 0 | 0 |
| 9 | 2 | 1 |
| 11 | 3 | 3 |
| 16 | 0 | 0 |
| 28 | 1 | 1 |
| 30 | 2 | 1 |
| 36 | 0 | 0 |
| 61 | 1 | 0 |
| 69 | 2 | 2 |
| 70 | 1 | 1 |
| 78 | 2 | 1 |
| 91 | 2 | 2 |
| 99 | 0 | 0 |
| 101 | 2 | 1 |
| 105 | 3 | 3 |
| 114 | 3 | 3 |
| 117 | 0 | 0 |
| 122 | 1 | 1 |
| 124 | 4 | 2 |
| 134 | 4 | 1 |
| 135 | 2 | 0 |
| 150 | 1 | 1 |
| Total | 41 | 29 |

En la tabla B.18 se registraron las potencias de transmisión encontradas por los algoritmos para cada FU atendido dentro de la microcelda, correspondientes a la prueba N° 8. Se aprecia que de 29 FU atendidos, 15 presentan valores de potencia menores con el algoritmo basado en GT que con IPC, mientras que solo a 3 UE se les asignó una menor potencia con la implementación de IPC, por esta razón con GT se reduce la interferencia sobre los mU.

Tabla B. 18. Potencias asignadas por los algoritmos a los FU atendidos. Prueba 8.

| FU | Potencia con GT (dBm) | Potencia con IPC (dBm) |
|-----------|------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 19 | 16 |
| 16 | 19 | 28 |
| 23 | 13 | 16 |
| 28 | 7 | 13 |
| 61 | 19 | 19 |
| 79 | 1 | 1 |
| 128 | 1 | 1 |
| 144 | 19 | 1 |
| 158 | 16 | 16 |
| 170 | 1 | 1 |
| 201 | 1 | 1 |
| 204 | 16 | 16 |
| 206 | 1 | 1 |
| 207 | 7 | 4 |
| 212 | 1 | 1 |
| 253 | 13 | 19 |
| 285 | 13 | 19 |
| 287 | 10 | 13 |
| 290 | 19 | 22 |
| 301 | 1 | 10 |
| 304 | 4 | 13 |
| 313 | 10 | 10 |
| 318 | 19 | 16 |
| 392 | 13 | 22 |
| 400 | 16 | 19 |
| 404 | 10 | 13 |
| 406 | 1 | 16 |
| 411 | 13 | 13 |
| 415 | 13 | 19 |

REFERENCIAS

- [1] Cisco, "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2014-2019 White Paper," vol. 2015, no. 4, pp. 3-4, 2015.
- [2] Qualcomm Inc. (2011, Jan). LTE Advanced: Heterogeneous Networks [Online]. Available: <https://www.qualcomm.com/documents/lte-heterogeneous-networks>
- [3] J. M. Huidobro (2013, Nov). Redes heterogéneas. La solución para LTE. Antena [Online]. 198. pp. 61–64. Available: <http://www.coitt.es/res/revistas/11a%20Redes.pdf>
- [4] J. Valenzuela, O. Sallent, R. A. Comes. (2003). Principios de comunicaciones móviles [eBook version]. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=GAf5BKJOfUwC&printsec>.
- [5] Y. Zhang, "The Cellular Concept-System Design Fundamentals," pp. 57–61, 2001.
- [6] N. Tripathi, J. H. Reed, "Fundamental concepts of cellular communications" in Cellular Communications: A Comprehensive and Practical Guide Piscataway, NJ: Wiley, 2014.
- [7] R. A. Comes, F. B. Alvarez, F. Casadeball, et al. "Arquitectura del Sistema LTE" en LTE. Nuevas tendencias en comunicaciones, Fundación Vodafone España ,2010.
- [8] G. Mullet, Wireless Telecommunications Systems and Networks, Springfield, MA: Cengage Learning, 2005.
- [9] M. Harris, "Think Small: Micro, Pico and Femto cell sites", Unison, pp. 1–3, 2011.
- [10] M. Arif, I. M. Yameen, M. A. Matin, "Femtocell Suburban Deployment in LTE Networks," Int. J. Inf. Electron. Eng., vol. 3, no. 2, pp. 208–212, 2013.
- [11] N. Nagashree, V. Rao, H. Shanavas, "Femto Cells- A New Generation Cellular Stations", Universal Journal of Communications and Network, vol. 1(1), pp. 9-15, 2013.

