

**ANÁLISIS DE COBERTURA DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES MÓVIL E  
INALÁMBRICO EMPLEANDO CONTROL IDEAL DE POTENCIA Y MOVILIDAD EN  
LOS USUARIOS**



**Julio Elmer Londoño García  
Ricardo Velasco Arcos**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES  
POPAYÁN, NOVIEMBRE 2014**

**ANÁLISIS DE COBERTURA DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES MÓVIL E  
INALÁMBRICO EMPLEANDO CONTROL IDEAL DE POTENCIA Y MOVILIDAD EN  
LOS USUARIOS**



**Julio Elmer Londoño García  
Ricardo Velasco Arcos**

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

**Director  
Víctor Fabián Miramá Pérez**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES  
POPAYÁN, NOVIEMBRE 2014**

# CONTENIDO

|   | Pág. |
|---|------|
| 1. CONCEPTOS GENERALES.....   | 1    |
| 1.1 INTRODUCCION .....  | 1    |
| 1.2 ELEMENTOS BÁSICOS DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN MÓVIL E<br>INALÁMBRICO..... | 1    |
| 1.2.1 Estación Base.....  | 2    |
| 1.2.2 Centro de Control .....   | 2    |
| 1.2.3 Estación Móvil.....   | 2    |
| 1.3 COBERTURA.....  | 3    |
| 1.3.1 Macrocelda .....  | 3    |
| 1.3.2 Microcelda .....  | 4    |
| 1.3.3 Picocelda.....  | 4    |
| 1.3.4 Femtoceldas .....   | 4    |
| 1.4 INTERFERENCIA EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES E<br>INALÁMBRICOS. .... | 5    |
| 1.4.1 Interferencia Co-Canal.....   | 5    |
| 1.4.2 Interferencia de Canal Adyacente.....                                     | 6    |
| 1.4.3 Interferencia de Acceso Múltiple.....                                     | 7    |
| 1.4.4 Efecto Cerca-Lejos .....  | 8    |
| 1.5 GESTION DE RECURSOS RADIO.....  | 9    |
| 1.5.1 Procedimientos dentro de La Gestión de Recursos Radio .....               | 9    |
| 1.5.1.1 Control de Admisión .....   | 10   |
| 1.5.1.2 Control de Carga .....  | 11   |
| 1.5.1.3 Planificador de Paquetes.....   | 11   |
| 1.5.1.4 Control de Traspaso .....   | 11   |
| 1.5.1.5 Control de Potencia .....   | 12   |
| 2. DISEÑO DEL MODELO DE SIMULACIÓN .....  | 14   |
| 2.1 PROCESO DE DESARROLLO DE UNA SIMULACIÓN .....                               | 14   |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 2.2     | DEFINICIÓN DEL SISTEMA .....  | 14 |
| 2.3     | ANÁLISIS DEL SISTEMA .....  | 17 |
| 2.3.1   | Estado del Sistema .....  | 18 |
| 2.3.2   | Modelo de Control Ideal de Potencia.....  | 19 |
| 2.3.3   | Modelo de Movilidad de Usuario.....   | 22 |
| 2.4     | FORMULACIÓN DEL MODELO DEL SISTEMA.....   | 27 |
| 2.4.1   | Diagrama en Bloques del Sistema.....  | 27 |
| 2.4.2   | Diagrama de Flujo General del Sistema .....   | 28 |
| 2.4.3   | Diagrama de Flujo del Modelo de Movilidad de Usuario.....                             | 30 |
| 2.4.4   | Diagrama de Flujo del Control Ideal de Potencia.....                                  | 32 |
| 2.5     | SELECCIÓN DEL LENGUAJE .....  | 32 |
| 2.6     | CODIFICACIÓN DEL LENGUAJE .....   | 33 |
| 2.7     | VALIDACIÓN.....   | 34 |
| 2.8     | EXPERIMENTACIÓN.....  | 34 |
| 2.9     | MONITOREO Y CONTROL .....   | 34 |
| 3.      | PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS.....   | 36 |
| 3.1     | DESCRIPCION GENERAL DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN .....                                 | 36 |
| 3.2     | PLAN DE PRUEBAS .....   | 37 |
| 3.3     | RESULTADOS .....  | 40 |
| 3.3.1   | Escenario 1: Con Control Ideal de Potencia (IPC) y sin Movilidad en los Usuarios..... | 40 |
| 3.3.1.1 | Caso 1.1 .....  | 40 |
| 3.3.1.2 | Caso 1.2 .....  | 45 |
| 3.3.1.3 | Caso 1.3 .....  | 50 |
| 3.3.2   | Escenario 2: Control Ideal de Potencia (IPC) y Movilidad en los Usuarios. ....        | 54 |
| 3.3.2.1 | Caso 2.1 .....  | 54 |
| 3.3.3   | Escenario 3: Sin Control Ideal de Potencia (IPC) y con Movilidad en los Usuarios..... | 59 |
| 3.3.3.1 | Caso 3.1 .....  | 59 |
| 3.3.4   | Comparación entre Escenarios con 100 Usuarios y SINR Objetivo de -20 dB.....          | 63 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 4.  | CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....   | 65 |
| 4.1 | INTRODUCCION.....   | 65 |
| 4.2 | CONCLUSIONES .....  | 65 |
| 4.3 | TRABAJOS FUTUROS.....   | 67 |
|     | REFERENCIAS .....   | 68 |
|     | APÉNDICES .....   | 71 |
|     | APÉNDICE A. Escenario 2: Control Ideal de Potencia (IPC) y Movilidad en los Usuarios.....         | 71 |
|     | A.1. Caso 2.2.....  | 71 |
|     | A.2. Caso 2.3.....  | 75 |
|     | APÉNDICE B. Escenario 3: Sin Control Ideal de Potencia (IPC) y con Movilidad en los Usuarios..... | 80 |
|     | B.1. Caso 3.2.....  | 80 |
|     | B.2. Caso 3.3.....  | 84 |
|     | APÉNDICE C. ESCENARIO 4: CON Y SIN MOVILIDAD EN LOS USUARIOS.                                     | 87 |
|     | C.1. Caso 4.1 .....   | 87 |
|     | C.2. Caso 4.2 .....   | 93 |

# LISTA DE TABLAS

Pág.

|  |    |
|--|----|
| Tabla 2.1 Características del Escenario de Simulación. ....                                  | 18 |
| Tabla 3.1 Plan de Pruebas de Simulación. ....  | 39 |
| Tabla 3.2 Estadísticas de las variables analizadas para el caso de simulación 1.1.<br>.....  | 44 |
| Tabla 3.3 Estadísticas de las variables analizadas para el caso de simulación 1.2.<br>.....  | 49 |
| Tabla 3.4 Estadísticas de las variables analizadas para el caso de simulación 1.3.<br>.....  | 54 |
| Tabla 3.5 Estadísticas de las variables analizadas para el caso de simulación 2.1.<br>.....  | 59 |
| Tabla 3.6 Estadísticas de las variables analizadas para el caso de simulación 3.1.<br>.....  | 63 |
| Tabla 3.7 Comparación entre Escenarios para 100 Usuarios y SINR objetivo de -<br>20 dB. .... | 64 |

# LISTA DE FIGURAS

Pág.

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 Estructura Básica de un Sistema de Comunicación Móvil e inalámbrico. ....                                   | 1  |
| Figura 1.2 Celdas en los Sistemas Móviles e Inalámbricos. Adaptado de [2]. ....  | 3  |
| Figura 1.3 Interferencia Co-Canal (CCI). ....  | 6  |
| Figura 1.4 Interferencia de Múltiple Acceso Intracelular e Intercelular en el enlace de subida. Adaptado de [21]. .... | 8  |
| Figura 1.5 Efecto Cerca-Lejos en una celda. ....   | 9  |
| Figura 1.6 Objetivos de la Gestión de Recursos Radio. Adaptado de [24]. ....   | 10 |
| Figura 1.7 Proceso de Handover en Sistemas Móviles e Inalámbricos. Adaptado de [26]. ....                              | 12 |
| Figura 1.8 Control de Potencia en el Enlace de Subida (UL). ....   | 13 |
| Figura 2.1 Diagrama de Flujo de la Metodología Empleada para la Simulación. Adaptado de [28]. ....                     | 15 |
| Figura 2.2 Escenario de Simulación. ....   | 16 |
| Figura 2.3 Ajuste de la Posición del Usuario según el Modelo de Movilidad. ....  | 25 |
| Figura 2.4 Ajuste de la Dirección del movimiento del Usuario según el Modelo de Movilidad. ....                        | 27 |
| Figura 2.5 Diagrama en Bloques del Sistema. ....   | 28 |
| Figura 2.6 Diagrama de Flujo General del Sistema. ....   | 29 |
| Figura 2.7 Diagrama de Flujo Modelo de Movilidad de Usuario. ....  | 31 |
| Figura 2.8 Diagrama de Flujo del Control Ideal de Potencia (IPC). ....   | 33 |
| Figura 3.1 Escenario de Simulación con 100 Usuarios. ....  | 37 |
| Figura 3.2 Potencias de Transmisión de Usuario al Interior de la Celda. ....   | 41 |
| Figura 3.3 Potencias de Transmisión de Usuarios Conectados a la BS. ....   | 41 |
| Figura 3.4 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida. ....  | 42 |
| Figura 3.5 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación. ....         | 43 |
| Figura 3.6 Probabilidad de Degradación del Sistema. ....   | 43 |
| Figura 3.7 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda. ....                 | 44 |
| Figura 3.8 Potencias de Transmisión de Usuario al Interior de la Celda. ....   | 46 |
| Figura 3.9 Potencias de Transmisión de Usuarios Conectados a la BS. ....   | 46 |
| Figura 3.10 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida. ....   | 47 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.11 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación..... | 47 |
| Figura 3.12 Probabilidad de Degradación del Sistema. ....  | 48 |
| Figura 3.13 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda.....         | 49 |
| Figura 3.14 Potencias de Transmisión de Usuario al Interior de la Celda.....                                   | 51 |
| Figura 3.15 Potencias de Transmisión de Usuarios Conectados a la BS. ....                                      | 51 |
| Figura 3.16 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida.....  | 52 |
| Figura 3.17 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación..... | 52 |
| Figura 3.18 Probabilidad de Degradación del Sistema. ....  | 53 |
| Figura 3.19 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda.....         | 53 |
| Figura 3.20 Potencias de Transmisión de Usuario al Interior de la Celda.....                                   | 55 |
| Figura 3.21 Potencias de Transmisión de Usuarios Conectados a la BS. ....                                      | 56 |
| Figura 3.22 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida.....  | 56 |
| Figura 3.23 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación..... | 57 |
| Figura 3.24 Probabilidad de Degradación del Sistema. ....  | 57 |
| Figura 3.25 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda.....         | 58 |
| Figura 3.26 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida.....  | 60 |
| Figura 3.27 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación..... | 60 |
| Figura 3.28 Probabilidad de Degradación del Sistema. ....  | 61 |
| Figura 3.29 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda.....         | 62 |



# LISTA DE ACRÓNIMOS

|             |   |
|-------------|---|
| <b>3G</b>   | Tercera Generación<br>( <i>3rd Generation</i> )   |
| <b>3GPP</b> | Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación<br>( <i>3rd Generation Partnership Project</i> )    |
| <b>4G</b>   | Cuarta Generación<br>( <i>4th Generation</i> )  |
| <b>AC</b>   | Control de Admisión<br>( <i>Admission Control</i> )   |
| <b>ACI</b>  | Interferencia de Canal Adyacente<br>( <i>Adjacent Channel Interference</i> )                                  |
| <b>ACIR</b> | Relación de potencia Interferente del Canal Adyacente<br>( <i>Adjacent Channel Interference power Ratio</i> ) |
| <b>BS</b>   | Estación Base<br>( <i>Base Station</i> )  |
| <b>BW</b>   | Ancho de Banda<br>( <i>Band Width</i> )   |
| <b>CC</b>   | Centro de Control<br>( <i>Control Center</i> )  |
| <b>CCI</b>  | Interferencia Co-Canal<br>( <i>Co-Channel Interference</i> )  |
| <b>CDMA</b> | Acceso Múltiple por División de Código<br>( <i>Code Division Multiple Access</i> )                            |
| <b>DL</b>   | Enlace de Bajada<br>( <i>DownLink</i> )   |
| <b>DSL</b>  | Línea de Abonado Digital<br>( <i>Digital Subscriber Line</i> )  |
| <b>DSSS</b> | Espectro Ensanchado por Secuencia Directa<br>( <i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> )                       |
| <b>eNB</b>  | Nodo B Evolucionado<br>( <i>Evolved Node B</i> )  |

|             |   |
|-------------|---|
| <b>ETSI</b> | Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeo<br>( <i>European Telecommunications Standards Institute</i> ) |
| <b>HC</b>   | Control de Traspaso<br>( <i>Handover Control</i> )  |
| <b>HNB</b>  | Nodo B de Hogar<br>( <i>Home Node B</i> )   |
| <b>HO</b>   | Traspaso<br>( <i>Handover</i> )   |
| <b>ICI</b>  | Interferencia Inter-Celda<br>( <i>Inter-Cell Interference</i> )   |
| <b>InCI</b> | Interferencia Intra-Celda<br>( <i>Intra-Cell Interference</i> )   |
| <b>IPC</b>  | Control Ideal de Potencia<br>( <i>Ideal Power Control</i> )   |
| <b>LC</b>   | Control de Carga<br>( <i>Load Control</i> )   |
| <b>LTE</b>  | Evolución a Largo Término<br>( <i>Long Term Evolution</i> )   |
| <b>MAI</b>  | Interferencia de Acceso Múltiple<br>( <i>Multiple Access Interference</i> )   |
| <b>MS</b>   | Estación Móvil<br>( <i>Mobile Station</i> )   |
| <b>MUD</b>  | Detección Multiusuario<br>( <i>Multi-User Detection</i> )   |
| <b>NB</b>   | NodoB<br>( <i>NodeB</i> )   |
| <b>PC</b>   | Control de Potencia<br>( <i>Power Control</i> )   |
| <b>PS</b>   | Planificador de Paquetes<br>( <i>Packet Scheduling</i> )  |
| <b>QoS</b>  | Calidad de Servicio<br>( <i>Quality of Service</i> )  |
| <b>RRCF</b> | Filtro de Raíz de Coseno Alzado<br>( <i>Root-Raised Cosine Filter</i> )   |

|             |  |
|-------------|--|
| <b>RRM</b>  | Gestión de Recursos Radio<br>( <i>Radio Resource Management</i> )                              |
| <b>RRU</b>  | Unidad de Recursos Radio<br>( <i>Radio Resource Unit</i> )                                     |
| <b>SINR</b> | Relación Señal a Interferencia más Ruido<br>( <i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i> ) |
| <b>SIR</b>  | Relación Señal a Interferencia<br>( <i>Signal to Interference Ratio</i> )                      |
| <b>TS</b>   | Ranura de Tiempo<br>( <i>Time Slot</i> )   |
| <b>UL</b>   | Enlace de Subida<br>( <i>UpLink</i> )  |

# LISTA DE TABLAS DE APÉNDICES

Pág.

|   |    |
|---|----|
| Tabla A.1 Estadísticas de las variables analizadas para el caso de simulación 2.2.<br>..... | 75 |
| Tabla A.2 Estadísticas de las variables analizadas para el caso de simulación 2.3.<br>..... | 80 |
| Tabla B.1 Estadísticas de las variables analizadas para el caso de simulación 3.2.<br>..... | 83 |
| Tabla B.2 Estadísticas de las variables analizadas para el caso de simulación 3.3.<br>..... | 87 |

# LISTA DE FIGURAS DE APÉNDICES

|   | Pág. |
|---|------|
| Figura A.1 Potencias de Transmisión de Usuario al Interior de la Celda. ....                                    | 72   |
| Figura A.2 Potencias de Transmisión de Usuarios Conectados a la BS. ....  | 72   |
| Figura A.3 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida. ....   | 73   |
| Figura A.4 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación. ....  | 73   |
| Figura A.5 Probabilidad de Degradación del Sistema. ....  | 74   |
| Figura A.6 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda. ....          | 75   |
| Figura A.7 Potencias de Transmisión de Usuario al Interior de la Celda. ....                                    | 76   |
| Figura A.8 Potencias de Transmisión de Usuarios Conectados a la BS. ....  | 77   |
| Figura A.9 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida. ....   | 78   |
| Figura A.10 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación. .... | 78   |
| Figura A.11 Probabilidad de Degradación del Sistema. ....   | 79   |
| Figura A.12 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda. ....         | 79   |
| Figura B.1 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida. ....   | 81   |
| Figura B.2 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación. ....  | 82   |
| Figura B.3 Probabilidad de Degradación del Sistema. ....  | 82   |
| Figura B.4 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda. ....          | 83   |
| Figura B.5 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida. ....   | 84   |
| Figura B.6 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación. ....  | 85   |
| Figura B.7 Probabilidad de Degradación del Sistema. ....  | 86   |
| Figura B.8 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda. ....          | 86   |
| Figura C.1 Potencias de Transmisión de Usuario al Interior de la Celda. ....                                    | 88   |
| Figura C.2 Potencias de Transmisión de Usuarios Conectados a la BS. ....  | 88   |
| Figura C.3 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida. ....   | 89   |

|   |    |
|---|----|
| Figura C.4 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación.....             | 90 |
| Figura C.5 Probabilidad de Degradación del Sistema. ....  | 90 |
| Figura C.6 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda.....                     | 91 |
| Figura C.7 Potencia de Transmisión Usuario 1 vs Iteraciones.....  | 92 |
| Figura C.8 Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) Usuario 1 vs Iteraciones. ....                                 | 92 |
| Figura C.9 Potencias de Transmisión de Usuario al Interior de la Celda.....   | 94 |
| Figura C.10 Potencias de Transmisión de Usuarios Conectados a la BS. ....   | 94 |
| Figura C.11 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida. ....  | 95 |
| Figura C.12 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación.....            | 95 |
| Figura C.13 Probabilidad de Degradación del Sistema.....  | 96 |
| Figura C. 14 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda.....                   | 96 |
| Figura C.15 Potencia de Transmisión de Tres Usuarios al interior de la celda vs Iteraciones. ....                         | 97 |
| Figura C.16 Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) de Tres Usuarios al interior de la celda VS Iteraciones. .... | 98 |



# 1. CONCEPTOS GENERALES

## 1.1 INTRODUCCION

En los últimos años, los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos han evolucionado rápidamente y se han convertido en una herramienta que permite brindar servicios de comunicaciones en lugares en los cuales era imposible acceder con los sistemas de comunicaciones fijos. El desarrollo de los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos está ligado a la demanda de los servicios que ofrecen y a la necesidad que tienen los usuarios de estar conectados en cualquier momento y lugar. Por ello han surgido sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos que buscan complacer las exigencias de los usuarios y brindarles mejores características tales como disponibilidad, calidad del servicio y velocidades altas de transmisión.

## 1.2 ELEMENTOS BÁSICOS DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN MÓVIL E INALÁMBRICO

Generalmente un sistema de comunicaciones móvil se compone por un grupo de Estaciones Base (BS, *Base Station*) administradas por un centro de control (CC, *Control Center*). Las Estaciones Base (BS) se encargan de ofrecer cobertura a un número dado de Estaciones Móviles (MS, *Mobile Station*) [1].

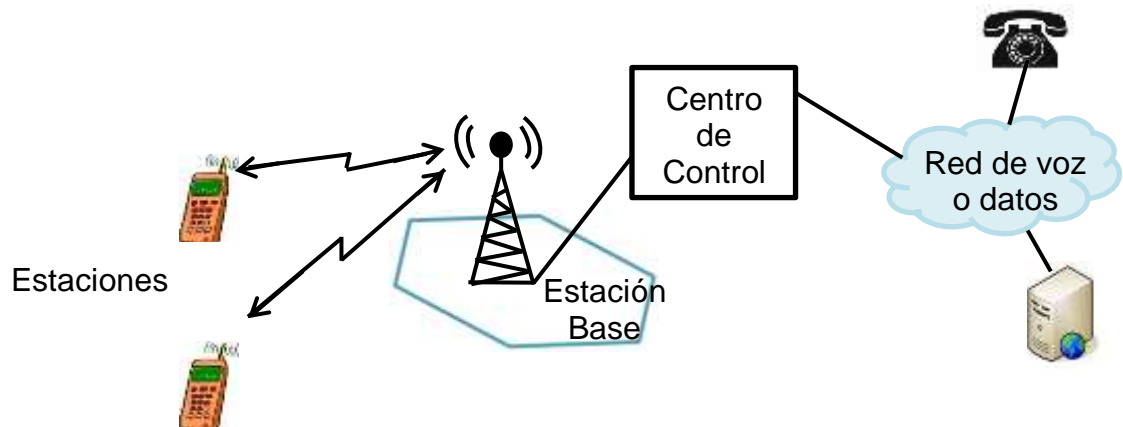


Figura 1.1 Estructura Básica de un Sistema de Comunicación Móvil e inalámbrico.



### 1.2.1 Estación Base

La Estación Base (BS) es el elemento encargado de gestionar todas las comunicaciones que se realizan en su zona de cobertura, conectando las diferentes Estaciones Móviles (MS). Dependiendo de la tecnología de red utilizada se conoce a la Estación Base (BS) con diferentes nombres, por ejemplo en redes de Tercera Generación (3G, *3rd Generation*) se le denomina NodoB (NB, *NodeB*) y en redes de de Cuarta Generación (4G, *4th Generation*) conocidas como redes de Evolución a Largo Término (LTE, *Long Term Evolution*) se le denomina NodoB Evolucionado (eNB, *Evolved NodeB*) [2].

La Estación Base (BS) está compuesta por un transmisor-receptor multicircuito situado generalmente sobre una torre de comunicaciones en una región elevada. El transmisor radía sobre un área determinada llamada celda o sector, en una celda el patrón de radiación de la antena es omnidireccional y en un sector la antena es directiva con un ancho de haz definido [3]. El tipo de antena y su ganancia dependerán del emplazamiento y la zona a la cual se brindará cobertura [4]. Las principales funciones de la Estación Base (BS) son: codificar, decodificar, encriptar, desencriptar, multiplexar y demultiplexar las señales enviadas y recibidas, además de sincronizarlas en tiempo y frecuencia [2].

### 1.2.2 Centro de Control

El Centro de Control (CC) está constituido por equipos y consolas que se encargan de gestionar los recursos radio de una o más Estaciones Base (BS), organizar la asignación de canales, ejecutar los algoritmos de control de potencia y gestionar procesos de Traspaso (HO, *HandOver*) [3]. En telefonía, el Centro de Control (CC) establece, enruta y termina las llamadas hacia otra red de comunicación, y en servicios de datos direcciona y enruta los paquetes hacia el destino [5].

### 1.2.3 Estación Móvil

La Estación Móvil (MS) es el terminal de usuario o teléfono móvil, encargado de realizar la conexión con la Estación Base (BS) de la misma celda por medio de un canal de radiofrecuencia, con el propósito de suministrar un servicio concreto al usuario [4], [5]. Cada Estación Móvil actúa en modo transmisor, receptor o en ambos.

Los terminales móviles están ligados a la tecnología implementada en el sistema de comunicación móvil, ya que cada una requiere de terminales específicos, aunque algunos equipos son compatibles con más de una tecnología.





### 1.3 COBERTURA

En los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos se entiende por cobertura la zona desde la cual una Estación Móvil (MS) puede comunicarse con las Estaciones Base (BS) y viceversa. Estos sistemas se basan en la idea fundamental de la reutilización de frecuencias, lo cual permite dividir el área geográfica en áreas más pequeñas denominadas celdas [3].