- [12] S. A. Saad, M. Ismail, R. Nordin, "A Survey on Power Control Techniques in Femtocell Networks", *Journal of Communications*, vol. 8, No 12, pp. 845-847, 2013.
- [13] R. Q. Hu, Y. Qian, *Heterogeneous Cellular Networks*. 2013.
- [14] Q. S. Quek, G. de la Roche, İ. Güvenç, M. Kountouris. (2013, May. 02). *Small Cell Networks: Deployment, PHY Techniques, and Resource Management* [eBook version]. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=raYA5wDbtFwC&printsec>.
- [15] Y. Liu, X. Shen. (2014). *Cognitive Resource Management for Heterogeneous Cellular Networks* [eBook version]. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=cxEqBAAAQBAJ&pg>
- [16] 4G Americas, *Developing and Integrating a High Performance HET-NET*, pp. 6-12, Oct. 2012.
- [17] Fujitsu Network Communications Inc., *High-Capacity Indoor Wireless Solutions: Picocell or Femtocell?*, pp. 1-3, 2013.
- [18] Freescale Semiconductor, Inc., *Jump Start Your Small Cell Equipment Design*, pp. 2-5, 2014.
- [19] E. Hossain, L. B. Le, D. Niyato. (2013, Nov. 25). *Radio Resource Management in Multi-Tier Cellular Wireless Networks* [eBook version]. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=gpk3AgAAQBAJ&printsec>.
- [20] D. T. Ngo, T. Le-Ngoc, *Architectures of Small-Cell Networks and Interference Management*, SpringerBriefs in Computer Science, 2014.
- [21] V.M. Quintero, "Evaluación del desempeño de sistemas de comunicación móvil celular de tercera generación-WCDMA", M.S. thesis, Dept. Telecommun, Cauca Univ., Popayán, Colombia, 2010.
- [22] J. Valdés, M. Martínez, "Análisis de interferencia co-canal en redes heterogéneas", Thesis, Dept. Telecommun, Cauca Univ., Popayán, Colombia, 2013.
- [23] D.L. Rodriguez. (2001). *Sistemas Inalámbricos de Comunicación Personal* [eBook version]. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=Gvh1UA0yHJ4C&printsec>

- [24] J. Perez Romero, O. Sallent, et al. "RRM Algorithms" in *Radio Resource Management Strategies in UMTS*, 1st ed. Chichester, England: Wiley, 2005, pp. 288-295.
- [25] H. Kaaranen, A. Ahtiainen, et al. "UMTS Radio Access Network" in *UMTS Networks: Architecture, Mobility and Services*, 2nd ed. Chichester, England: Wiley, 2005, pp 99- 120.
- [26] Z. Han, K. J. Ray Liu, "Power Control" in *Resource Allocation for Wireless Networks: Basics, Techniques, and Applications*, 1st ed. New York: Cambridge Univ Press, 2008, pp. 55-168.
- [27] K. Pahlavan, P. Krishnamurthy "Wireless Network Operations" in *Principles of Wireless Access and Localization*, 1st ed. New York: Wiley, 2013.
- [28] D.L. Ibarra, P.A. Morales, "Determinación de la cobertura de un sistema de comunicaciones inalámbrico que utiliza control de potencia basado en el algoritmo de Foschini", thesis, Dept. Telecommun, Cauca Univ., Popayán, Colombia, 2014.
- [29] D. L. Rodríguez, "Control de potencia en sistemas de comunicaciones móviles terrestres" in *Sistemas inalámbricos de comunicación personal*, México: Marcombo, 2001.
- [30] J. Perez Romero, O. Sallent, "Fundamentos de diseño y gestión de sistemas de comunicaciones móviles celulares", 1st ed. Cataluña, España, Iniciativa Digital Politécnica, 2012, pp. 63-65.
- [31] V. Quintero, "Evaluación del Desempeño de Sistemas de Comunicación Móvil Celular de Tercera Generación – WCDMA", M.S. thesis, Dept. Telecommun, Cauca Univ., Popayán, Colombia, 2010.
- [32] Sudheer A. Grandhi, Rajiv Vijayan, and David J. Goodman, "Distributed Power Control in Cellular Radio Systems", *IEEE Transactions On Communications*, vol. 42, no. 2/3/4, pp. 226-228, February/March/April 1994.
- [33] Wang Hongyu; Huang Aiging; Hu Rong; GuWeikang, "Balanced distributed power control", in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2000. PIMRC 2000. The 11th IEEE International Symposium on*, vol.2, no., pp.1415-1419 vol.2, 2000.
- [34] Tsern-Huei Lee; Jen-Cheng Lin, "A fully distributed power control algorithm for cellular mobile systems," in *Selected Areas in Communications*, *IEEE Journal on* , vol.14, no.4, pp.692-697, May 1996.