En la actualidad, los sistemas celulares se pueden clasificar de acuerdo al tamaño de las celdas que lo conforman, por lo tanto se habla de sistemas macrocelulares, microcelulares, picocelulares y femtocelulares dependiendo de los requerimientos de capacidad y cobertura de un área específica. El radio de cobertura de cada una de las celdas depende del tamaño, tipo y potencia de transmisión de las Estaciones Base (BS) [6]. En la figura 1.2 se observan los diferentes tipos de celda de acuerdo al área geográfica a la cual deben prestar el servicio.

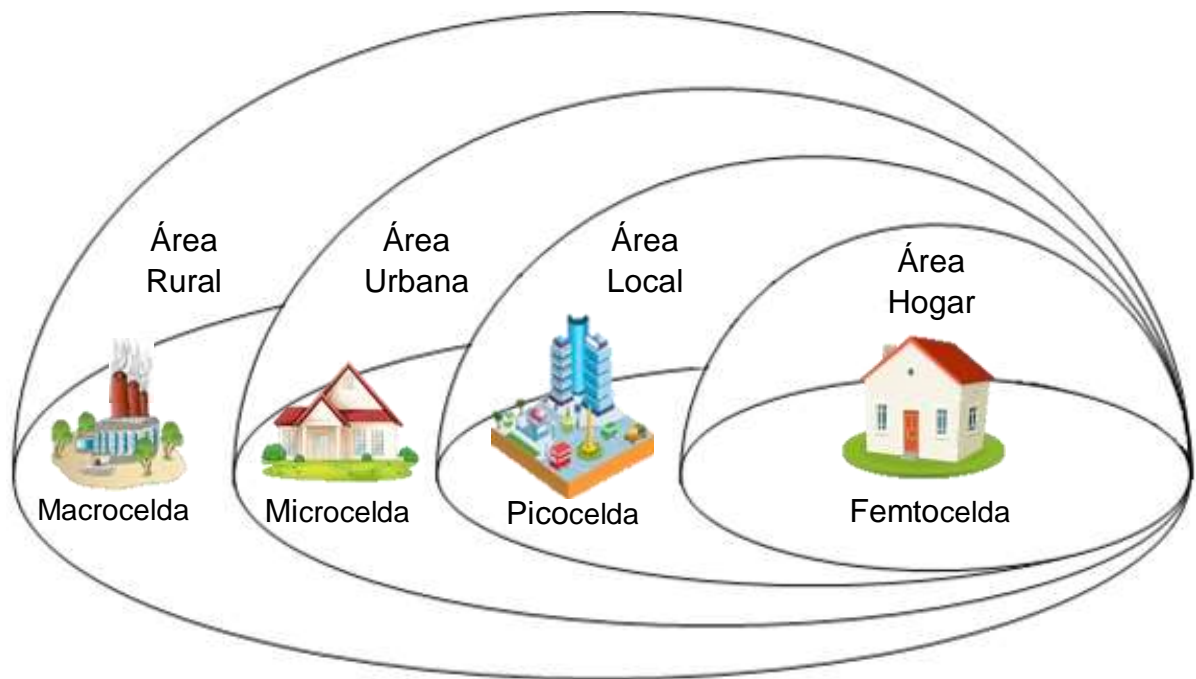


Figura 1.2 Celdas en los Sistemas Móviles e Inalámbricos. Adaptado de [2].

#### 1.3.1 Macrocelda

Las macroceldas son la topología de red celular más utilizada. Estas celdas están destinadas a cubrir áreas geográficas bastante grandes como zonas rurales o carreteras [7]; ideales para vehículos que se mueven a altas velocidades disminuyendo el número de traspasos y la probabilidad de caída de llamadas [8]. Por lo general las Estaciones Base (BS) en este tipo de celdas se encuentran



ubicadas en sitios altos logrando alcanzar distancias que van desde 1.5 Km hasta los 30 Km.

### **1.3.2 Microcelda**

Las microceldas poseen una cobertura y potencia de transmisión menor que las macroceldas. Las microceldas cubren áreas geográficas con extensiones entre 100 y 1000 metros y están destinadas a ofrecer cobertura en áreas donde hay una alta concentración poblacional (zonas urbanas), ya que en estas zonas se manejan altas densidades de tráfico; además sirven para cubrir zonas que hayan dejado de ser cubiertas por las macroceldas [6]. Debido a la pequeña área de cobertura que ofrecen las microceldas estas son utilizadas para incrementar la capacidad de la red, permitiendo manejar un volumen de tráfico mayor que en las macroceldas. Asimismo, hacen posible incrementar la eficiencia espectral del sistema al permitir una mayor reutilización de frecuencia [9].

### **1.3.3 Picocelda**

Las picoceldas son utilizadas para proporcionar cobertura en sitios con alta concentración de usuarios tales como centros comerciales o edificios, en los cuales el patrón de movimiento de los usuarios es bajo. La zona cubierta por estas celdas depende en gran medida de las condiciones de propagación en el edificio, las cuales a su vez dependen de la estructura y los materiales utilizados en el mismo. Las picoceldas pueden alcanzar un radio de cobertura entre 70 y 250 metros [7].

### **1.3.4 Femtoceldas**

Las femtoceldas son una tecnología que fue estandarizada por el Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (3GPP, *3rd Generation Partnership Project*), en el año 2008, como solución a los problemas de cobertura, ancho de banda y capacidad en los sistemas de Tercera Generación (3G) [2]. Una femtocelda es una pequeña estación base de baja potencia para el uso en hogares o negocios denominada Nodo B de Hogar (HNB, *Home Node B*). En redes de Tercera Generación (3G) este tipo de celdas son las más empleadas para ofrecer una mejor cobertura en ambientes interiores, debido a que las señales se atenúan considerablemente al penetrar en diferentes estructuras [10]. Las femtoceldas se integran a la red móvil conectándose al acceso de banda ancha a internet que posea el cliente, el cual generalmente es una Línea de Abonado Digital (DSL, *Digital Subscriber Line*), así, cuando el usuario ingrese en



su hogar, es su propia red la encargada de ofrecerle cobertura 3G, reemplazando automáticamente la ofrecida por el operador móvil correspondiente [11].

## **1.4 INTERFERENCIA EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES E INALÁMBRICOS.**

Por interferencia se entiende toda señal indeseada correspondiente a otra comunicación que se presenta junto a la señal de interés en el receptor, la cual degrada y dificulta la recepción de la señal deseada [12]. En los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos, la señal transmitida se expone a varias modificaciones causadas por el medio de transmisión en conjunto con la movilidad de los usuarios, además de la interferencia presente en el sistema, la cual puede proceder del mismo, de otros sistemas radio, de equipos externos o del entorno ambiental [13].

Como se mencionó anteriormente, la interferencia puede provenir de diferentes fuentes generándose así diferentes tipos de interferencia, por lo tanto identificar el tipo de interferencia puede ser útil para saber con qué tipo de técnicas se puede mitigar y lograr un mejor desempeño del sistema [14].

A continuación se describen algunos tipos de interferencia y los mecanismos utilizados para mitigarlos.

### **1.4.1 Interferencia Co-Canal**

El método de reuso de frecuencia permite que haya una mayor eficiencia en el uso del espectro incrementando de este modo la capacidad del sistema, ya que la misma frecuencia se puede utilizar repetidas veces en diferentes celdas. Sin embargo, la reutilización de frecuencias también trae desventajas al desempeño general del sistema, debido a que si dos celdas utilizan la misma frecuencia y no se encuentran lo suficientemente distanciadas se puede presentar la denominada Interferencia Co-Canal (CCI, *Co-Channel interference*) [13] [15]. Por lo tanto, la Interferencia Co-Canal (CCI) se define como la señal interferente generada por Estaciones Móviles (MS) o Estaciones Base (BS) en distintas celdas que operan en la misma frecuencia portadora [16]. Este tipo de interferencia se muestra en la figura 1.3.

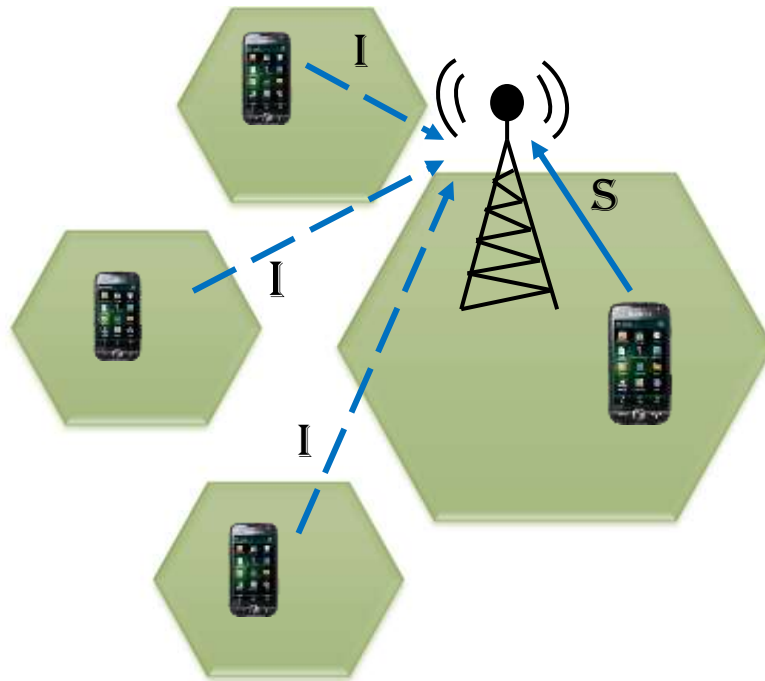


Figura 1.3 Interferencia Co-Canal (CCI).

Para minimizar los efectos de la Interferencia Co-Canal (CCI) es necesario diseñar una red celular que maximice la Relación Señal a Interferencia ( $SIR^1$ , *Signal to Interference Ratio*). En la Estación Base (BS) deseada esta relación está dada por la ecuación 1.1:

$$SIR = \frac{S}{I} = \frac{S}{\sum_{i=1}^{N_i} I_i} \quad (1.1)$$

En donde  $N_i$  es el número de Estaciones Móviles (MS) interferentes e  $I_i$  es la potencia interferente causada por la transmisión de la  $i$ -ésima Estación Móvil (MS) [17].

#### 1.4.2 Interferencia de Canal Adyacente

La Interferencia de Canal Adyacente (ACI, *Adjacent-channel interference*) se presenta entre frecuencias de canales adyacentes de la misma celda o de celdas vecinas. Por ejemplo, en un área determinada varios operadores de red pueden desplegar sus propias redes y operar en bandas de frecuencias que se acercan

---

<sup>1</sup> La Relación Señal a Interferencia (SIR) es la relación entre la potencia recibida de la señal de radiofrecuencia de la portadora (S) y la potencia recibida de la señal interferente (I).



unas a otras. En la práctica, la pérdida de acoplamiento mínima entre un transmisor y un receptor en bandas adyacentes se pueden estimar, permitiendo que los transmisores o receptores se diseñen de manera tal que la Interferencia de Canal Adyacente (ACI) permanezca en un nivel tolerable. Además la ortogonalidad perfecta entre las transmisiones que ocurren en las bandas de frecuencias vecinas no se puede lograr [15].

Este efecto se puede cuantificar mediante el uso de la Relación de Potencia Interferente del Canal Adyacente (ACIR, *Adjacent Channel Interference power Ratio*) que se define como la relación entre la potencia transmitida y la potencia medida después de pasar por un filtro receptor en el canal adyacente. Ambas potencias de transmisión y recepción se miden con un Filtro de Raíz de Coseno Alzado (RRC, *Root-Raised Cosine Filter*) con un factor de redondeo (roll-off) de 0.22 [18].

Habitualmente la Interferencia de Canal Adyacente (ACI) se mitiga asignando correctamente las bandas de frecuencias a los diferentes sistemas, planificando el despliegue de las Estaciones Base (BS) que transmiten en bandas adyacentes y empleando equipos de Radiofrecuencia de buena calidad [15].

### 1.4.3 Interferencia de Acceso Múltiple

La Interferencia de Acceso Múltiple (MAI, *Multiple Access Interference*) es la interferencia que se presenta entre las transmisiones de múltiples Estaciones Móviles (MS) que utilizan los mismos recursos radio en el interior de la celda para comunicarse con la Estación Base (BS) [19]. Los niveles de la Interferencia de Acceso múltiple (MAI) están directamente relacionados con la cantidad de usuarios dentro del sistema, es decir, cuanto mayor sea el número de usuarios mayor será el nivel de la MAI [10], [20]. La Interferencia de Acceso múltiple (MAI) afecta en gran medida el desempeño del sistema en el Enlace de Subida (UL, *UpLink*), debido a que en este tienen lugar múltiples transmisiones simultáneas las cuales se interfieren entre sí. Este problema se presenta ya que en teoría la capa física permitiría un acceso múltiple ortogonal (en el tiempo, frecuencia o código) por parte de los usuarios, pero en la práctica esta ortogonalidad puede que no se mantenga debido a errores de sincronización, a circuitos de RF no ideales y a los efectos de la propagación en el canal inalámbrico [19]. La Figura 1.4 muestra las interferencias producidas por los usuarios de una misma celda y de celdas vecinas en el Enlace de Subida (UL).

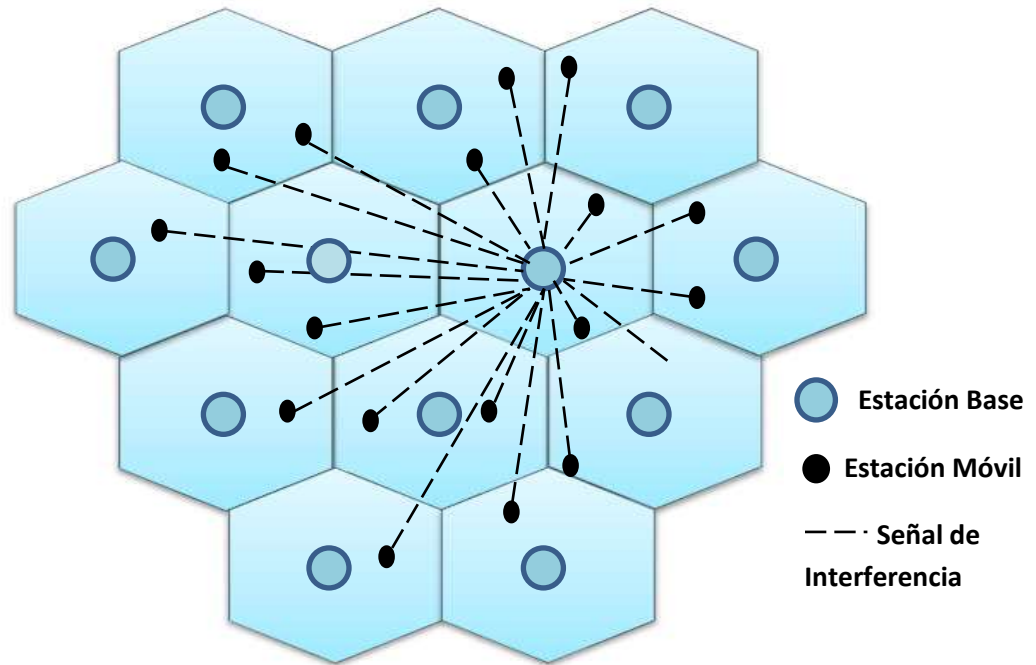


Figura 1.4 Interferencia de Múltiple Acceso Intracelular e Intercelular en el enlace de subida. Adaptado de [21].

Los efectos producidos por la Interferencia de Acceso múltiple (MAI) son controlados aplicando la técnica de Detección Multiusuario (MUD, *Multi-User Detection*), también conocida como Detección Conjunta (*Joint Detection*) o cancelación de interferencia sucesiva. En esta técnica se trata a cada usuario separadamente como una señal, considerando a los demás como ruido o interferencia [20].

#### 1.4.4 Efecto Cerca-Lejos

El efecto Cerca-Lejos (*Near-Far Effect*) es un tipo de interferencia que se presenta en sistemas de comunicaciones móviles donde los usuarios comparten la misma fracción del espectro para acceder a la red. En la figura 1.5 se observan dos Estaciones Móviles (MS) transmitiendo simultáneamente en una celda; MS1 que se encuentra ubicada cerca a la Estación Base (BS) y MS2 que se encuentra alejada. Si ambas Estaciones Móviles (MS) transmiten con la misma potencia, la potencia recibida de MS1 en la Estación Base (BS) será mayor que la potencia recibida de MS2, puesto que esta última está más alejada de la Estación Base (BS), por lo tanto MS1 genera interferencia y enmascara la señal de MS2, provocando que la Estación Base (BS) no la detecte [16].



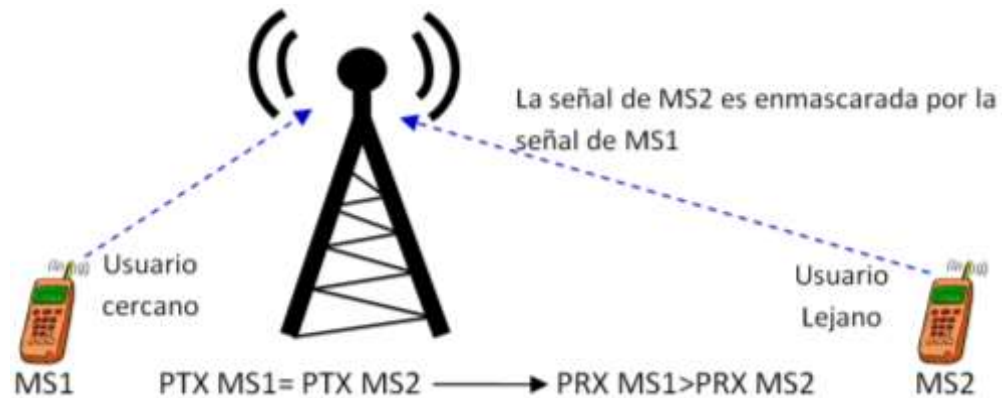


Figura 1.5 Efecto Cerca-Lejos en una celda.

## 1.5 GESTIÓN DE RECURSOS RADIO

Realizar una asignación adecuada de los recursos de la interfaz radio ha sido un problema característico de los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos debido a que estos recursos son escasos, es por ello, que a través de las diferentes generaciones de estos sistemas se ha buscado encontrar soluciones apropiadas para enfrentar este inconveniente [22]. Así, la Gestión de Recursos Radio (RRM, *Radio Resource Management*) es de suma importancia en el estudio y planificación de los sistemas móviles e inalámbricos ya que esta se encarga de realizar un uso eficiente de los recursos radio (frecuencias, ranuras de tiempo (TS, *Time Slot*), potencias o códigos según la tecnología de acceso radio) con el fin de atender al mayor número de usuarios posible garantizándoles sus respectivos requerimientos de Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) [23].

### 1.5.1 Procedimientos dentro de La Gestión de Recursos Radio

La Gestión de Recursos Radio (RRM) está compuesta por un conjunto de procedimientos, con los cuales se realiza un uso eficiente de los recursos radio. Estos procedimientos se dividen en [23]:

- Control de Admisión (AC, *Admission Control*).
- Control de Carga (LC, *Load Control*).
- Planificador de Paquetes (PS, *Packet Scheduling*).
- Control de Traspaso (HC, *Handover Control*).
- Control de Potencia (PC, *Power Control*).

En la figura 1.6 se muestran los objetivos de la Gestión de Recursos Radio (RRM), los cuales se cumplen gracias a un uso eficiente y racional de las Unidades de

Recursos Radio (RRU, *Radio Resource Unit*) mediante los diferentes procedimientos que la componen.

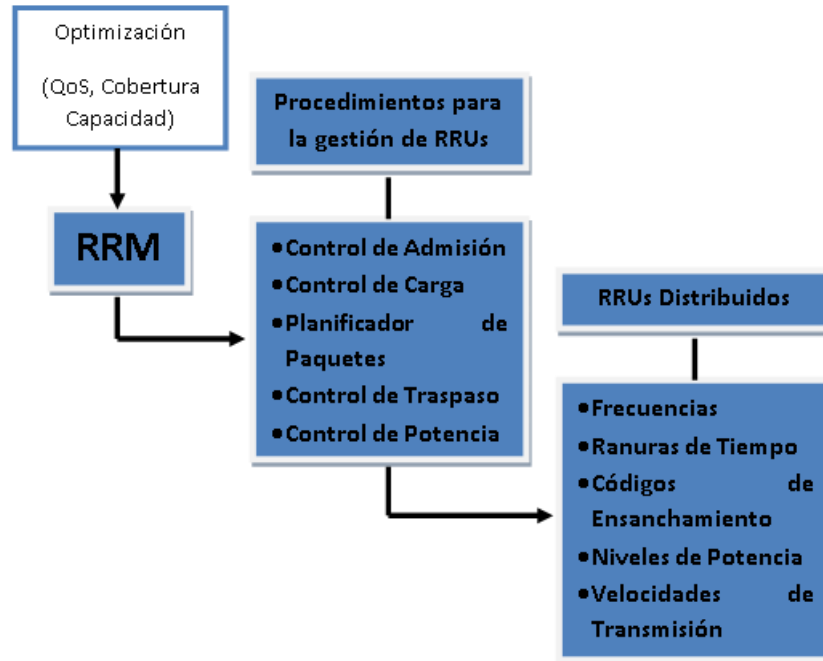


Figura 1.6 Objetivos de la Gestión de Recursos Radio. Adaptado de [24].

### 1.5.1.1 Control de Admisión

El Control de Admisión (AC) es una estrategia utilizada para limitar el número de conexiones en la red con el fin de reducir la congestión y evitar que el sistema entre en sobrecarga. El Control de Admisión (AC) se encarga de aceptar o rechazar una nueva petición de conexión por parte de un usuario, teniendo mayor prioridad los usuarios que vienen de traspasos sobre los usuarios que desean realizar una nueva conexión, debido a que es más molesto para un usuario que se pierda la conexión a que esta no se pueda establecer [25]. Además, el Control de Admisión (AC) debe garantizar que cada vez que llegue una nueva petición de conexión con determinados requerimientos de Calidad de Servicio (QoS), esta se pueda garantizar para las conexiones ya establecidas y para la nueva petición. Si esta condición no se cumple se rechaza la solicitud de conexión. Para admitir una nueva Estación Móvil (MS) en la celda, los algoritmos de Control de Admisión (AC) estiman tanto en el Enlace de Bajada (DL, *Down Link*) como en el Enlace de Subida (UL) el incremento de carga que podrían causar las nuevas conexiones en la red. La solicitud de admisión solo es aceptada si ambos enlaces la admiten, de lo contrario, la solicitud será rechazada debido al incremento en el nivel de interferencia que esta produciría en el sistema [26].





### **1.5.1.2 Control de Carga**

El procedimiento de Control de Carga (LC) tiene como objetivo principal evitar situaciones de congestión o sobrecarga, asegurando que el funcionamiento de la red siempre permanezca estable. Para cumplir con este objetivo el Control de Carga (LC) supervisa continuamente el tráfico en las celdas, de forma que si detecta situaciones de sobrecarga en la red, realiza traspasos de las comunicaciones a celdas vecinas. Los traspasos se realizan en función de los perfiles de Calidad de Servicio (QoS) acordados previamente, por lo tanto, los usuarios con perfiles de Calidad de Servicio (QoS) más bajos serán los primeros en ser trasladados de la celda [10].

### **1.5.1.3 Planificador de Paquetes**

La planificación de los paquetes es uno de los mecanismos básicos para proveer Calidad de Servicio (QoS). El Planificador de Paquetes (PS) es el encargado de asignar de forma dinámica el ancho de banda de la red entre las conexiones activas. Además, realiza la asignación determinando cuántos paquetes son entregados a cada conexión en un momento dado, dependiendo de mediciones de carga en la interfaz radio realizadas por la Estación Base (BS) y de mediciones de volumen de tráfico en el Enlace de Subida (UL) [18].

### **1.5.1.4 Control de Traspaso**

El traspaso (HO) es el mecanismo por el cual se transfiere una llamada activa de una celda a una de sus celdas vecinas. Existen tres causas por las cuales se puede producir un traspaso: la primera de ellas se debe al movimiento propio del terminal móvil cuando este se desplaza desde un punto a otro, pasando por diferentes celdas dentro del sistema; la segunda es por condiciones deficientes en cuanto a la Calidad de Servicio (QoS) de la comunicación en la celda actual; y la tercera es porque se produce congestión en la celda actual. El Control de Traspaso (HC) tiene como función principal garantizar la continuidad de la llamada durante el proceso de traspaso, haciendo que el proceso de cambio de celda sea transparente para el usuario, para ello, el Control de Traspaso (HC) debe gestionar los recursos de red necesarios en la nueva celda para que la llamada siga en curso con los requerimientos de Calidad de Servicio (QoS) previamente establecidos [24], [18]. El proceso de traspaso se ilustra en la figura 1.7.

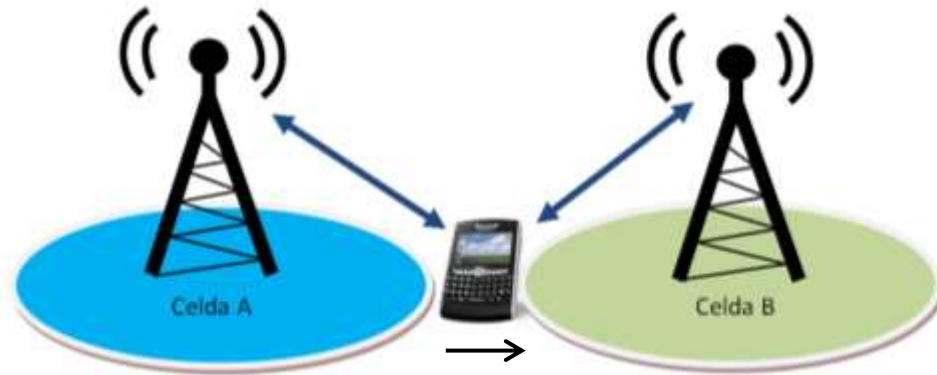


Figura 1.7 Proceso de Handover en Sistemas Móviles e Inalámbricos. Adaptado de [26].

### 1.5.1.5 Control de Potencia

El problema de la interferencia en sistemas móviles e inalámbricos es uno de los factores más significativos que limitan la cobertura y la capacidad<sup>2</sup> del sistema [10], [27]. Aunque este problema no puede eliminarse, sí se puede reducir aplicando la técnica de Control de Potencia (PC, *Power Control*).

El Control de Potencia (PC) es uno de los procedimientos más importantes y fundamentales de la Gestión de Recursos Radio (RRM). Este se emplea para mantener los niveles de interferencia de la interfaz radio en el mínimo [24], garantizando que el nivel de potencia con el que transmite un usuario determinado es el adecuado para no interferir con los enlaces de los usuarios restantes dentro de la red, y proporcionar la Calidad de Servicio (QoS) requerida por todos y cada uno de ellos, lo cual conlleva a un aumento en la cobertura y la capacidad del sistema [27]. Además, el Control de Potencia (PC) permite minimizar el consumo de energía y por ende aumentar el tiempo de vida de las baterías de los dispositivos.

En la figura 1.8 se observa que el Control de Potencia (PC) iguala en la Estación Base (BS) la potencia de recepción de todas las Estaciones móviles (MS) que en un determinado momento tienen una comunicación activa, controlando la cantidad de interferencia que se genera dentro del sistema y de esta manera no afectar las comunicaciones presentes.

---

<sup>2</sup> El término “capacidad” hace referencia al número de usuarios simultáneos que pueden ser atendidos por un sistema de comunicaciones [31].

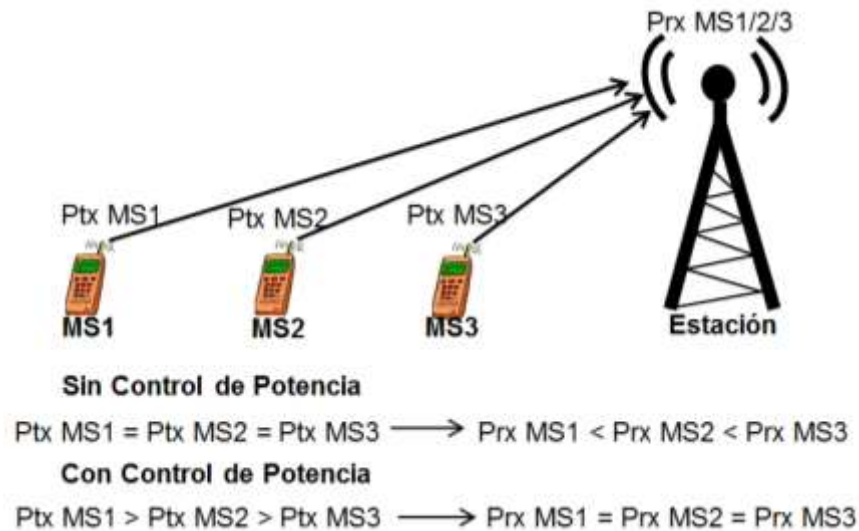


Figura 1.8 Control de Potencia en el Enlace de Subida (UL).

En este orden de ideas, implementar procedimientos de Control de Potencia (PC) en aquellos sistemas en los cuales las señales de los usuarios coinciden en tiempo y en frecuencia<sup>3</sup> es una tarea fundamental. Por ello, el enfoque principal de este trabajo de grado es, por medio del modelado y la simulación, tener un acercamiento al funcionamiento de un sistema de comunicaciones móvil e inalámbrico, con el fin de analizar y evaluar su cobertura y capacidad al implementar conjuntamente el procedimiento de Control Ideal de Potencia (IPC, *Ideal Power Control*) y la movilidad en los usuarios sin tener en cuenta el procedimiento de Traspaso (HO), ya que la movilidad se realiza únicamente al interior de la celda de análisis.

En el siguiente capítulo se describirán de forma detallada los modelos de Control Ideal de Potencia y movilidad de los usuarios que fueron implementados en el desarrollo de este trabajo de grado.

<sup>3</sup> Sistemas basados en la técnica de transmisión de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*) o la técnica de Acceso Múltiple por División de Código (CDMA, *Code Division Multiple Access*) son sistemas en los cuales las señales de los usuarios coinciden en tiempo y en frecuencia.



## 2. DISEÑO DEL MODELO DE SIMULACIÓN

Construir un escenario de simulación que tenga el mejor acercamiento al sistema real requiere de la ejecución de fases o etapas organizadas, por ello se recurre al uso de una metodología de desarrollo que facilite el proceso de diseño, desarrollo e implementación de la simulación. Por lo tanto, en este capítulo se presenta el desarrollo de la metodología de trabajo para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos, teniendo en cuenta los parámetros de simulación, el proceso de desarrollo, el plan de pruebas y el análisis de la simulación.

### 2.1 PROCESO DE DESARROLLO DE UNA SIMULACIÓN

La metodología empleada para diseñar, implementar y analizar la cobertura de un sistema de comunicaciones móvil e inalámbrico empleando Control Ideal de Potencia (IPC) y movilidad en los usuarios, es una adaptación de la Metodología de Simulación de Sistemas de Telecomunicaciones [28], la cual plantea una serie de etapas que permiten definir y obtener el modelo de Control Ideal de Potencia (IPC) y el modelo de movilidad de usuarios. Las etapas de esta metodología que se tuvieron en cuenta fueron: definición del sistema, análisis del sistema, formulación del modelo, selección del lenguaje, codificación del modelo, validación del modelo, experimentación, monitoreo y control. En la figura 2.1 se muestra el diagrama de flujo de la metodología aplicada.

A continuación se realiza una descripción detallada del desarrollo de cada fase.

### 2.2 DEFINICIÓN DEL SISTEMA

Se analizó un sistema de comunicaciones móvil e inalámbrico de única portadora limitado por interferencia<sup>4</sup> empleando Control Ideal de Potencia (IPC) y movilidad en los usuarios. Para la representación del sistema se definió una simulación a

---

<sup>4</sup> En un sistema limitado por interferencia de única portadora, todas las comunicaciones de los usuarios se realizan sobre la misma portadora generando un nivel de interferencia elevado y por ende valores de SINR negativos [27].

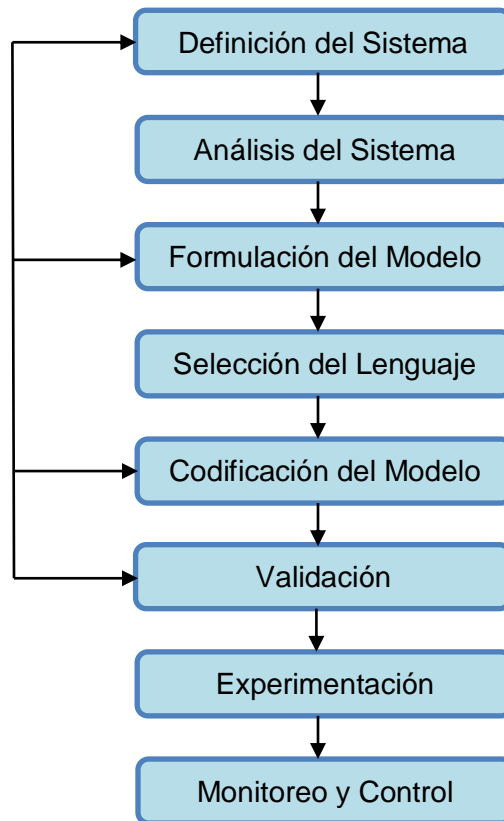


Figura 2.1 Diagrama de Flujo de la Metodología Empleada para la Simulación. Adaptado de [28].

nivel de sistema<sup>5</sup>, en la cual se recreó un escenario que corresponde a un entorno microcelular urbano. Este escenario se diseñó con dimensiones de 3 Km x 3 Km, dentro del cual se ubicaron un número determinado de usuarios de forma aleatoria siguiendo una distribución uniforme, además, en el centro del escenario se ubicó la Estación Base (BS) de la celda de análisis, la cual cuenta con un radio de 0.8 Km. El análisis se enfoca en la celda central considerando la Interferencia Intra-Celda (InCI, *Intra-Cell Interference*) e Interferencia Inter-Celda (ICI, *Inter-Cell Interference*), siendo los usuarios asociados a otras celdas quienes generan esta última. Para estos entornos microcelulares, se analiza específicamente el Enlace de Subida (UL) del sistema, debido a que este enlace es altamente sensible a los efectos de la interferencia generada al interior y exterior de la celda. En la figura 2.2 se observa el escenario de simulación.

<sup>5</sup> Las simulaciones a nivel de sistema (*System Level*) permiten analizar parámetros, modelos, algoritmos y fenómenos relacionados con el comportamiento de tráfico y movilidad de las Estaciones Móviles (MS), cada enlace se representa mediante una caracterización del nivel de enlace [30].

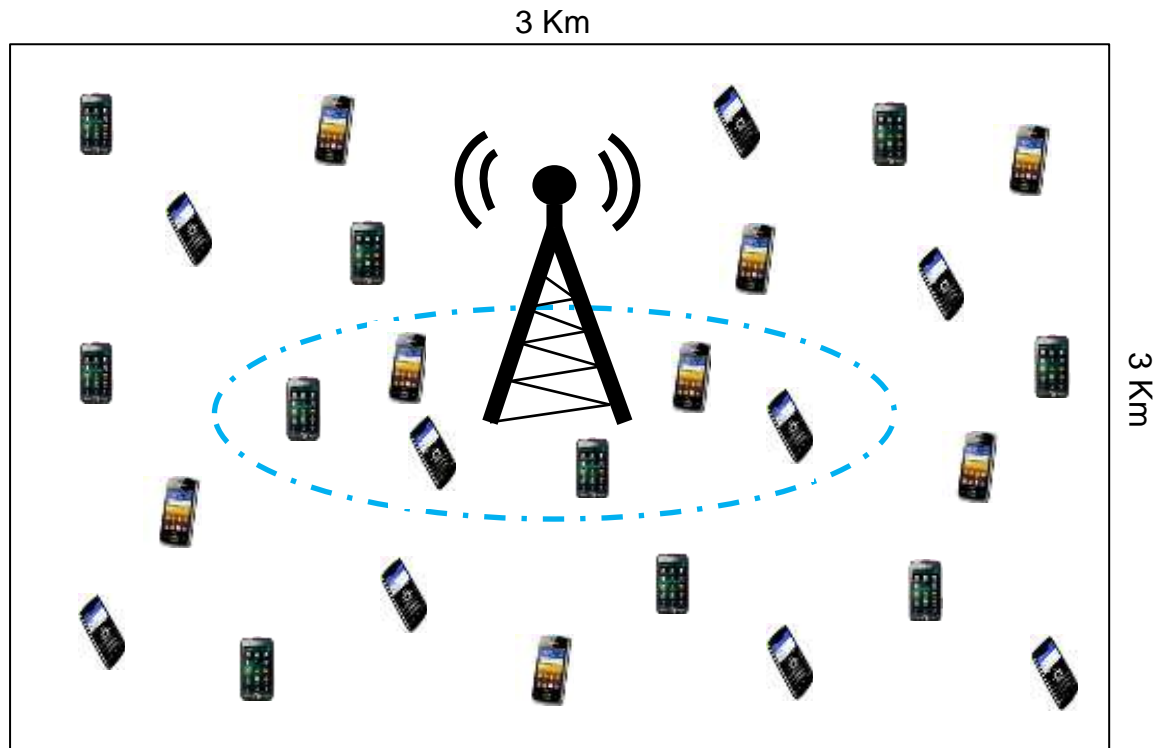


Figura 2.2 Escenario de Simulación.

El número de usuarios que se ubican al interior del escenario están representados mediante el conjunto  $\mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$  de Estaciones Móviles (MS), de las cuales un número determinado quedan asociadas a la Estación Base (BS) de la microcelda, y estas están representadas por medio del conjunto  $\mathcal{N} = \{1, \dots, N\} \in \mathcal{M}$ .

Para calcular las pérdidas de trayecto en el canal de comunicaciones, se utilizó el modelo de propagación denominado Ambiente Mixto Peatonal (*Outdoor to Indoor and Pedestrian Environment*) [29]. Este modelo, está definido por el Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeo (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*) para ambientes interiores, exteriores y peatonales, empleado en entornos microcelulares los cuales se caracterizan por utilizar celdas de pequeños tamaños y bajas potencias de transmisión en las Estaciones Base (BS). Estas Estaciones Base (BS) con antenas a baja altura están localizadas en exteriores, y los usuarios transeúntes están localizados en calles o en el interior de residencias o edificios. El modelo asume un desvanecimiento por sombra normal con una desviación estándar igual a 10 y 12 dB para exteriores e interiores respectivamente [29].

La ecuación 2.1 describe la formula general de las pérdidas de propagación para el modelo seleccionado.



$$L[dB] = 49 + 40 \log(d[Km]) + 30 \log(f[MHz]) + S + M^6, \quad (2.1)$$

dónde:

- $d$  es la distancia que existe entre una Estación Móvil (MS) y la Estación Base (BS) de análisis, dada en kilómetros.
- $f$  es la frecuencia de la portadora, dada en Megahertz.
- $S$  es una variable aleatoria con distribución normal, que representa el desvanecimiento por sombra, con media cero y desviación estándar de 10 dB y 6 dB, para los casos con y sin movilidad de usuario respectivamente.
- $M$  es el margen de desvanecimiento por multitrayecto, el cual tiene un valor de 4 dB y se considera únicamente para el caso con movilidad de usuario.

Se debe tener en cuenta que las pérdidas  $L$  no deberán ser menores a las pérdidas de espacio libre. Este modelo es válido para casos Sin Línea de Vista (NLOS, *Non Line of Sight*) y describe el peor caso de propagación. Además es utilizado para evaluar la cobertura y permitir estimaciones simples de capacidad [29].

Para realizar la evaluación y análisis de la cobertura<sup>7</sup> del sistema se requiere como parámetro de entrada la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*) objetivo [30], establecida en -20 dB y -14 dB<sup>8</sup>.

Para el enlace de cada usuario con la Estación Base (BS) se asume que la ganancia de antena de la Estación Móvil (MS) es de 0 dBi y la ganancia de antena de la Estación Base (BS) es de 10 dBi y el patrón de radiación de ambas antenas es omnidireccional. En la tabla 2.1 se presenta un resumen de las características del escenario de simulación.

## 2.3 ANÁLISIS DEL SISTEMA

En esta fase se realiza la descripción analítica de los elementos u objetos que conforman el sistema, la implementación del Control Ideal de Potencia (IPC) y la movilidad de los usuarios en el sistema definido.

---

<sup>6</sup> Las variables  $S$  y  $M$  se adicionan a la ecuación de pérdidas, con el fin de introducir los efectos producidos por zonas con obstrucciones o el movimiento de los usuarios, lo cual hace que la señal se atenué presentando en algunos casos desvanecimientos profundos, ocasionando pérdida de la comunicación.

<sup>7</sup> El análisis de cobertura se entiende como la mayor distancia dentro de la celda de análisis, a la que puede estar una Estación Móvil transmitiendo con la máxima potencia, conservando un nivel adecuado de Calidad de Servicio (QoS).

<sup>8</sup> Este valor se tomó teniendo en cuenta valores típicos de sistemas limitados por interferencia en los cuales la SINR es negativa [27] [30].





| CARACTERÍSTICA                       | ESCENARIO                                   |
|--------------------------------------|---|
| Dimensión                            | 3 Km x 3 Km                                 |
| Radio de la Celda                    | 0.8 Km                                      |
| Frecuencia de Operación <sup>9</sup> | 900 MHz                                     |
| SINR Requerida                       | -20 dB y -14 dB                             |
| Potencias de Transmisión             | Desde -39 dBm hasta 24 dBm en pasos de 3 dB |
| Cantidad de Usuarios                 | 100   |
| Ganancia Antena BS                   | 10 dBi                                      |
| Patrón de Radiación BS               | Omnidireccional                             |
| Ganancia Antena MS                   | 0 dBi                                       |
| Patrón de Radiación MS               | Omnidireccional                             |
| Ancho de Banda                       | 3.84 MHz                                    |
| Figura de Ruido                      | 7.4 dB                                      |

Tabla 2.1 Características del Escenario de Simulación.

### 2.3.1 Estado del Sistema

En la simulación del sistema se emplean dos tipos de variables definidas como principales y secundarias. Las variables principales están directamente relacionadas con los resultados de simulación obtenidos, mientras que las secundarias son los eventos que al variarse influyen en los valores de las variables principales.

- **Variables principales**
  - ❖ Potencia de Transmisión de Usuario
  - ❖ SINR medida
  - ❖ Cobertura
- **Variables secundarias**
  - ❖ Dimensiones del escenario
  - ❖ Número de usuarios dentro del escenario
  - ❖ Número de usuarios dentro de la celda
  - ❖ Movilidad de los usuarios
  - ❖ Posición de los usuarios
  - ❖ Modelo de propagación

<sup>9</sup> Este valor se tomó teniendo en cuenta el sistema WCDMA (UMTS) el cual es un sistema limitado por interferencia de única portadora.





#### ❖ SINR objetivo

**Actividad:** El cálculo de una potencia de transmisión adecuada para cada uno de los usuarios al interior de la celda empleando el modelo de Control Ideal de Potencia (IPC), es la actividad más importante en la simulación de este trabajo. La variación de la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) en recepción depende principalmente de la potencia de transmisión, la cual se ve afectada por: el radio de la celda, el modelo de propagación empleado, el número de usuarios en el escenario, el número de usuarios al interior de la celda y la posición en la que se encuentren cada uno de ellos con respecto a la Estación Base (BS).

**Entidades:** las entidades dinámicas clasificadas como objetos implementados dentro del sistema son: modelo de movilidad, modelo de propagación, número de usuarios en el escenario, número de usuarios en la celda y su respectiva posición.

Las entidades estáticas corresponden a las del modelo de Control Ideal de Potencia (IPC), tal como la asignación de las potencias de transmisión a cada uno de los usuarios al interior de la celda, la cual depende directamente del tipo de entidades dinámicas.

### 2.3.2 Modelo de Control Ideal de Potencia

Como ya se mencionó en el capítulo 1, el Control de Potencia (PC) es uno de los procedimientos más importantes y fundamentales de la Gestión de Recursos Radio (RRM), encargado de mantener los niveles de interferencia de la interfaz radio en el mínimo [24], garantizando que los usuarios transmitan con un nivel de potencia adecuado para proporcionar la Calidad de Servicio (QoS) requerida por todos y cada uno de ellos. En el desarrollo de este trabajo de grado se implementó el modelo de Control Ideal de Potencia (IPC) descrito por [30] y [31].

El Control Ideal de Potencia (IPC) busca establecer el nivel adecuado de potencia con la cual deben transmitir cada una de las Estaciones Móviles, con el fin de igualar la potencia de recepción que capta la Estación Base (BS) de cada una de ellas, dependiendo del servicio que se le esté proporcionando a cada usuario, procurando mitigar problemas de interferencia [31]. Para implementar el Control Ideal de Potencia (IPC), se debe identificar el servicio al cual están accediendo los usuarios y la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) requerida por este servicio.

En la ecuación 2.2 se define la formula general de Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) para todos y cada uno de los usuarios al interior de la celda de análisis.





$$AP = \eta, \quad (2.6)$$

donde  $A$  es una matriz no singular ( $\det(A) \neq 0$ ) de dimensión  $N \times N$ , definida por la ecuación 2.7 [31].

$$A = \begin{cases} -\alpha_i & i \neq j \\ \frac{\alpha_i}{\sin r_i} & i = j \end{cases}, \forall i, j \in N. \quad (2.7)$$

En el sistema de ecuaciones lineales se define  $\eta = \{\eta_1, \dots, \eta_N\}$  como un vector de ruido térmico de dimensión  $N \times 1$ ,  $\alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_N\}$  como un vector de dimensión  $N \times 1$ ,  $SINR = \{\sin r_1, \dots, \sin r_N\}$  como un vector de orden  $N \times 1$  que contiene la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) requerida en la comunicación de cada usuario y  $P = \{p_1, \dots, p_N\}$  como el vector de incógnitas que contiene las potencias de transmisión necesarias para satisfacer las SINR requeridas.

El sistema 2.6 constituye una descripción microscópica de la red celular, ya que se formula en términos de las potencias de transmisión de los  $N$  usuarios. Puesto que  $A$  es una matriz no singular, se define la matriz  $B$ , tal que  $B = A^{-1}$ , luego, las potencias de transmisión se obtienen a partir de la ecuación 2.8 [31].

$$P = B\eta. \quad (2.8)$$

Hasta este momento se ha considerado en el análisis únicamente la Interferencia Intra-Celda (InCI), debido a que se tuvo en cuenta solo a los usuarios que se encuentran al interior de la celda y no se incluyeron aquellos usuarios que se encuentran conectados a otras celdas. Por lo tanto, es necesario modificar el análisis para incluir la Interferencia Inter-Celda (ICI) generada por estos usuarios y obtener así un resultado más real. Para ello se incluyó en la ecuación 2.2 un factor que representa la Interferencia Inter-Celda (ICI) obteniendo la ecuación 2.9.

$$\sin r_i = \frac{\alpha_i p_i}{\eta + i_o + \sum_{j=1, j \neq i}^N \alpha_j p_j} \quad i, j \in N. \quad (2.9)$$

Donde  $i_o$  es un escalar que representa la Interferencia Inter-Celda (ICI) presente en la Estación Base (BS) de análisis. En la ecuación 2.10 se define este parámetro.



$$i_o = \sum_{m=N+1}^M \alpha_m p_m. \quad (2.10)$$

Así, el sistema de ecuaciones lineales queda representado por la ecuación 2.11.

$$AP = \eta + i_o, \quad (2.11)$$

donde  $\eta + i_o$  es un vector de dimensión  $N \times 1$ , que corresponde al vector de ruido más interferencia. Por lo tanto, las potencias de transmisión se obtienen como se muestra en la ecuación 2.12.

$$P = B(\eta + i_o). \quad (2.12)$$

### 2.3.3 Modelo de Movilidad de Usuario

Una de las características más importantes que tienen los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos es la del movimiento de los usuarios a través de toda la red. Para representar esta característica, en este trabajo de grado se implementó un modelo de movilidad básico el cual le permite a cada usuario desplazarse al interior de la celda de análisis.