- [35] M. Rintamäki, "Adaptive Power Control in CDMA Cellular Communication System," Ph.D. dissertation, Helsinki University of Technology, Finland, 2005.
- [36] Grandhi, S.A.; Zander, J., "Constrained power control in cellular radio systems," in *Vehicular Technology Conference*, 1994 IEEE 44th , vol., no., pp.824-828 vol.2, 8-10 Jun 1994.
- [37] F. Berggren, R. Jäntti, and S.-L.Kim, "A generalized algorithm for constrained power control with capability of temporary removal," in *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 50, no. 6, pp. 1604–1612, Nov. 2001.
- [38] Ariyavisitakul, S., "SIR-based power control in a CDMA system," in *Global Telecommunications Conference*, 1992. Conference Record., *GLOBECOM '92. Communication for Global Users.*, IEEE , vol., no., pp.868-873 vol.2, 6-9 Dec 1992.
- [39] S.U. Ufoaroh, C. O. Ohaneme, et al. "Improving the Performance of CDMA Mobile Network Using Adaptive Power Control Techniques" in *International Journal of Advanced Computer Technology (IJACT)*, vol.2, no.1, pp.15-21, Feb 2013.
- [40] I. Parachino, S. Zara, F. Patrone, "Cooperative game theory and its application to natural, environmental and water resource issues" *World Bank Policy Research Paper .* Policy Research Working Paper Series, The World Bank, 2006.
- [41] V. Mirama, "Control de Potencia Basado en Teoría de Juegos", M.S. thesis, Dept. Telecommun, Cauca Univ., Popayán, Colombia, 2012.
- [42] D. Berwanger. (2010,Dic 26). *Introduction to Strategic Games* [Online]. Available: <http://www.lsv.ens-cachan.fr/>
- [43] Al-Gumaei, Y. A. Noordin, et al. "A New SIR-Based Sigmoid Power Control Game in Cognitive Radio Networks" in *PLoS ONE*, vol. 9, no 10, Oct 2014.
- [44] E. Biglieri, A. J. Goldsmith, et al. "The concept of cognitive radio" in *Principles of Cognitive Radio* , 1st ed, New York: Cambridge University Press, 2013
- [45] Mingbo Xiao; Shroff, N.B.; Chong, E.K.P., "A utility-based power-control scheme in wireless cellular systems," in *Networking*, IEEE/ACM Transactions on , vol.11, no.2, pp.210-221, Apr 2003.
- [46] Koskie, Sarah; Gajic, Z. "A nash game algorithm for SIR-based power control in 3G wireless CDMA networks", in *Networking IEEE/ACM Transactions on*, vol. 13, no. 5, pp.1017 – 1026, Oct. 2005

[47] European Telecommunications Standards Institute, «Selection Procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS,» Valbonne, Francia, ETSI, 1998, pp. 39-41.

[48] O.M. Ülgen, J.J. Black, B. Johnsonbaugh and R. Klunge, "Simulation Methodology - a Practitioner's Perspective", *International Journal of Industrial Engineering, Applications and Practice I*, 1994.

[49] V. Wojcik, "Steps in Simulation and Model Building," in *Simulation Methodology –Discrete Event Simulation*, ed Ontario, Canada, 2003.