Para el desarrollo del modelo de movilidad se tiene en cuenta el modelo de propagación seleccionado, en el cual se estipula que cada usuario se mueve a una velocidad de 3 Km/h o lo que equivale a 0.833 m/s [29]. A partir de este dato, se definió que el valor del desplazamiento del usuario sería de 0.833 metros en cada iteración, valor del cual se derivan los desplazamientos en  $X$  y en  $Y$  para cada usuario, denominados  $dx$  y  $dy$  respectivamente.

En el modelo de movilidad planteado primero se genera la posición inicial<sup>11</sup> de todos los usuarios, luego a cada uno de los usuarios se le asigna un ángulo  $\theta$  el cual se encuentra uniformemente distribuido entre 0 y  $2\pi$ , obteniendo así la dirección en la cual se desplazará el usuario. Una vez elegida la dirección del movimiento, se calculan los desplazamientos en  $X$  y en  $Y$  para cada uno de los usuarios de la siguiente manera:

$$dx_i = 0.833 \cos \theta_i, \quad (2.13)$$

$$dy_i = 0.833 \sin \theta_i, \quad (2.14)$$

---

<sup>11</sup> Los usuarios se ubican aleatoriamente al interior del escenario mediante una distribución uniforme.



donde el subíndice  $i$  hace referencia al  $i$ -ésimo usuario al interior de la celda.

Luego de esto, se suma a las componentes en  $X$  y en  $Y$  de la posición inicial los respectivos desplazamientos en  $X$  y en  $Y$  para obtener la nueva posición del usuario. A partir de este instante y hasta que la simulación finalice, el proceso para obtener una nueva posición se repite, iniciando con el cálculo de los desplazamientos  $dx$  y  $dy$  y luego sumando estos a las componentes en  $X$  y en  $Y$  de la posición actual del usuario. Tomando como ejemplo el usuario  $n$  se tiene:

Iteración 1:

- Posición Inicial:  $P_{0n}(1900, 1800)$
- Dirección del movimiento:  $\theta_n = \frac{3\pi}{4}$
- Desplazamiento en  $X$ :  $dx_n = 0.833 \cos \frac{3\pi}{4} = -0.58925$
- Desplazamiento en  $Y$ :  $dy_n = 0.833 \sin \frac{3\pi}{4} = 0.58925$
- Nueva posición:  $P_{1n}(1899.4107, 1800.5892)$

Iteración 2:

- Posición actual:  $P_{1n}(1899.4107, 1800.5892)$
- Desplazamiento en  $X$ :  $dx_n = 0.833 \cos \frac{3\pi}{4} = -0.58925$
- Desplazamiento en  $Y$ :  $dy_n = 0.833 \sin \frac{3\pi}{4} = 0.58925$
- Nueva posición:  $P_{2n}(1898.8214, 1801.1785)$

Iteración 3:

- Posición actual:  $P_{2n}(1898.8214, 1801.1785)$
- Desplazamiento en  $X$ :  $dx_n = 0.833 \cos \frac{3\pi}{4} = -0.58925$
- Desplazamiento en  $Y$ :  $dy_n = 0.833 \sin \frac{3\pi}{4} = 0.58925$
- Nueva posición:  $P_{3n}(1898.2321, 1801.7677)$

Y así sucesivamente hasta que la simulación termine.

Debido a que en este trabajo de grado no se tendrá en cuenta procedimientos como HandOver (HO), en el modelo de movilidad aquí planteado se limitó el movimiento de los usuarios únicamente al interior de la celda de análisis, es decir, se mueven sólo los usuarios que estén asociados a esta celda mientras que los usuarios que se encuentren por fuera, permanecen estáticos durante toda la simulación.

Para realizar la limitación del movimiento de los usuarios únicamente al interior de la celda, se dividió el escenario en 4 cuadrantes y se tomó como origen de coordenadas el punto  $P(1500,1500)$  ubicado en el centro del escenario. Luego, para los usuarios que debido a su movimiento quedaran por fuera de la celda se realiza un reajuste en su posición ubicándolos justamente sobre el límite de la celda, el cual es representado por un círculo de radio  $R = 0.8$  Km (radio de la



celda). La reubicación se realiza teniendo en cuenta el cuadrante en el cual se encuentra ubicado el usuario. Para cada uno de los 4 cuadrantes se tiene:

Primer Cuadrante ( $1500 < X < 2300$  &  $1500 < Y < 2300$ )

- Con las componentes en X y en Y de la posición del usuario se calcula el ángulo  $\theta$ .

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{y-1500}{x-1500} \right) \quad (2.16)$$

- Con el ángulo  $\theta$  se calculan las componentes de la nueva posición.

$$X_n = 1500 + R \cos \theta \quad (2.17)$$

$$Y_n = 1500 + R \sin \theta \quad (2.18)$$

Segundo Cuadrante ( $700 < X < 1500$  &  $1500 < Y < 2300$ )

- Con las componentes en X y en Y de la posición del usuario se calcula el ángulo  $\theta$ .

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{y-1500}{1500-x} \right) \quad (2.19)$$

- Con el ángulo  $\theta$  se calculan las componentes de la nueva posición.

$$X_n = 1500 - R \cos \theta \quad (2.20)$$

$$Y_n = 1500 + R \sin \theta \quad (2.21)$$

Tercer Cuadrante ( $700 < X < 1500$  &  $700 < Y < 1500$ )

- Con las componentes en X y en Y de la posición del usuario se calcula el ángulo  $\theta$ .

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{1500-y}{1500-x} \right) \quad (2.22)$$

- Con el ángulo  $\theta$  se calculan las componentes de la nueva posición.

$$X_n = 1500 - R \cos \theta \quad (2.23)$$

$$Y_n = 1500 - R \sin \theta \quad (2.24)$$



Cuarto Cuadrante ( $1500 < X < 2300$  &  $700 < Y < 1500$ )

- Con las componentes en X y en Y de la posición del usuario se calcula el ángulo  $\theta$ .

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{1500-y}{x-1500} \right) \quad (2.25)$$

- Con el ángulo  $\theta$  se calculan las componentes de la nueva posición.

$$X_n = 1500 + R \cos \theta \quad (2.26)$$

$$Y_n = 1500 - R \sin \theta \quad (2.27)$$

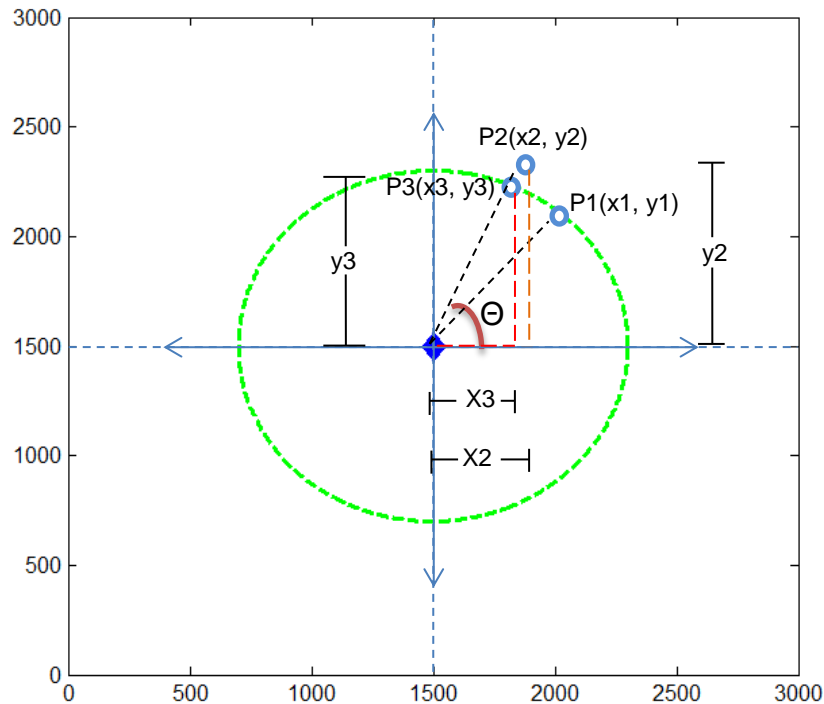


Figura 2.3 Ajuste de la Posición del Usuario según el Modelo de Movilidad.

En la figura 2.3 se muestra como se realizó la limitación del movimiento de los usuarios. En esta figura se observa un usuario ubicado en la posición  $P1(x1, y1)$  el cual se desplaza hasta la posición  $P2(x2, y2)$  que se encuentra por fuera de la celda. Luego para ubicar nuevamente el usuario dentro de la celda se proyecta la posición  $P2$  hacia el interior de la celda, posición  $P3(x3, y3)$ , realizando el siguiente procedimiento:



- Se calcula el ángulo  $\theta$  con las componentes de la posición P2 y con este se calculan las nuevas componentes de la posición  $x_3$  y  $y_3$ , con las cuales el usuario queda ubicado sobre el límite de la celda.

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{y_2 - 1500}{x_2 - 1500} \right)$$

$$x_3 = 1500 + R \cos \theta$$

$$y_3 = 1500 + R \sin \theta$$

Una vez que el usuario ha sido ubicado en el límite de la celda, es decir, su distancia a la estación base es  $R = 0.8$  Km, éste elige nuevamente una dirección la cual hará que el movimiento se realice hacia el interior de la celda. La elección de la nueva dirección del movimiento se realiza teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Si el usuario se encuentra en el primer cuadrante,  $\theta$  tiene una distribución uniforme en  $[\pi, \frac{3\pi}{2}]$ .
- Si el usuario se encuentra en el segundo cuadrante,  $\theta$  tiene una distribución uniforme en  $[\frac{3\pi}{2}, 2\pi]$ .
- Si el usuario se encuentra en el tercer cuadrante,  $\theta$  tiene una distribución uniforme en  $[0, \frac{\pi}{2}]$ .
- Si el usuario se encuentra en el cuarto cuadrante,  $\theta$  tiene una distribución uniforme en  $[\frac{\pi}{2}, \pi]$ .

En la figura 2.4 se observa que la dirección inicial del movimiento del usuario hacía que éste se desplazara en el primer cuadrante, es decir,  $\theta_{inicial}$  se encontraba entre  $0$  y  $\frac{\pi}{2}$ , además, se muestra como el usuario ha sido ubicado sobre el límite de la celda en la posición  $P1(X1, Y1)$  después de que éste estuvo instantáneamente por fuera de la celda debido a su movimiento. Ya estando ubicado en la posición  $P1(X1, Y1)$ , al usuario le es asignado un ángulo  $\theta$  el cual le indica la nueva dirección del movimiento. Este ángulo ( $\theta_{nuevo}$ ) tiene una distribución uniforme en  $[\pi, \frac{3\pi}{2}]$  haciendo que éste se desplace nuevamente hacia el interior de la celda.



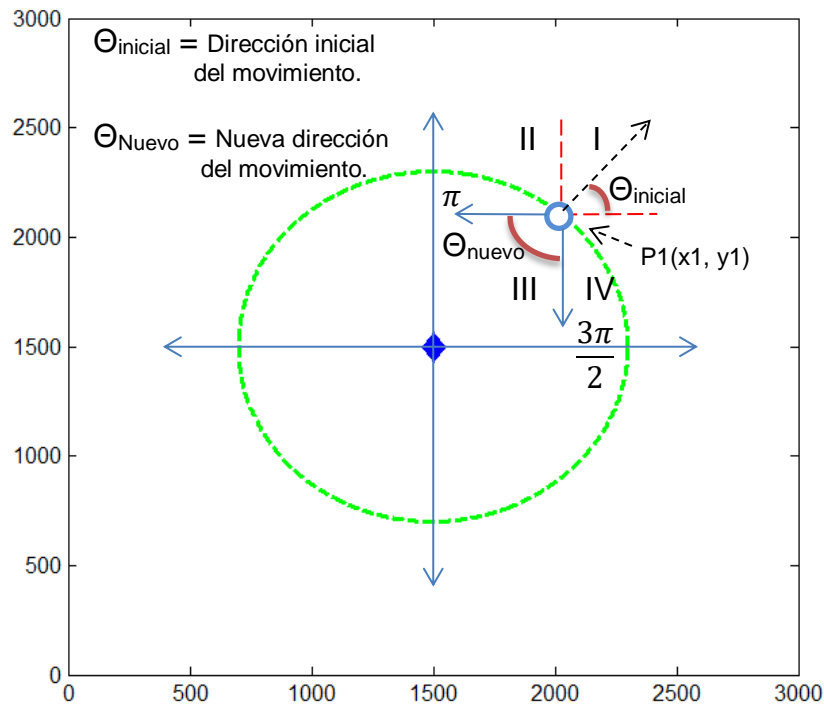


Figura 2.4 Ajuste de la Dirección del movimiento del Usuario según el Modelo de Movilidad.

De este modo, se garantiza que el movimiento de los usuarios se realice únicamente al interior de la celda.

## 2.4 FORMULACIÓN DEL MODELO DEL SISTEMA

Teniendo en cuenta el análisis del sistema, se genera un modelo lógico-matemático en el cual se definen los diagramas de flujo y el diagrama de bloques mediante los cuales se especifican todas las interacciones entre las variables que forman parte del sistema.

### 2.4.1 Diagrama en Bloques del Sistema

Debido a que este trabajo de grado se enfoca en la implementación de los procedimientos de Control Ideal de Potencia (IPC) y movilidad de los usuarios, se definió el diagrama en bloques mostrado en la figura 2.5, el cual representa los elementos principales a ser considerados en el sistema de comunicaciones móvil e inalámbrico de única portadora limitado por interferencia.

Las Estaciones Móviles (MS) que se encuentran al interior ( $MS_i$ ) y exterior ( $MS_o$ ) de la celda de análisis inician la comunicación transmitiendo una señal hacia la Estación Base (BS), señal que se ve afectada por la atenuación y el



desvanecimiento del canal antes de llegar a esta. La Estación Base (BS) brinda servicio a las Estaciones Móviles presentes al interior ( $MS_i$ ) e identifica como interferencia la señal generada por las Estaciones Móviles al exterior ( $MS_o$ ) de la celda. En la Estación Base (BS) se lleva a cabo el proceso de Control Ideal de Potencia (IPC), mientras que el modelo de movilidad de usuario se implementa sobre cada una de las Estaciones Móviles al interior ( $MS_i$ ), permaneciendo estáticas las Estaciones Móviles al exterior ( $MS_o$ ) de la celda.

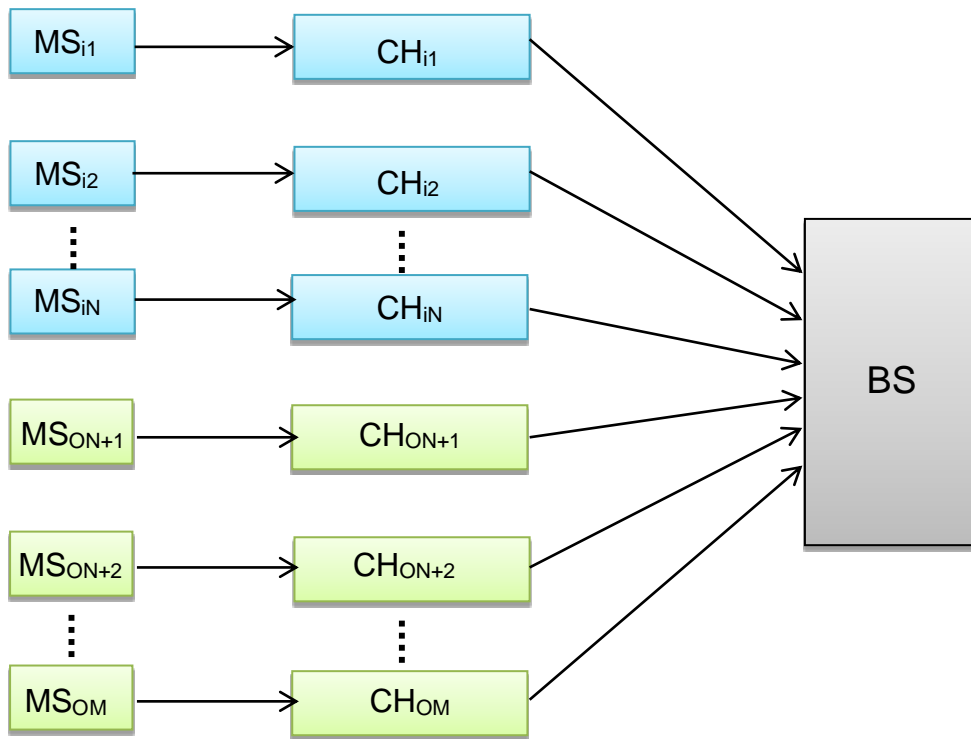


Figura 2.5 Diagrama en Bloques del Sistema.

#### 2.4.2 Diagrama de Flujo General del Sistema

En la figura 2.6 se presenta el diagrama de flujo general del sistema, el cual se generó teniendo en cuenta la interacción de los elementos que componen el diagrama en bloques mostrado en la figura 2.5. Del diagrama de flujo presentado en la figura 2.6 se puede notar que la simulación se realiza considerando los siguientes pasos:

1. Se configuran y determinan las variables necesarias para la generación del escenario de análisis.
2. Se distribuyen de manera aleatoria un número  $n$  (50 o 100) de usuarios siguiendo una distribución uniforme.

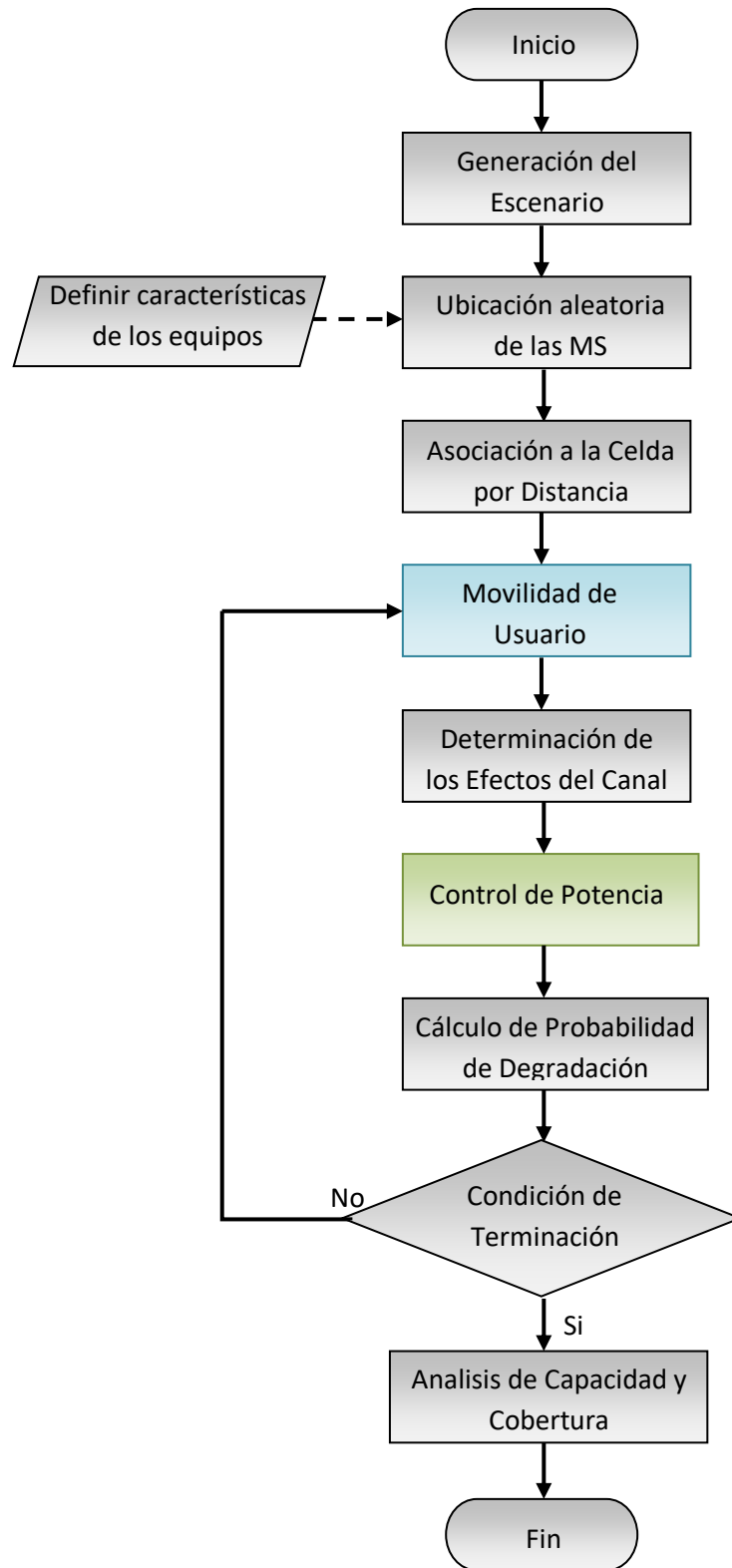


Figura 2.6 Diagrama de Flujo General del Sistema.



3. Se definen las características de las Estaciones Móviles (MS) y de la Estación Base (BS) (potencias máximas de transmisión y ganancias de antenas).
4. Se identifican aquellas Estaciones Móviles (MS) que se asocian a la celda de análisis, teniendo en cuenta la distancia de estas a la Estación Base (BS).
5. Se implementa la movilidad en cada una de las Estaciones Móviles (MS) asociadas a la Estación Base (BS).
6. Se determinan los efectos del canal sobre la señal de información transmitida.
7. Se realiza el Control Ideal de Potencia (IPC) en el Enlace de Subida (UL), determinando las potencias de transmisión de las Estaciones Móviles (MS).  
NOTA: A las Estaciones Móviles (MS) por fuera de la celda de estudio, se les asigna una potencia de transmisión que se mantiene durante toda la simulación, y la señal resultante en la Estación Base (BS) después de verse afectada por las condiciones del canal, se considera como Interferencia Inter-Celda (ICI).
8. Se determina la probabilidad de degradación (*Outage Probability*) teniendo en cuenta la cantidad de usuarios atendidos con relación al total de usuarios que se encuentran asociados a la celda de análisis.
9. Se evalúa la condición de finalización de la simulación, la cual depende de un número de iteraciones o repeticiones las cuales han sido establecidas en 1000.
10. Para el análisis de cobertura se considera el alcance máximo hasta superar el 5% de usuarios no atendidos del total de usuarios al interior de la celda.
11. Para realizar el análisis de cobertura y capacidad del sistema se realizan graficas estadísticas de las variables analizadas (potencias de transmisión, probabilidad de degradación y cobertura del sistema).

### 2.4.3 Diagrama de Flujo del Modelo de Movilidad de Usuario

La movilidad de usuario especificada en el diagrama de flujo que muestra la figura 2.6, se realizó teniendo en cuenta el diagrama de flujo del modelo de movilidad de usuario mostrado en la figura 2.7. De esta figura se observa que el modelo sigue los siguientes pasos:

1. Se generan y distribuyen aleatoriamente los usuarios al interior del escenario.
2. Se evalúa para todos y cada uno de los usuarios en el escenario si se encuentran al interior de la celda de análisis, es decir, se comprueba si la distancia entre el usuario y la Estación Base (BS) es menor o igual que el radio de la celda.

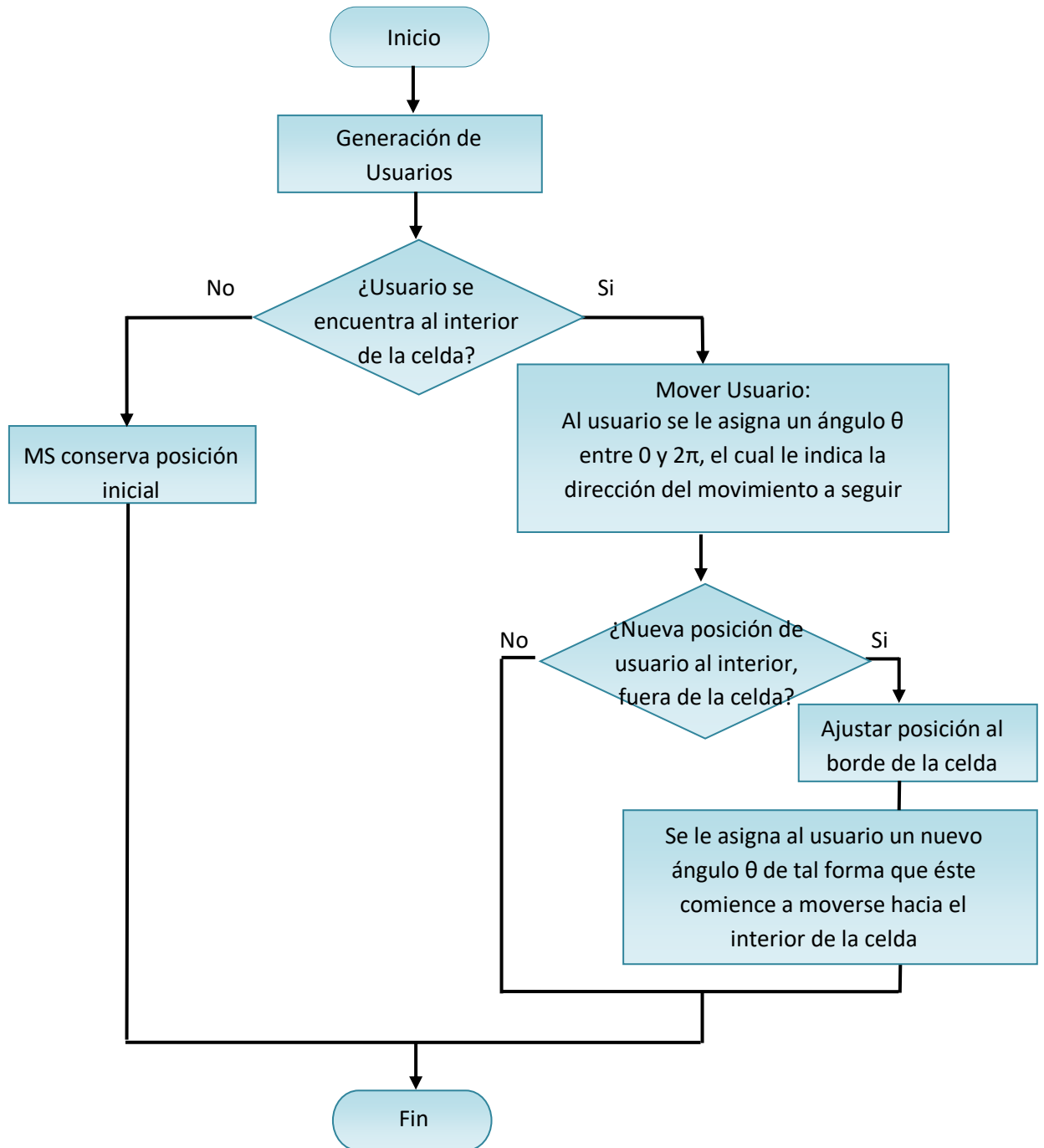


Figura 2.7 Diagrama de Flujo Modelo de Movilidad de Usuario.



3. Si el usuario se encuentra por fuera de la celda, éste no se mueve, permaneciendo durante toda la simulación con la posición que le fue asignada inicialmente.
4. Si por el contrario, el usuario se encuentra al interior de la celda, éste se desplaza hacia una nueva posición.
5. Se evalúa si la nueva posición del usuario se encuentra fuera de la celda.
6. En el caso de que la nueva posición se encuentre fuera de la celda, se realiza un ajuste en la posición del usuario llevándolo sobre el borde de la celda como se explicó en el apartado 2.3.3.
7. Los pasos 2 a 6 se repiten en cada iteración de la simulación.

#### 2.4.4 Diagrama de Flujo del Control Ideal de Potencia

El procedimiento de Control de Potencia (PC) definido en el diagrama de flujo que muestra la figura 2.6, se realizó teniendo en cuenta el diagrama de flujo del Control Ideal de Potencia (IPC) mostrado en la figura 2.8, en el cual se realizan los siguientes pasos:

1. Se determina la matriz A (ecuación 2.8).
2. Se calcula la matriz inversa de A.
3. Se realiza el cálculo de las potencias de transmisión (ecuación 2.9).
4. Se asignan las potencias calculadas a los usuarios.
5. Se realiza el cálculo de la SINR para identificar que usuarios cumplen con la SINR objetivo.

## 2.5 SELECCIÓN DEL LENGUAJE

En la selección de la herramienta de Simulación se debe optar por una que permita cumplir con los objetivos de este trabajo de grado y que represente de manera adecuada el sistema a simular. Por ende, para el desarrollo de este trabajo de grado se considera que el software Matlab® (*MatrixLaboratory*) es el más apropiado debido a su documentación, usabilidad, seguridad, y eficiencia al realizar cálculos matemáticos, además, la Universidad del Cauca cuenta con la licencia de funcionamiento.

Matlab® es un lenguaje diseñado para el análisis numérico, gestión de matrices, modelado, simulación, análisis, procesamiento de datos, desarrollo de algoritmos, visualización y representación de gráficos. Lo anterior hace que Matlab® tenga gran acogida en la comunidad científica e investigativa a nivel mundial [32]. Además cuenta con su propio lenguaje de programación de alto nivel (Lenguaje M) y está disponible para plataformas Windows, Apple Mac OS X entre otras.

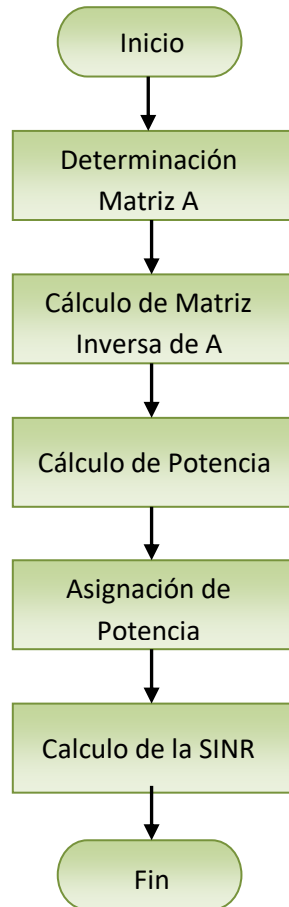


Figura 2.8 Diagrama de Flujo del Control Ideal de Potencia (IPC).

## 2.6 CODIFICACIÓN DEL LENGUAJE

La conversión del sistema propuesto en instrucciones de lenguaje de programación se realiza en Matlab® mediante el uso de estructuras de control, que permiten la interacción de los módulos definidos en el algoritmo principal.

Inicialmente se crean variables que permiten definir y variar características de los escenarios de simulación como: Dimensiones del escenario, Ubicación de la Estación Base (BS), Radio de la celda, Frecuencia de operación del sistema, Ancho de Banda (BW, *Band-Width*) y potencia máxima de transmisión de las Estaciones Móviles (MS).

Posteriormente, mediante el uso de estructuras repetitivas se realiza el movimiento de los usuarios y el cálculo de pérdidas de propagación en cada nueva posición de las Estaciones Móviles (MS). Para garantizar que el movimiento



de los usuarios que se encuentran dentro de la celda de análisis este limitado únicamente al interior de esta, se utilizan estructuras condicionales.

De forma semejante, con estructuras repetitivas se implementa el Control Ideal de Potencia (IPC), obteniendo las potencias con las cuales deben transmitir los usuarios al interior de la celda. A partir de estos valores de potencia se calculan los valores de Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) y se evalúa cuales usuarios son los que cumplen con el valor objetivo de esta relación.

## **2.7 VALIDACIÓN**

Para la validación del modelo se realiza la comparación entre un escenario en el cual se aplica el procedimiento de Control Ideal de Potencia (IPC) y otro en el que no, además se compara un escenario en el cual se implementa la movilidad de usuario con otro escenario sin movilidad, ya que tanto el escenario sin Control Ideal de Potencia (IPC) como el escenario sin movilidad de usuario sirven como punto de referencia para evaluar sí el comportamiento del modelo del sistema definido es adecuado. Además esta comparación permite observar el efecto que tienen el Control Ideal de Potencia (IPC) y la movilidad de los usuarios en el desempeño del sistema.

## **2.8 EXPERIMENTACIÓN**

La experimentación se realiza teniendo en cuenta las características del sistema y parámetros que constituyen variables de entrada para el algoritmo. En el presente trabajo de grado se realizaron pruebas modificando las siguientes variables: dimensión del escenario, número de usuarios, tamaño de la celda y la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) requerida para cada Estación Móvil (MS), con el fin de analizar los resultados obtenidos con la aplicación del Control Ideal de Potencia (IPC) en un sistema de comunicaciones con movilidad en los usuarios. Las pruebas realizadas se describen en el siguiente capítulo.

## **2.9 MONITOREO Y CONTROL**

Todo sistema es dinámico y lo más probable es que con el transcurso del tiempo vaya cambiando en su estructura real. Es por ello que el modelo de simulación debe contar con la posibilidad de ser modificado para hacer actualizaciones periódicas, garantizando que el modelo continúe siendo una representación lo más cercana posible del sistema real [28].





En este caso, el algoritmo desarrollado se puede modificar en cualquier momento, ya sea para actualizar su funcionamiento o para realizar otro tipo de estudio relacionado con un sistema de comunicaciones móvil e inalámbrico, debido a que la codificación se realizó de forma clara, ordenada y sencilla permitiendo que el algoritmo sea manipulado fácilmente.



## 3. PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS

En el capítulo anterior se obtuvo el modelo de simulación del sistema teniendo en cuenta el procedimiento de Control Ideal de Potencia (IPC) y la movilidad de los usuarios, a partir de la metodología para la simulación de sistemas de telecomunicaciones [28]. En este capítulo se presentan las pruebas realizadas a la implementación de este modelo y el análisis de los resultados obtenidos de acuerdo a la siguiente estructura: en la sección 3.1 se presenta una descripción general del escenario de simulación, en la sección 3.2 se presenta el plan de pruebas de simulación establecido, en la sección 3.3 se presentan los resultados obtenidos al ejecutar dicho plan de pruebas y en la sección 3.4 se realiza una comparación de los resultados obtenidos, para determinar el impacto que tiene implementar Control Ideal de Potencia (IPC) y movilidad de los usuarios en el desempeño del sistema.

### 3.1 DESCRIPCION GENERAL DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN

En la simulación se representa un escenario de dimensiones 3 Km x 3 Km con una celda de radio igual a 0.8 Km, en el cual se distribuyen de manera aleatoria siguiendo una distribución uniforme un número determinado de usuarios y se incluye en el centro del escenario la Estación Base (BS) de la celda de análisis. En la figura 3.1 se observa el escenario de simulación, en donde la Estación Base (BS) aparece representada por un rombo de color azul y los usuarios o Estaciones Móviles (MS) son representados por círculos de diferentes colores. Esta variación en el color depende de las siguientes condiciones:

- **Negro:** Son los usuarios que se encuentran asociados a otra Estación Base (BS).
- **Azul:** Son los usuarios que están asociados a la Estación Base (BS) de análisis y se encuentran conectados.
- **Rojo:** Son los usuarios que están asociados a la Estación Base (BS) de análisis pero que se encuentran sin servicio.

El estado en el que se encuentren los usuarios asociados a la Estación Base (BS) de análisis (conectados ó sin servicio) depende de si cumplen o no con su requerimiento de Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR), es decir, si la SINR es mayor o igual que la SINR objetivo, el usuario se encuentra conectado, en caso contrario el usuario se encuentra sin servicio. Los usuarios en negro asociados a otra Estación Base (BS), transmiten con una potencia constante de 20



dBm, generando sobre la Estación Base (BS) de análisis un nivel de interferencia constante, lo cual permite un análisis del sistema de comunicaciones móvil e inalámbrico en condiciones desfavorables.

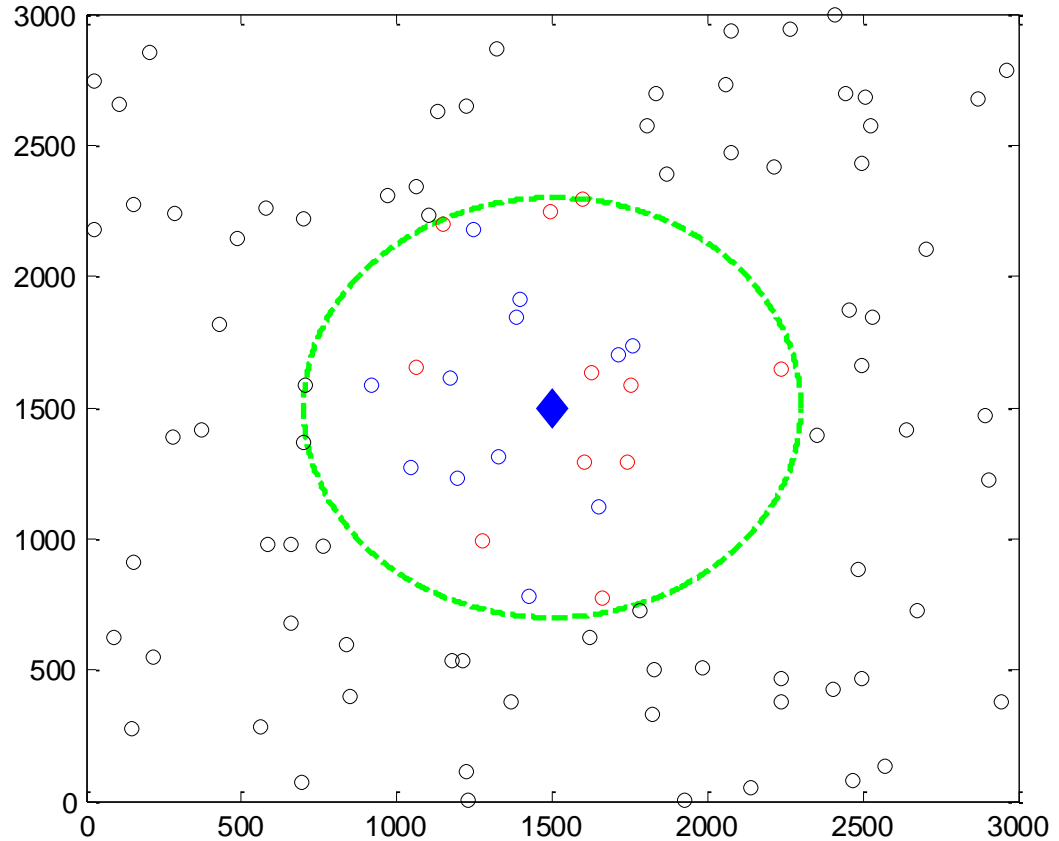


Figura 3.1 Escenario de Simulación con 100 Usuarios.

### 3.2 PLAN DE PRUEBAS

Con el propósito de observar los efectos que tiene el aplicar el algoritmo de Control Ideal de Potencia (IPC) y la movilidad en los usuarios sobre el desempeño general del sistema, se diseñó y ejecutó un plan de pruebas de simulación, el cual permitió realizar una evaluación y un análisis de la cobertura del mismo.

El plan de pruebas se compone de tres escenarios, el primero de ellos es un escenario básico, que corresponde a un sistema de comunicaciones móviles e inalámbrico que no tiene implementada la movilidad de los usuarios y en el cual se aplica Control Ideal de Potencia, el segundo es un sistema en donde se implementan tanto la movilidad de los usuarios como el Control Ideal de Potencia (IPC), el tercer escenario, escenario es un sistema en el cual se implementa la



movilidad de los usuarios y no se aplica Control de Potencia (PC). Cada uno de estos tres escenarios, cuenta con tres casos de simulación, en los cuales se cambió el valor de la SINR requerida y el número de usuarios. A su vez, cada caso de simulación cuenta con una serie de repeticiones siguiendo el método Montecarlo<sup>12</sup>, que propone repetir una simulación un número considerable de veces de tal manera que permita hallar la probabilidad de un suceso.

Para establecer el número de repeticiones con el cual se obtuvieran resultados estadísticamente validos se realizó el siguiente proceso:

- Partiendo de que se tiene un escenario de 3 Km x 3 Km y dentro de este se ubican 100 usuarios de manera aleatoria siguiendo una distribución uniforme, se calculó la densidad de usuarios al interior de la celda de análisis como se muestra a continuación.

$$\text{Area Escenario} = AE = 3000 \text{ m} \times 3000 \text{ m} = 9000000 \text{ m}^2$$

$$\text{Densidad Usuarios Escenario} = DUE = \frac{\# \text{ Usuarios}}{AE} = \frac{100}{9000000 \text{ m}^2}$$

$$\text{Area Celda} = AC = \pi R^2 = \pi (800 \text{ m})^2 = 2010619,3 \text{ m}^2$$

$$\# \text{ Usuarios Celda} = DUE \times AC = \frac{100}{9000000 \text{ m}^2} \times 2010619,3 \text{ m}^2$$

$$\# \text{ Usuarios Celda} = 22,34 \text{ Usuarios} \approx 23 \text{ Usuarios}$$

- Una vez calculado este valor se ejecuta la simulación en Matlab y se obtiene que para 1000 simulaciones la media de los usuarios que son ubicados al interior de la celda tiende a 23 usuarios.

Definido el valor del número de repeticiones, se realizaron las pruebas para determinar cuál era el valor de potencia de transmisión de las Estaciones Móviles (MS), el radio máximo de cobertura, la probabilidad de degradación y la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) de los usuarios al interior de la celda.

La tabla 3.1 muestra en resumen las pruebas realizadas para los tres escenarios definidos.

---

<sup>12</sup> El método Montecarlo es una técnica de muestreo que se emplea como herramienta de investigación y planeación, la cual se basa en la repetición de fenómenos aleatorios para hallar la probabilidad de un suceso [30].



| Escenarios            | Casos de Simulación | IPC | Movilidad | SINR Objetivo | Gráficas Estadísticas | N° de Usuarios |
|-----------------------|---------------------|-----|-----------|---------------|-----------------------|----------------|
| Escenario 1           | Caso 1.1            | Si  | No        | -20 dB        | Cobertura             | 100            |
|                       |                     |     |           |               | Potencias de Usuarios |                |
|                       |                     |     |           |               | Prob. de Degradación  |                |
|                       |                     |     |           |               | Gráfica SINR          |                |
|                       | Caso 1.2            | Si  | No        | -14 dB        | Cobertura             | 100            |
|                       |                     |     |           |               | Potencias de Usuarios |                |
|                       |                     |     |           |               | Prob. de Degradación  |                |
|                       |                     |     |           |               | Gráfica SINR          |                |
|                       | Caso 1.3            | Si  | No        | -20 dB        | Cobertura             | 50             |
| Potencias de Usuarios |                     |     |           |               |                       |                |
| Prob. de Degradación  |                     |     |           |               |                       |                |
| Gráfica SINR          |                     |     |           |               |                       |                |
| Escenario 2           | Caso 2.1            | Si  | Si        | -20 dB        | Cobertura             | 100            |
|                       |                     |     |           |               | Potencias de Usuarios |                |
|                       |                     |     |           |               | Prob. de Degradación  |                |
|                       |                     |     |           |               | Gráfica SINR          |                |
|                       | Caso 2.2            | Si  | Si        | -14 dB        | Cobertura             | 100            |
|                       |                     |     |           |               | Potencias de Usuarios |                |
|                       |                     |     |           |               | Prob. de Degradación  |                |
|                       |                     |     |           |               | Gráfica SINR          |                |
|                       | Caso 2.3            | Si  | Si        | -20 dB        | Cobertura             | 50             |
| Potencias de Usuarios |                     |     |           |               |                       |                |
| Prob. de Degradación  |                     |     |           |               |                       |                |
| Gráfica SINR          |                     |     |           |               |                       |                |
| Escenario 3           | Caso 3.1            | No  | Si        | -20 dB        | Cobertura             | 100            |
|                       |                     |     |           |               | Potencias de Usuarios |                |
|                       |                     |     |           |               | Prob. de Degradación  |                |
|                       |                     |     |           |               | Gráfica SINR          |                |
|                       | Caso 3.2            | No  | Si        | -14 dB        | Cobertura             | 100            |
|                       |                     |     |           |               | Potencias de Usuarios |                |
|                       |                     |     |           |               | Prob. de Degradación  |                |
|                       |                     |     |           |               | Gráfica SINR          |                |
|                       | Caso 3.3            | No  | Si        | -20 dB        | Cobertura             | 50             |
| Potencias de Usuarios |                     |     |           |               |                       |                |
| Prob. de Degradación  |                     |     |           |               |                       |                |
| Gráfica SINR          |                     |     |           |               |                       |                |

Tabla 3.1 Plan de Pruebas de Simulación.



### 3.3 RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos al ejecutar el plan de pruebas mostrado en la tabla 3.1 (los resultados de los casos de simulación 2.2, 2.3, 3.2 y 3.3 se presentan en los apéndices A y B).

Cabe resaltar que en los escenarios de simulación 2 y 3, donde se implementa la movilidad de los usuarios, cada una de las 1000 simulaciones que se realizaron contaba con 1000 iteraciones internas, es decir, que en cada simulación se desplazaba 1000 veces a cada uno de los usuarios al interior de la celda. Por ello, al finalizar la simulación y debido a que la densidad de usuarios al interior de la celda tiende a 23, se obtienen 23'000.000 de datos aproximadamente para los histogramas de potencia de transmisión de usuarios.

#### 3.3.1 Escenario 1: Con Control Ideal de Potencia (IPC) y sin Movilidad en los Usuarios.

En este escenario de simulación se implementan únicamente el Control Ideal de Potencia (IPC) mientras que la movilidad de los usuarios no se tiene en cuenta.

##### 3.3.1.1 Caso 1.1

En esta simulación se distribuyen de manera aleatoria siguiendo una distribución uniforme, 100 usuarios al interior del escenario y se establece el valor de la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) objetivo en -20 dB.

En las figuras 3.2 a 3.7 se muestran los resultados estadísticos tras simular 1.000 veces el caso 1.1 en Matlab, para las condiciones establecidas en la tabla 3.1.

Las figura 3.2 y 3.3, presenta los resultados de las potencias de transmisión requeridas por las Estaciones Móviles (MS) al interior de la celda y las potencias de transmisión de las Estaciones Móviles (MS) conectadas a la Estación Base (BS) respectivamente. De estas figuras se puede ver que la máxima potencia de transmisión utilizada por los usuarios es de 24 dBm, sin embargo, de la figura 3.3 se observa que la máxima potencia de transmisión del 61,4% de los usuarios es de 12 dBm.

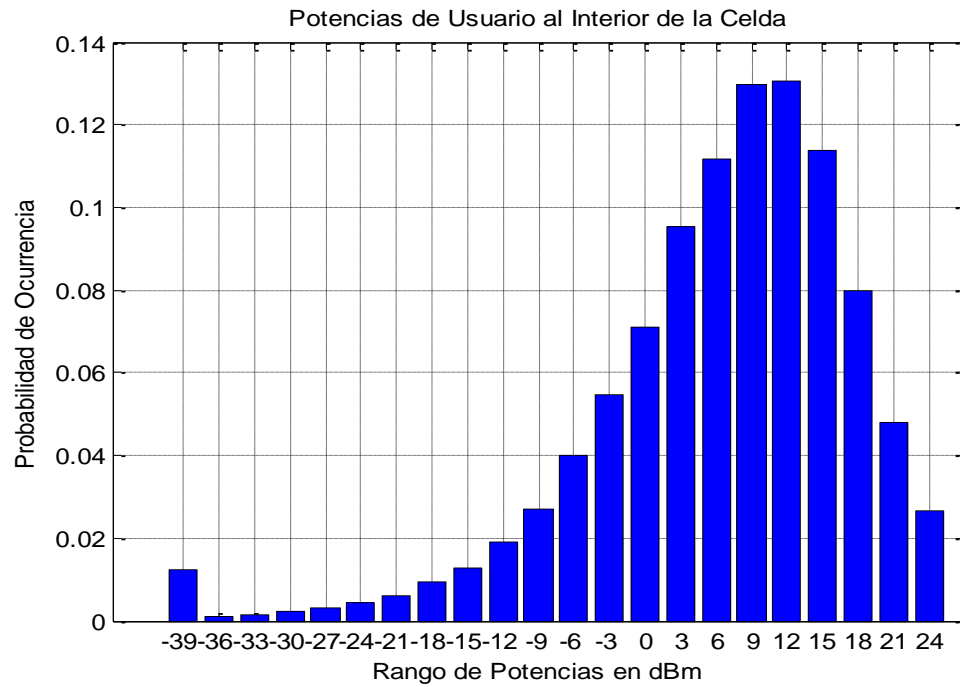


Figura 3.2 Potencias de Transmisión de Usuario al Interior de la Celda<sup>13</sup>.

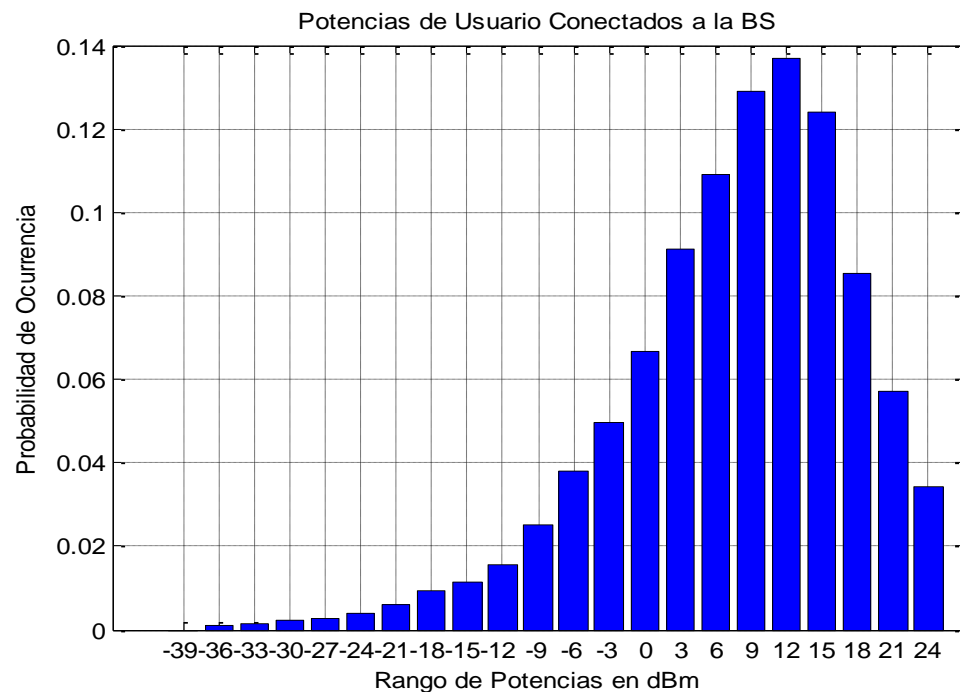


Figura 3.3 Potencias de Transmisión de Usuarios Conectados a la BS<sup>14</sup>.

<sup>13</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 23.022.

<sup>14</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 10.038.



Los resultados de máxima cobertura en la celda de análisis se exponen en la figura 3.4. En esta figura se observa que la probabilidad de que el valor de cobertura se encuentre por encima de 700 metros<sup>15</sup> es de 0,9, es decir que para valores inferiores a 700 metros se obtiene una probabilidad de 0.1. En la figura 3.5 se aprecian los resultados de máxima cobertura del sistema teniendo en cuenta el 5% de probabilidad de degradación<sup>16</sup>. De esta figura se ve que la probabilidad de que la cobertura sea superior a 280 metros es de 0,155, notándose que al tener en cuenta el 5% de probabilidad de degradación del sistema, los valores de cobertura disminuyen, concentrando el 0,845 de la probabilidad de ocurrencia en valores inferiores a 280 metros.

En la figura 3.6 se observan los resultados de la probabilidad de degradación del sistema. De esta figura se puede visualizar que la probabilidad de que la probabilidad de degradación tome valores menores a 0,6<sup>17</sup> es de 0,57. Además, se observa que la probabilidad de que la probabilidad de degradación del sistema sea de 0,6 es de 0,35, es decir, que un 35% de las veces el 40% de los usuarios lograron conectarse a la Estación Base (BS).

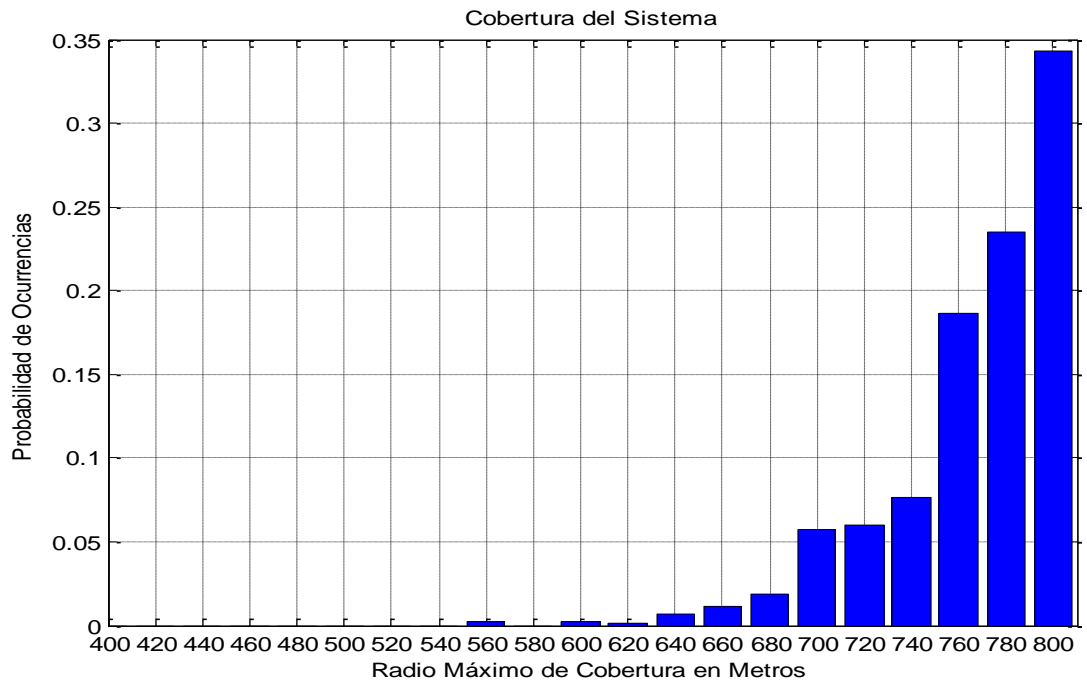


Figura 3.4 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida<sup>18</sup>.

<sup>15</sup> El valor específico de cobertura considera que éste se debe encontrar entre el valor especificado en el histograma menos 20 metros.

<sup>16</sup> El radio de cobertura teniendo en cuenta el 5% de probabilidad de degradación, es la distancia a la cual se encuentra el último usuario que completa el 5% de usuarios sin servicio.

<sup>17</sup> El valor específico de probabilidad de degradación considera que este valor se debe encontrar entre el valor especificado en el histograma menos 0,1.

<sup>18</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1.000.



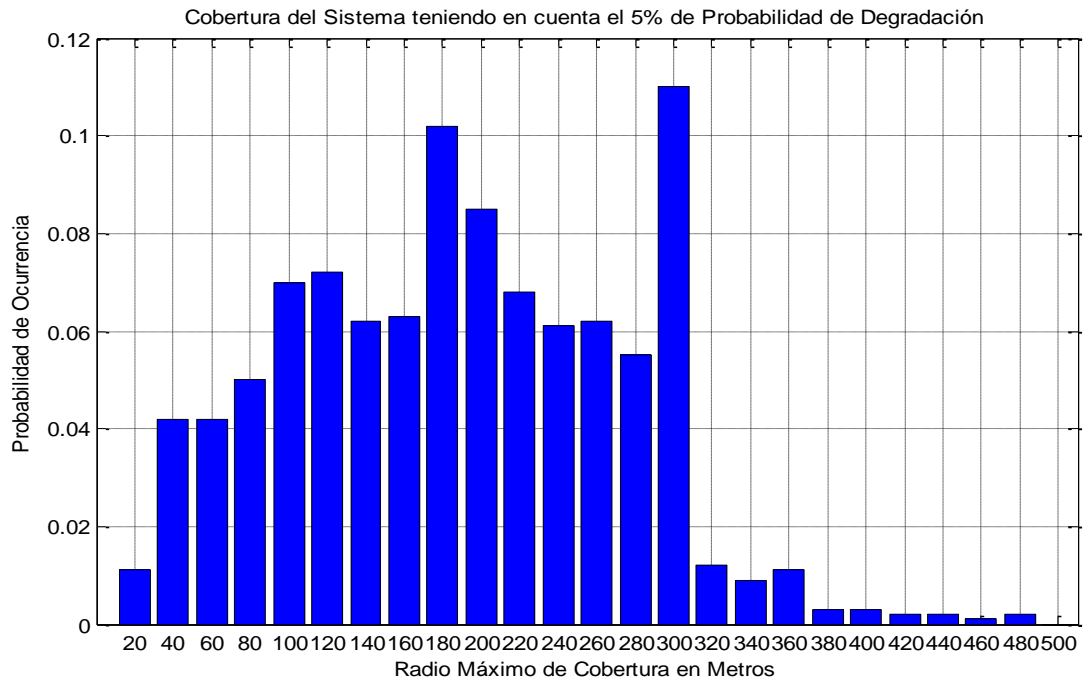


Figura 3.5 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación<sup>19</sup>.

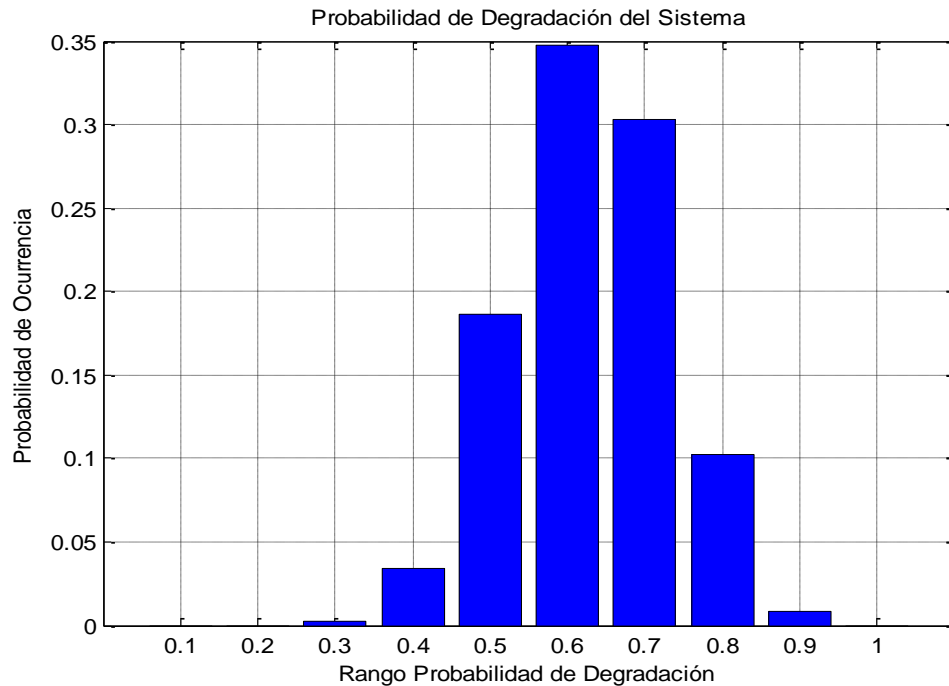


Figura 3.6 Probabilidad de Degradación del Sistema<sup>20</sup>.

<sup>19</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1.000.

<sup>20</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1.000.



Los valores de Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) de los usuarios al interior de la celda se muestran en la figura 3.7. De esta figura se observa que la probabilidad de que los usuarios logren satisfacer su requerimiento de SINR es de 0,43.

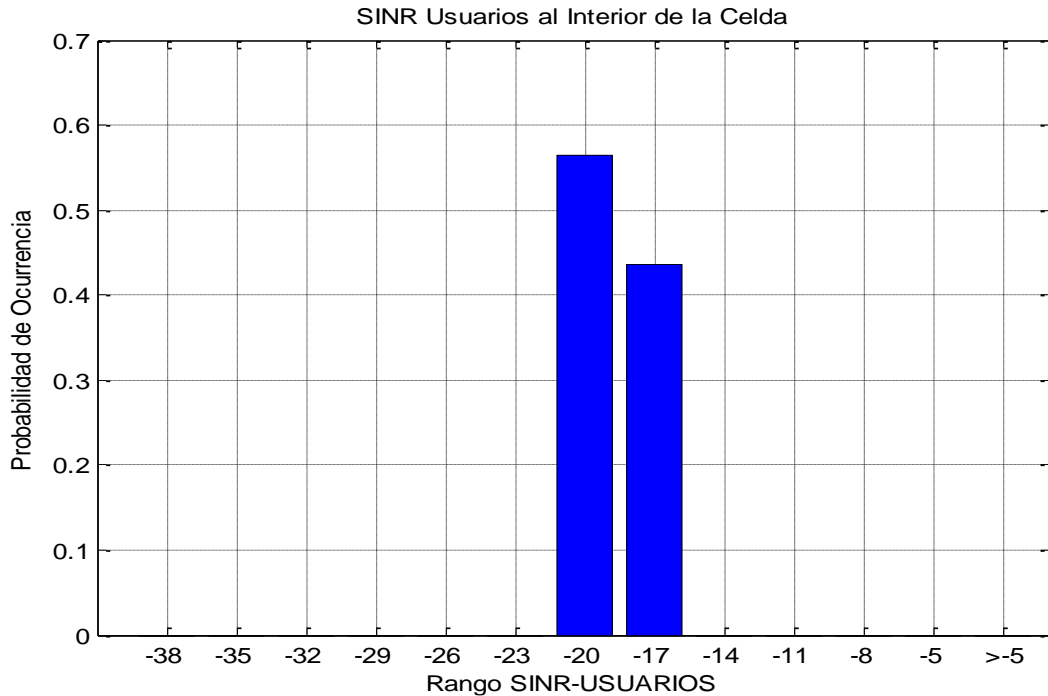


Figura 3.7 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda<sup>21</sup>.

En la tabla 3.2 se encuentran los resultados de las medidas estadísticas de las variables analizadas (Potencias de Transmisión, Cobertura del Sistema, Probabilidad de Degradación y SINR) para este caso de simulación.

| CASO 1.1            |                               |   |   |                             |                    |
|---------------------|-------------------------------|---|---|-----------------------------|--------------------|
| Variables           | Potencia de Transmisión (dBm) | Cobertura del Sistema ( sin 5% de PD) (m) | Cobertura del Sistema ( con 5% de PD) (m) | Probabilidad de Degradación | SINR Usuarios (dB) |
| Medida              |                               |   |   |                             |                    |
| Media               | 7,5682                        | 757,580                                   | 178,253                                   | 0,5647                      | -21,027            |
| Moda                | 12                            | 800                                       | 300                                       | 0,6                         | -21,716            |
| Mediana             | 9                             | 780                                       | 180                                       | 0,6                         | -20                |
| Varianza            | 101,644                       | 1464,21                                   | 7267,2                                    | 0,0088                      | 19,377             |
| Desviación Estándar | 10,082                        | 38,265                                    | 85,247                                    | 0,0941                      | 4,402              |

Tabla 3.2 Estadísticas de las variables analizadas para el caso de simulación 1.1.

<sup>21</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1.000.



### 3.3.1.2 Caso 1.2

En esta prueba se ubican de manera aleatoria siguiendo una distribución uniforme 100 usuarios en el escenario y se cambia el valor de la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) objetivo a -14 dB.

Los resultados estadísticos tras simular 1.000 veces el caso 1.2 en Matlab, se muestran en las figuras 3.8 a 3.13.

Las potencias de transmisión requeridas por las Estaciones Móviles (MS) se presentan en las figuras 3.8 y 3.9. La figura 3.9 muestra que la probabilidad de que la potencia de transmisión sea inferior a 12 dBm es de 0,337, decreciendo esta probabilidad en 0,277 en relación al valor obtenido en el caso 1.1. De esta figura se puede concluir que al aumentar el requerimiento de SINR de -20 dB a -14, hay una mayor probabilidad de que los niveles de potencia de transmisión se encuentren por encima de 12 dBm, lo que significa que para cumplir con un requerimiento de SINR más alto se debe incrementar la potencia de transmisión.

La figura 3.10 expone el resultado de la máxima cobertura en el enlace de subida para el presente caso de estudio. De esta figura se puede ver que la probabilidad de que la cobertura sea mayor a 700 metros es de 0,796, disminuyendo esta probabilidad en 0.104 respecto al valor obtenido en el caso de simulación 1.1. Por lo tanto, esto indica que un incremento en el requerimiento de SINR supone un decremento en la cobertura del sistema. Por otro lado, la figura 3.11 presenta los resultados de cobertura en la celda al considerar el 5% de probabilidad de degradación. A partir de estos resultados, se observa que el valor de que la probabilidad de que la cobertura sea superior a 280 metros es de 0,394, lo que indica que la probabilidad de que los valores de cobertura se encuentren por encima de 280 metros es un 23,9% mayor al valor obtenido en el caso 1.1. Sin embargo, de esta figura se aprecia que para este caso los valores de cobertura se distribuyen de manera más amplia en los rangos definidos, es decir, la desviación estándar para este caso es mayor que la obtenida en el caso anterior, pasando de 85,247 a 109,114 (Tabla 3.2 y 3.3 respectivamente). De lo anterior se puede inferir que aumentar el valor de SINR requerida por los usuarios hace que los valores de cobertura se encuentren más dispersos en relación a su media.

La figura 3.12 presenta los resultados de la probabilidad de degradación del sistema. De esta figura se observa que existe un 47,9% de probabilidad de que la probabilidad de degradación este por debajo de 0,6, reduciéndose este valor en 9.1% en relación al valor obtenido en el caso 1.1, lo que implica que al aumentar el valor de SINR objetivo hace que la probabilidad de degradación del sistema aumente, por lo cual en este caso se obtuvo un valor medio de 0,637 (ver Tabla 3.3) mayor al obtenido en el caso anterior, el cual fue de 0,5647 (ver Tabla 3.2).

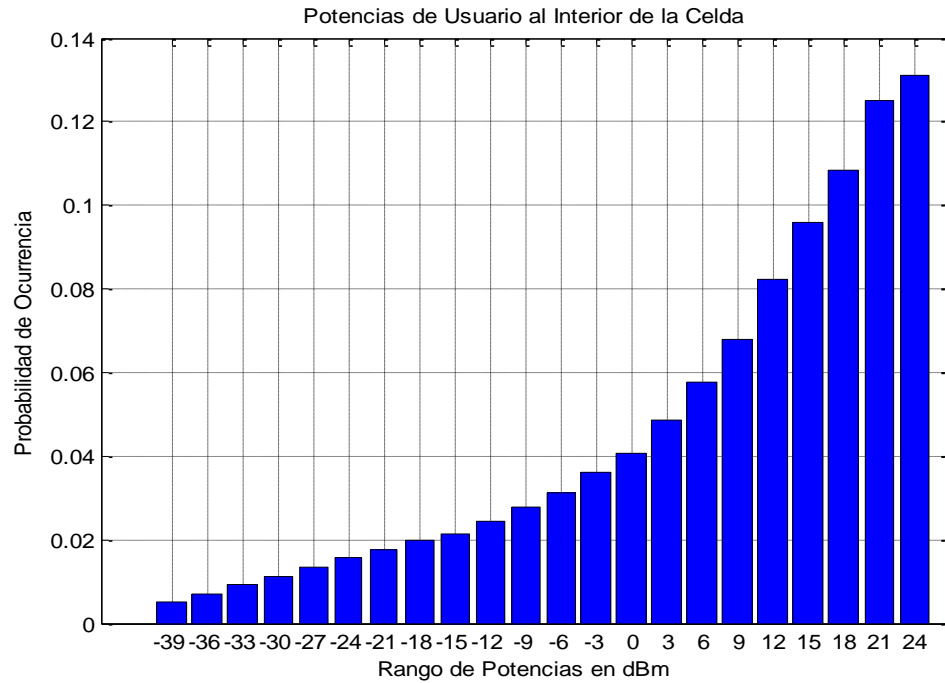


Figura 3.8 Potencias de Transmisión de Usuario al Interior de la Celda<sup>22</sup>.

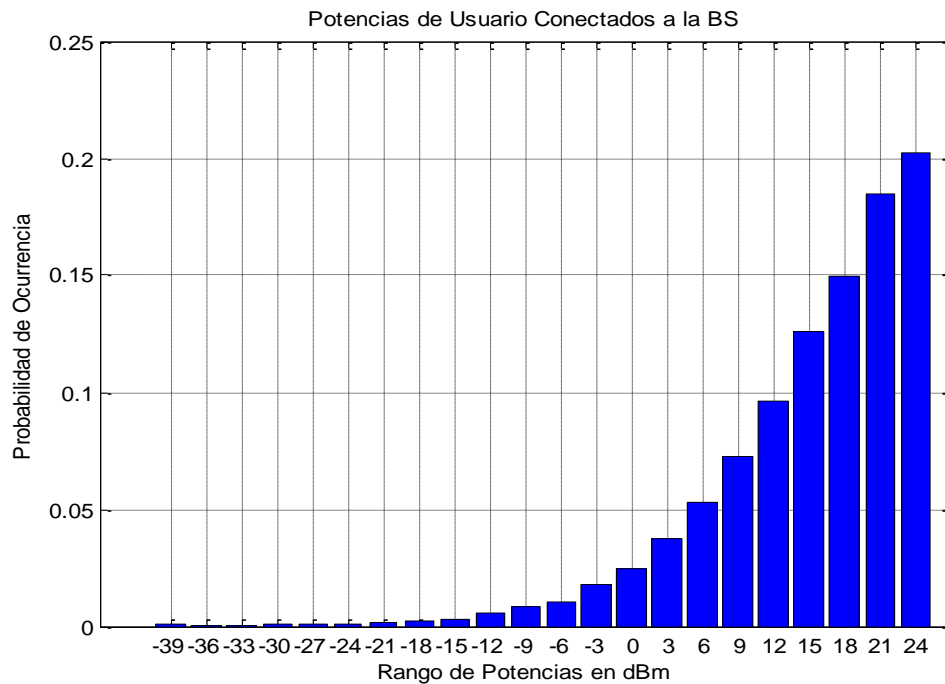


Figura 3.9 Potencias de Transmisión de Usuarios Conectados a la BS<sup>23</sup>.

<sup>22</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 23.102.

<sup>23</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 8.397.

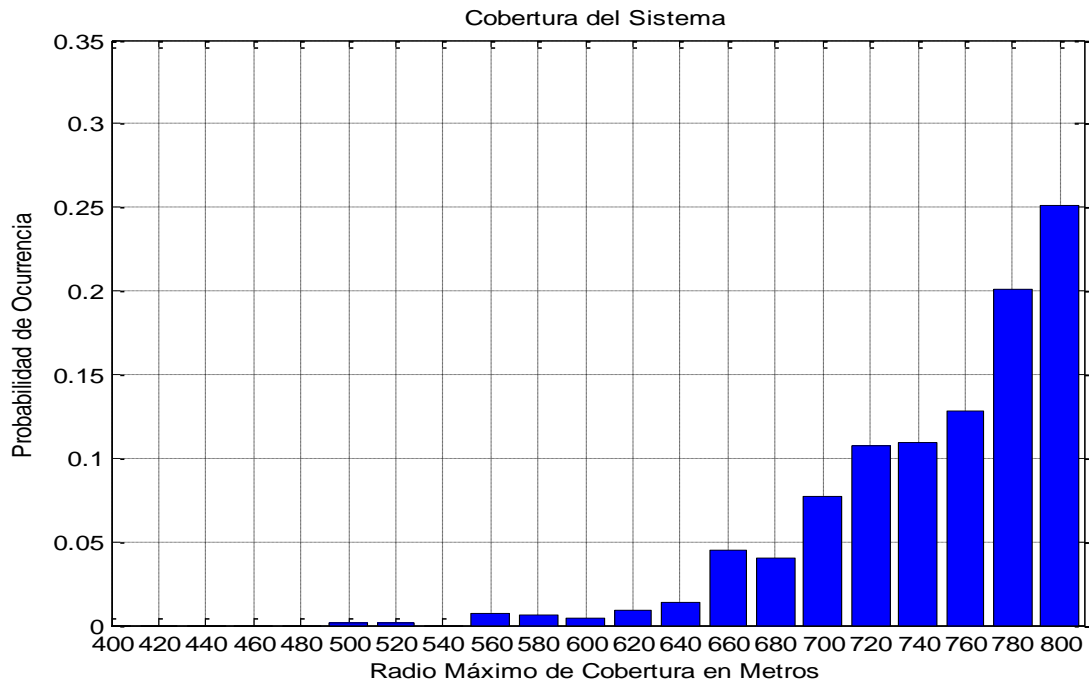


Figura 3.10 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida<sup>24</sup>.

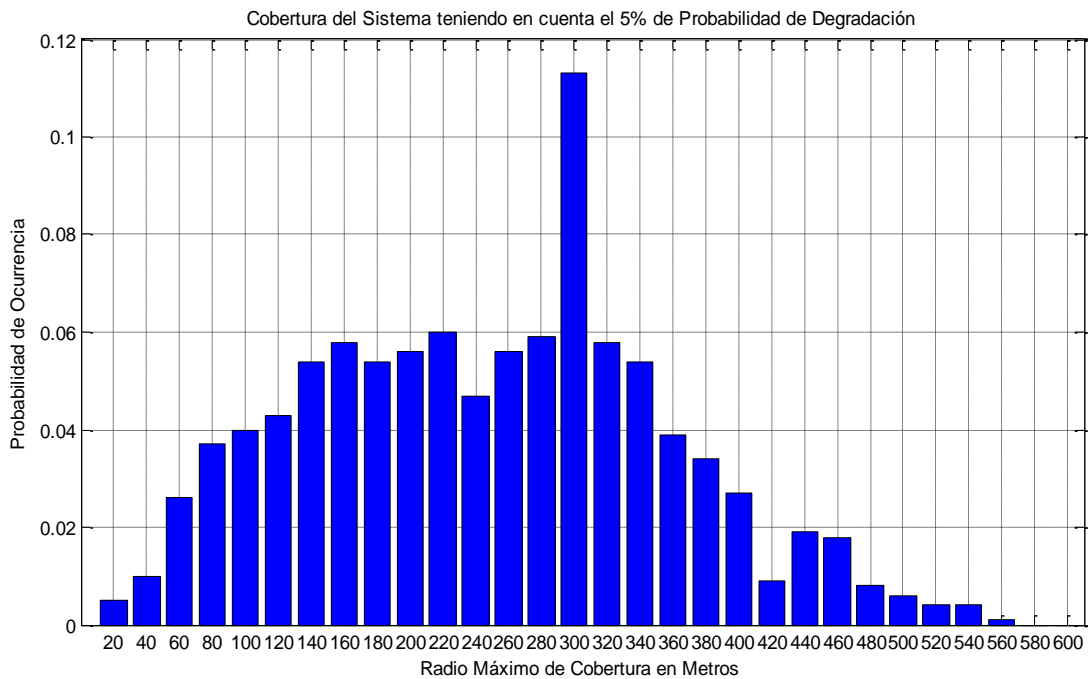


Figura 3.11 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación<sup>25</sup>.

<sup>24</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1.000.

<sup>25</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1.000.

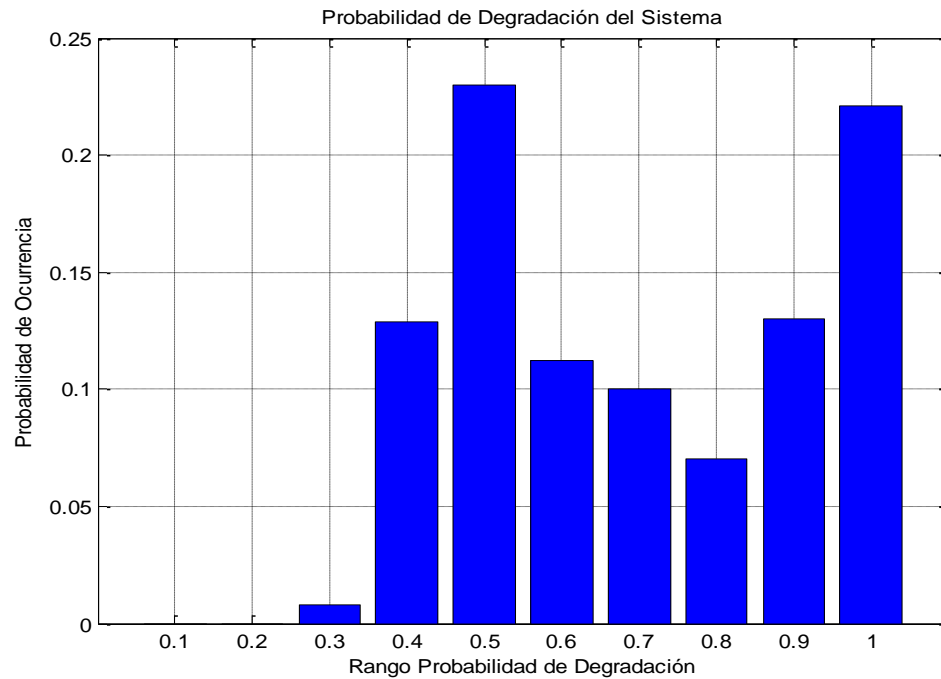


Figura 3.12 Probabilidad de Degradación del Sistema<sup>26</sup>.

La figura 3.13 ilustra los valores de Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) de los usuarios al interior de la celda. En esta figura se visualiza que la probabilidad de que la SINR sea mayor a -14 dB es de 0,363, lo que implica que un 63,7% de los usuarios no satisfacen su requerimiento de SINR. De estos resultados se observa que los usuarios que lograron conectarse a la Estación Base (BS) disminuyeron en un 7,3% en relación al caso de simulación anterior. Esta reducción en el porcentaje de usuarios conectados se debe a que al incrementar el valor de SINR requerida, los usuarios deben transmitir con niveles de potencia más altos, lo cual conlleva a un incremento en la interferencia del sistema.

<sup>26</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1.000.

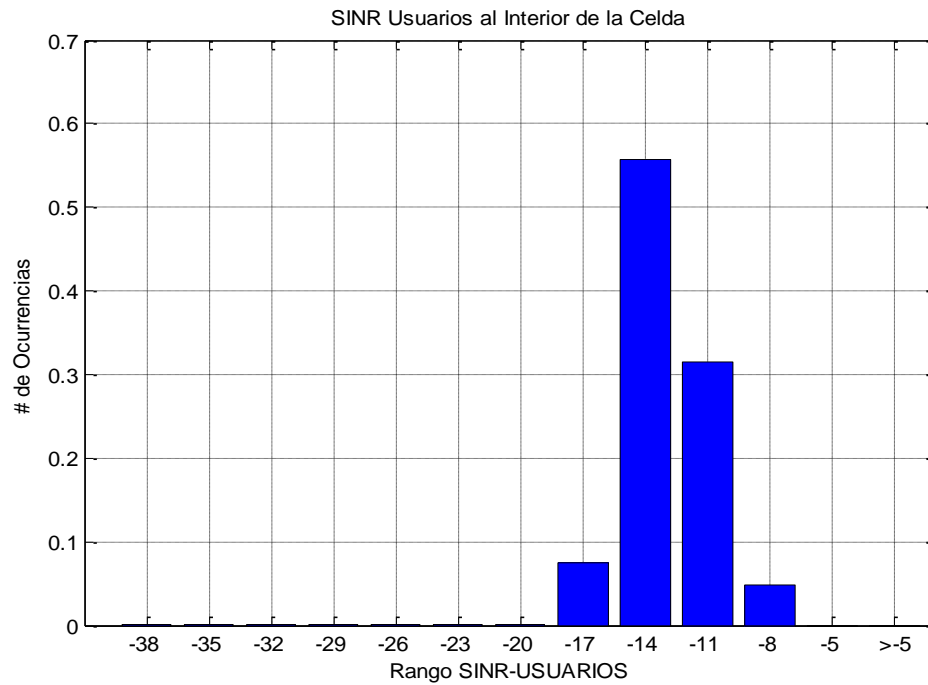


Figura 3.13 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda<sup>27</sup>.

La tabla 3.3 muestra los resultados de las diferentes medidas estadísticas analizadas (Potencias de Transmisión, Cobertura del Sistema, Probabilidad de Degradación y SINR) para este escenario.

| CASO 1.2            |                               |   |   |                             |                    |
|---------------------|-------------------------------|---|---|-----------------------------|--------------------|
| Variables / Medida  | Potencia de Transmisión (dBm) | Cobertura del Sistema ( sin 5% de PD) (m) | Cobertura del Sistema ( con 5% de PD) (m) | Probabilidad de Degradación | SINR Usuarios (dB) |
| Media               | 15,067                        | 739,1927                                  | 237,7895                                  | 0,637                       | -16,620            |
| Moda                | 24                            | 800                                       | 300                                       | 0,5                         | -15,3021           |
| Mediana             | 18                            | 760                                       | 260                                       | 0,6                         | -15,4867           |
| Varianza            | 77,792                        | 2705,31                                   | 11905,91                                  | 0,0588                      | 65,837             |
| Desviación Estándar | 8,82                          | 52,0126                                   | 109,1142                                  | 0,2425                      | 8,114              |

Tabla 3.3 Estadísticas de las variables analizadas para el caso de simulación 1.2.

<sup>27</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 23.102.



### 3.3.1.3 Caso 1.3

En este caso de simulación se establece el valor de la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) objetivo en -20 dB, y se sitúan de manera aleatoria siguiendo una distribución uniforme 50 usuarios al interior del escenario. Por lo tanto, para esta prueba se tiene una densidad de usuarios al interior de la celda igual a 12.

Tras ejecutar 1.000 veces el caso 1.3 en Matlab, se obtuvieron los resultados presentados en las figuras 3.14 a 3.19.

De las figuras 3.14 y 3.15, se puede ver que el valor de potencia de transmisión máximo asignado a los usuarios es de 24 dBm, aunque de la figura 3.15 se observa que la probabilidad de que la potencia de transmisión tome valores inferiores a 12 dBm es de 0,835, aumentando este valor de probabilidad en 0.239 con respecto al valor obtenido en el caso 1.1, lo que demuestra que al disminuir el número de usuarios al interior del escenario, el valor de potencia de transmisión requerido por los usuarios también disminuye.

En la figura 3.16, se observa que la probabilidad de que la cobertura se encuentre por encima de 700 metros es 0,995, siendo este valor un 9% mayor al valor de probabilidad obtenido en el caso 1.1, esto debido a que al haber un número de usuarios menor en el escenario la carga en el sistema disminuye, obteniéndose así valores máximos de cobertura. Teniendo en cuenta el 5% de la probabilidad de degradación, se observa de la figura 3.17 que la probabilidad de que la cobertura sobrepase los 280 metros es de 0.395, lo que indica que el 0.605 de la probabilidad esta acumulada para valores inferiores a 280 metros.

De la figura 3.18 se puede visualizar que al disminuir el número de usuarios en el escenario, los resultados de la probabilidad de degradación del sistema disminuyen en relación al caso 1.1, ya que en el caso 1.1 la probabilidad de que la probabilidad de degradación sea menor a 0,6 es de 0.57 y en este caso es de 0,63, esto como consecuencia de que en el sistema se presenten niveles de interferencia más bajos.



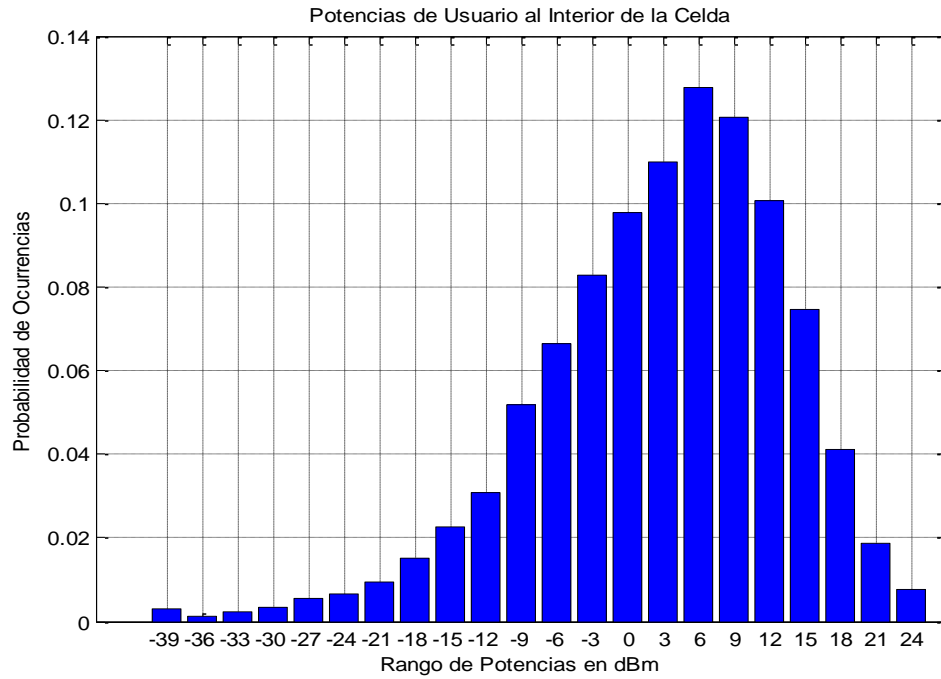


Figura 3.14 Potencias de Transmisión de Usuario al Interior de la Celda<sup>28</sup>.

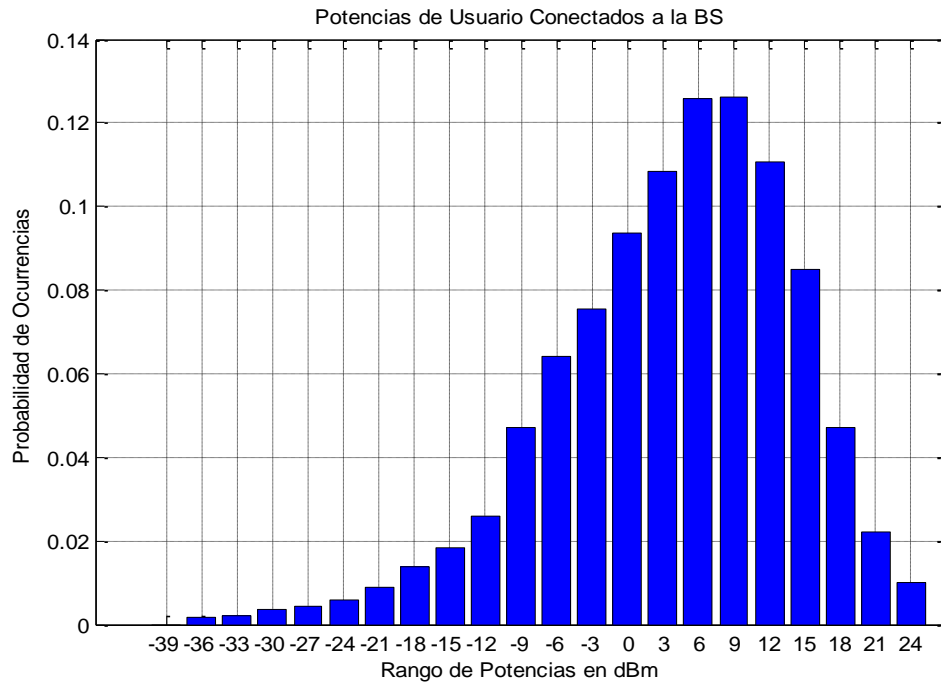


Figura 3.15 Potencias de Transmisión de Usuarios Conectados a la BS<sup>29</sup>.

<sup>28</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 11.902.

<sup>29</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 5.854.

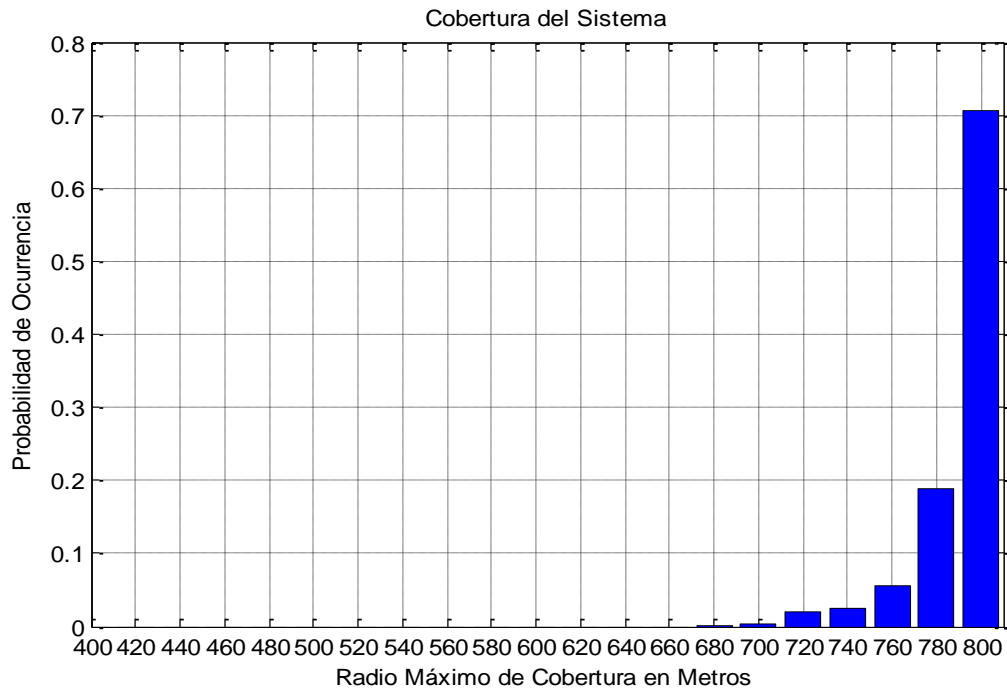


Figura 3.16 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida<sup>30</sup>.

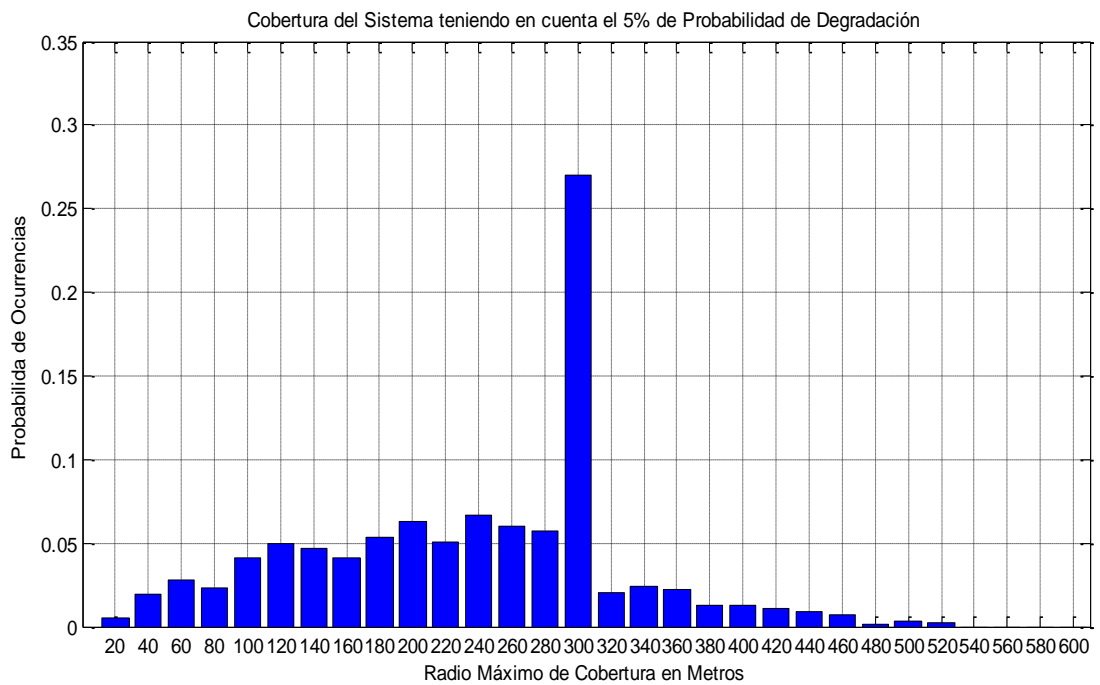


Figura 3.17 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación<sup>31</sup>.

<sup>30</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1.000.

<sup>31</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1.000.

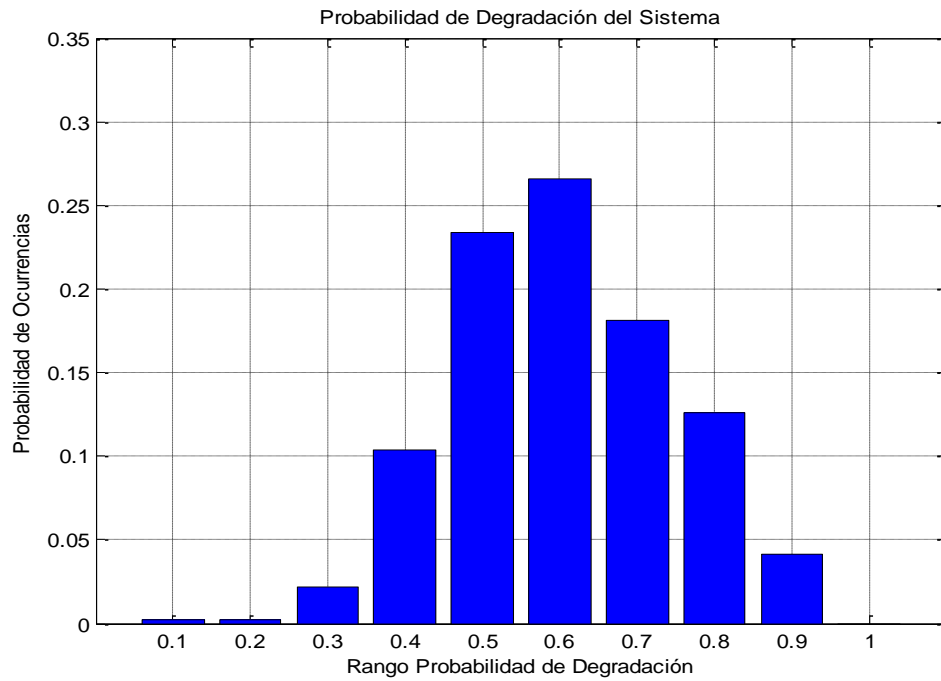


Figura 3.18 Probabilidad de Degradación del Sistema<sup>32</sup>.

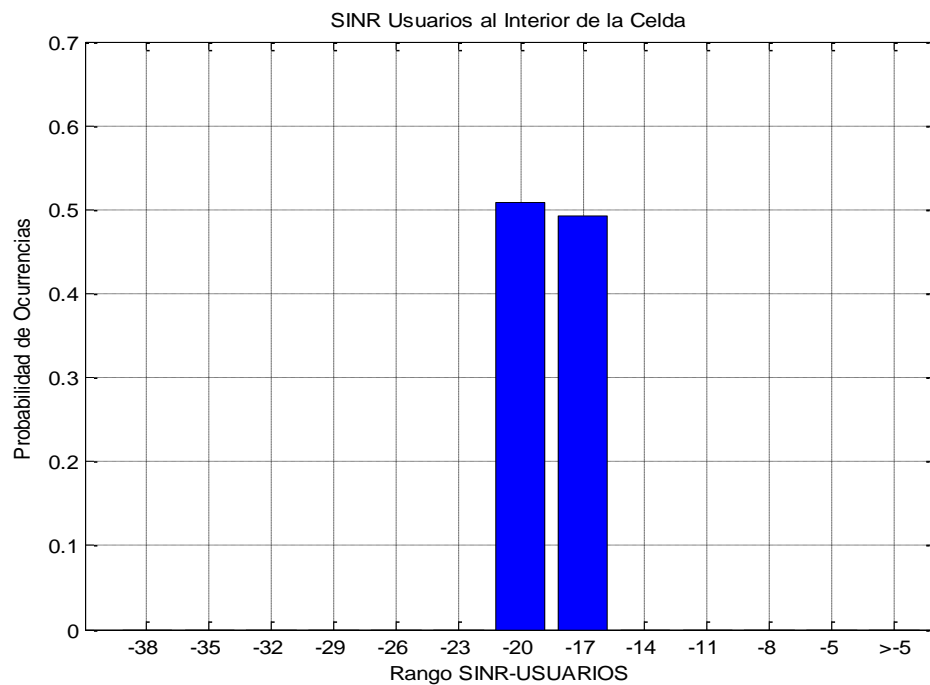


Figura 3.19 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda<sup>33</sup>.

<sup>32</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1.000.

<sup>33</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 11.902.



La figura 3.19 muestra, que los valores de Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) superiores a -20 dB, tienen una probabilidad de ocurrencia de 0,492, lo que indica que un 49,2% de los usuarios satisfacen su requerimiento de SINR. Este porcentaje tiene relación con el valor medio de la probabilidad de degradación obtenido en este caso, cuyo valor es de 0,508 (ver Tabla 3.4).

| CASO 1.3            |                               |   |   |                             |                    |
|---------------------|-------------------------------|---|---|-----------------------------|--------------------|
| Variables<br>Medida | Potencia de Transmisión (dBm) | Cobertura del Sistema ( sin 5% de PD) (m) | Cobertura del Sistema ( con 5% de PD) (m) | Probabilidad de Degradación | SINR Usuarios (dB) |
| Media               | 3,8165                        | 781,95                                    | 225,522                                   | 0,508                       | -20,444            |
| Moda                | 9                             | 800                                       | 300                                       | 0,6                         | -21,7041           |
| Mediana             | 6                             | 800                                       | 260                                       | 0,6                         | -20,262            |
| Varianza            | 104,272                       | 373,626                                   | 8740,342                                  | 0,019                       | 14,066             |
| Desviación Estándar | 10,2114                       | 19,329                                    | 93,489                                    | 0,139                       | 3,7505             |

Tabla 3.4 Estadísticas de las variables analizadas para el caso de simulación 1.3.

### 3.3.2 Escenario 2: Control Ideal de Potencia (IPC) y Movilidad en los Usuarios.

En este escenario se implementan tanto el Control Ideal de Potencia (IPC) como la movilidad de los usuarios.

#### 3.3.2.1 Caso 2.1

Para este caso se configuró el sistema de la siguiente manera: se ubicaron de forma aleatoria siguiendo una distribución uniforme 100 usuarios al interior del escenario y se fijó el valor de Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) objetivo en -20 dB.

Las figuras 3.20 a 3.25 exponen los resultados estadísticos obtenidos luego de ejecutar 1'000.000 de veces este caso en Matlab.

Los resultados de las potencias de transmisión requeridas por las Estaciones Móviles (MS) se presentan en las figuras 3.20 y 3.21. De estas figuras se puede ver que la potencia de transmisión más común en la simulación es 18 dBm. Además, de la figura 3.21 se observa, que la probabilidad de que la potencia de transmisión de los usuarios conectados a la Estación Base (BS) sea menor o igual a 12 dBm, es de 0,535, disminuyendo este valor en 0,079 con respecto al valor obtenido en el caso 1.1, lo que permite inferir que al implementar la movilidad en



los usuarios, éstos deben transmitir con niveles de potencias más elevados para cumplir con sus requerimientos de SINR.

Las figuras 3.22 y 3.23 exponen los resultados de máxima cobertura en el enlace de subida en la celda de análisis, teniendo en cuenta y no el 5% de probabilidad de degradación. La figura 3.22 muestra que la probabilidad de que los valores de cobertura se encuentren por encima de 700 metros es de 0,964, obteniendo un aumento en este caso de 0,06 en relación a lo obtenido en el caso 1.1, en el cual no se implementa la movilidad de los usuarios. Este resultado muestra que la movilidad incrementa la probabilidad de obtener valores de cobertura mayores, sin embargo aplicar movilidad supone un incremento en la probabilidad de degradación del sistema (ver figura 3.24). La figura 3.23 muestra, que al considerar el 5% de probabilidad de degradación obtener valores de cobertura superiores a 280 metros tiene una probabilidad de 0.33, es decir, que el 67% de la probabilidad está concentrada en valores inferiores a 280 metros. En cuanto a los resultados consignados en la tabla 3.5, se observa que los valores de desviación estándar de cobertura obtenidos en este caso, son mayores a los obtenidos en el caso 1.1 (ver Tabla 3.2), notándose, que el aplicar movilidad en los usuarios hace que los valores de cobertura sean más variables y por ende, los valores de desviación estándar aumenten.

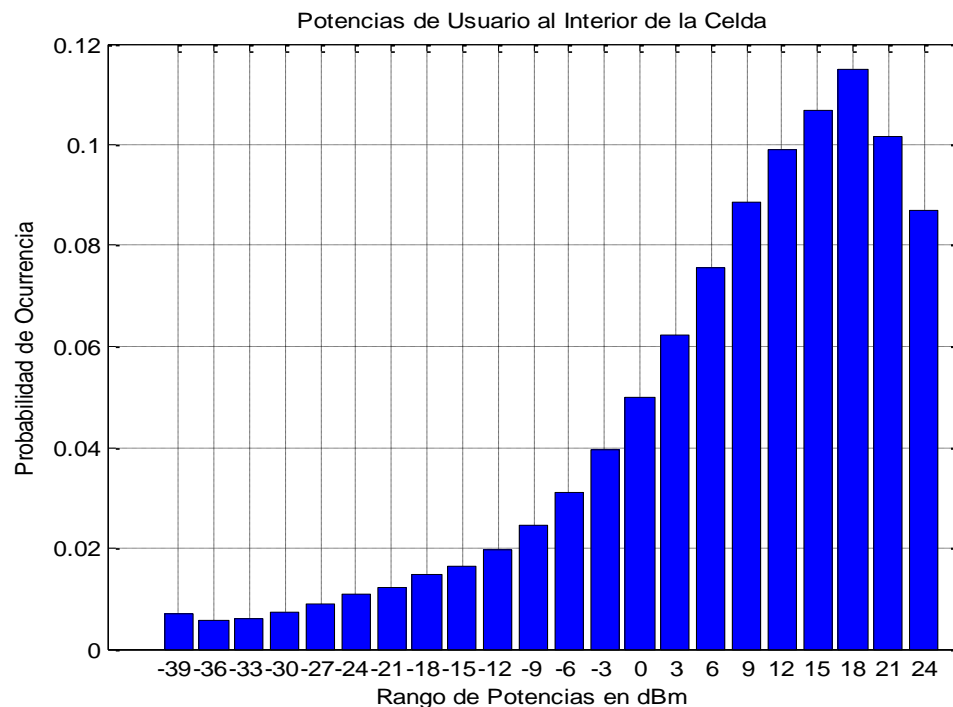


Figura 3.20 Potencias de Transmisión de Usuario al Interior de la Celda<sup>34</sup>.

<sup>34</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 23'122.000.

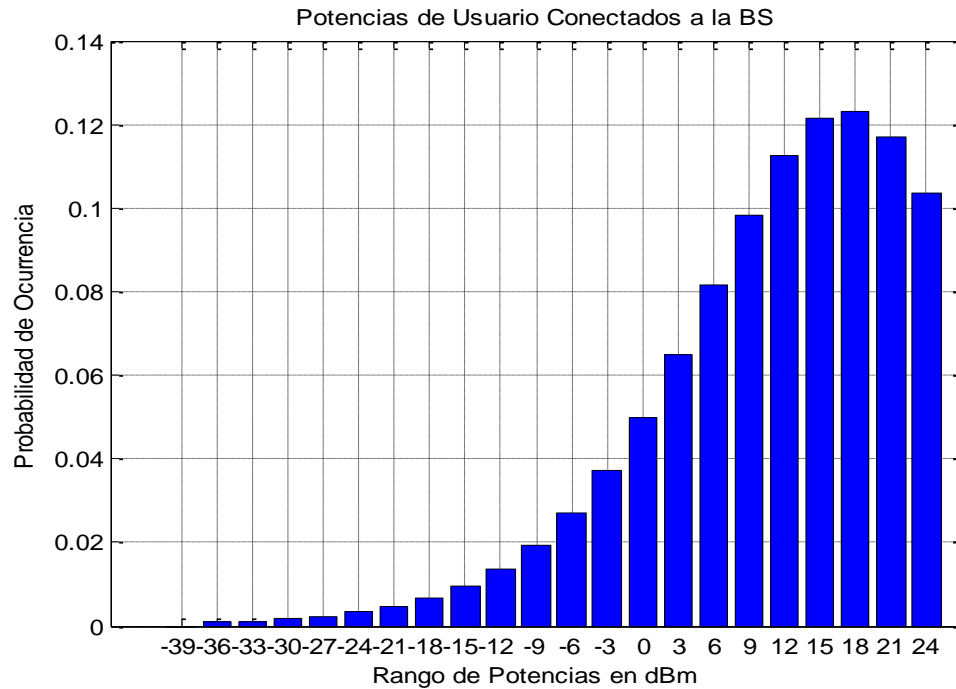


Figura 3.21 Potencias de Transmisión de Usuarios Conectados a la BS<sup>35</sup>.

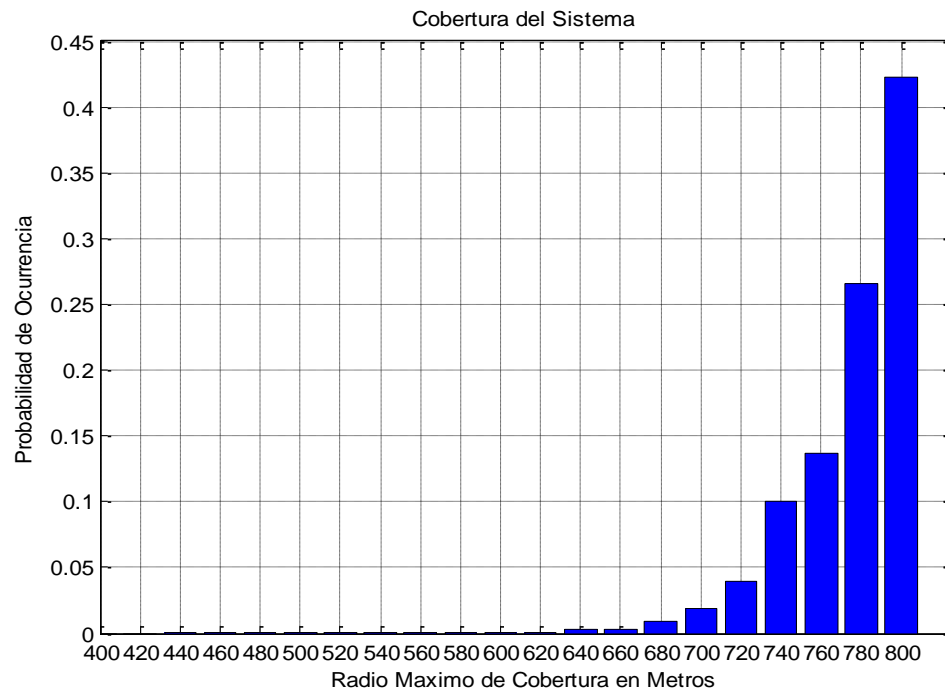


Figura 3.22 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida<sup>36</sup>.

<sup>35</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 9'248.800.

<sup>36</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1'000.000.

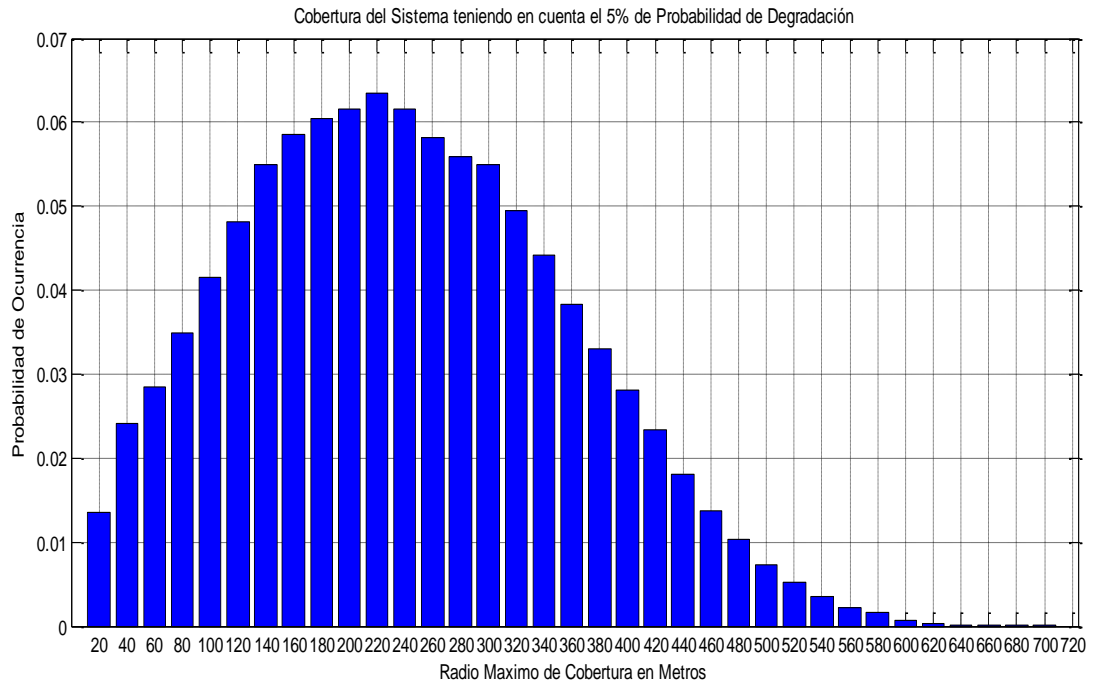


Figura 3.23 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación<sup>37</sup>.

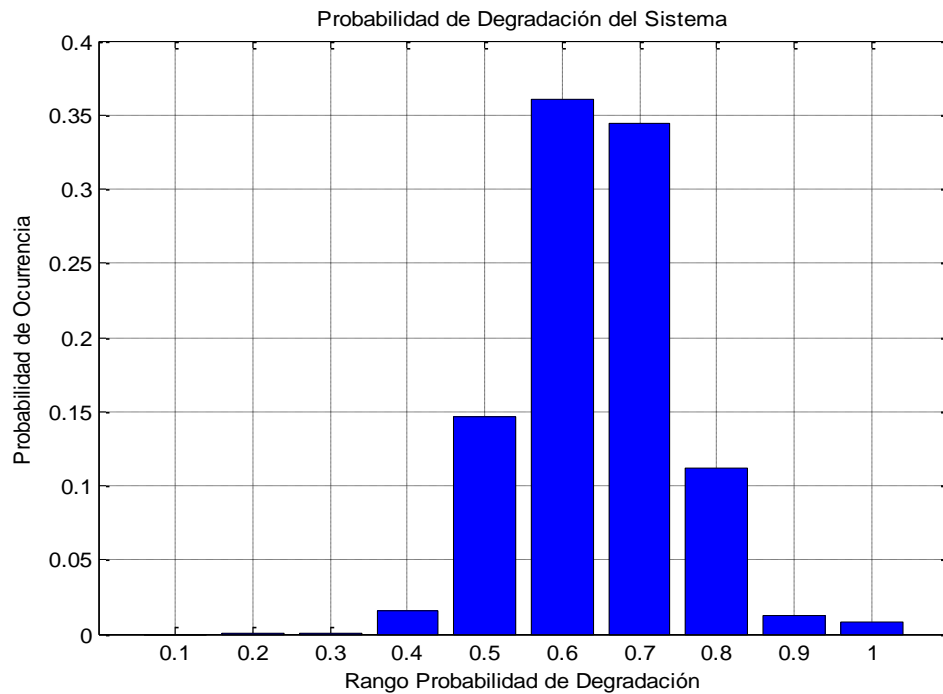


Figura 3.24 Probabilidad de Degradación del Sistema<sup>38</sup>.

<sup>37</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1'000.000.

<sup>38</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1'000.000.

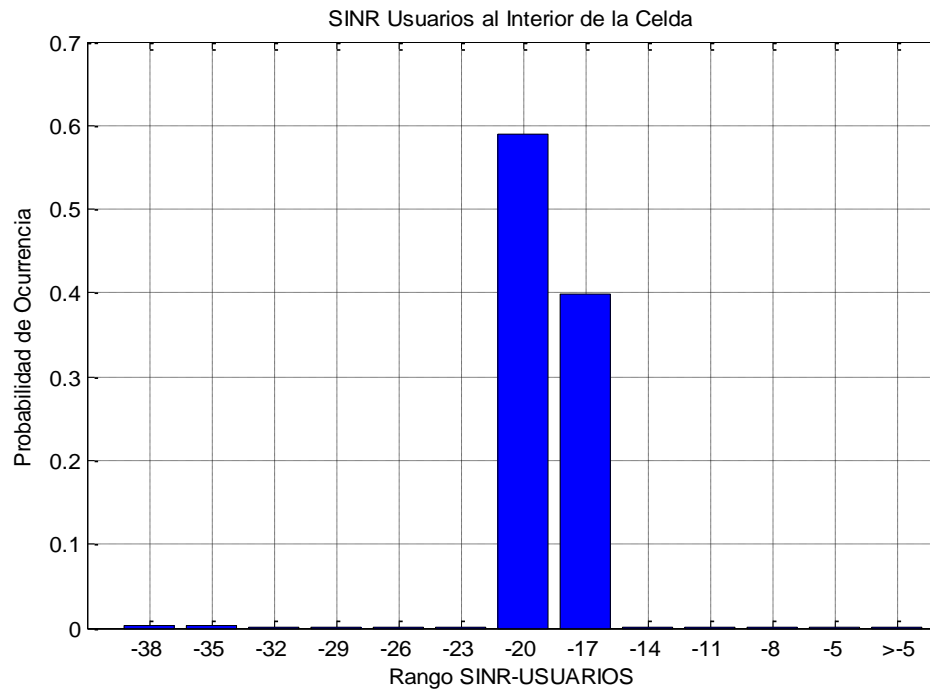


Figura 3.25 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda<sup>39</sup>.

En la figura 3.24 se puede visualizar que la probabilidad de que el valor de probabilidad de degradación del sistema se encuentre por debajo de 0,6 es de 0,52. De esto se observa, que el implementar movilidad causa que los valores de probabilidad de degradación incrementen, ya que en el caso 1.1 para el valor de 0.6 se obtuvo una probabilidad de 0,57, lo que implica que en el caso 1.1 hay un 5% menos de probabilidad de que los valores de probabilidad de degradación sean superiores a 0,6.

La figura 3.25 muestra los valores de Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) de los usuarios al interior de la celda. De esta figura se observa, que un 40% de los usuarios lograron cumplir con la SINR objetivo, disminuyendo en 3,6% en relación al valor obtenido en el caso 1.1, notándose que la movilidad de los usuarios hace que la calidad de las comunicaciones se degrade.

En la tabla 3.5 se detallan los valores obtenidos en las medidas estadísticas para cada una de las variables analizadas (Potencias de Transmisión, Cobertura del Sistema, Probabilidad de Degradación y SINR).

<sup>39</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 23'122.000.





| CASO 2.1               |                                     |   |   |                                   |                          |
|------------------------|-------------------------------------|---|---|-----------------------------------|--------------------------|
| Variables<br>Medida    | Potencia de<br>Transmisión<br>(dBm) | Cobertura del<br>Sistema ( sin 5% de<br>PD) (m) | Cobertura del<br>Sistema ( con 5% de<br>PD) (m) | Probabilidad<br>de<br>Degradación | SINR<br>Usuarios<br>(dB) |
| Media                  | 8,967                               | 773,602   | 230,4851  | 0,6018                            | -23,2331                 |
| Moda                   | 18                                  | 800   | 220   | 0,6                               | -21,5845                 |
| Mediana                | 12                                  | 800   | 240   | 0,6                               | -20,01                   |
| Varianza               | 130,891                             | 2479,601  | 13701.82  | 0,0092                            | 24,881                   |
| Desviación<br>Estándar | 11,44                               | 49,795  | 117,0548  | 0,0958                            | 4,9881                   |

Tabla 3.5 Estadísticas de las variables analizadas para el caso de simulación 2.1.

Los resultados obtenidos en los casos 2.2 y 2.3 se muestran en el apéndice A.1 y A.2 respectivamente. De estos resultados se observa que el comportamiento del sistema es similar al obtenido en los casos 1.2 y 1.3, ya que el impacto de incrementar el requerimiento de SINR de los usuarios y disminuir el número de usuarios al interior del escenario, es el mismo para un escenario con y sin movilidad. Por ello, los casos 2.2 y 2.3 se presentan en el apéndice A.

### 3.3.3 Escenario 3: Sin Control Ideal de Potencia (IPC) y con Movilidad en los Usuarios.

En este escenario de simulación se implementan únicamente la movilidad de los usuarios mientras que el Control Ideal de Potencia (IPC) no se tiene en cuenta y por ello todos los usuarios transmiten con el valor máximo de potencia (24 dBm).

#### 3.3.3.1 Caso 3.1

En esta prueba se reparten aleatoriamente a lo largo del escenario 100 usuarios siguiendo una distribución uniforme y se fija el valor de la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) objetivo en -20 dB.

Los resultados estadísticos tras ejecutar 1000000 este caso en Matlab se muestran en las figuras 3.26 a 3.29.

La figura 3.26 muestra el resultado de máxima cobertura en la celda de análisis. De esta figura se observa que la probabilidad de que la cobertura sea superior a 700 metros es de 0,807, 9,3% menor al valor obtenido en el caso de simulación 1.1 (escenario con IPC). Por otro parte, la figura 3.27 muestra que al considerar el 5% de probabilidad de degradación, existe un 10,42% de probabilidad de que la cobertura del sistema se encuentre por encima de 280 metros.

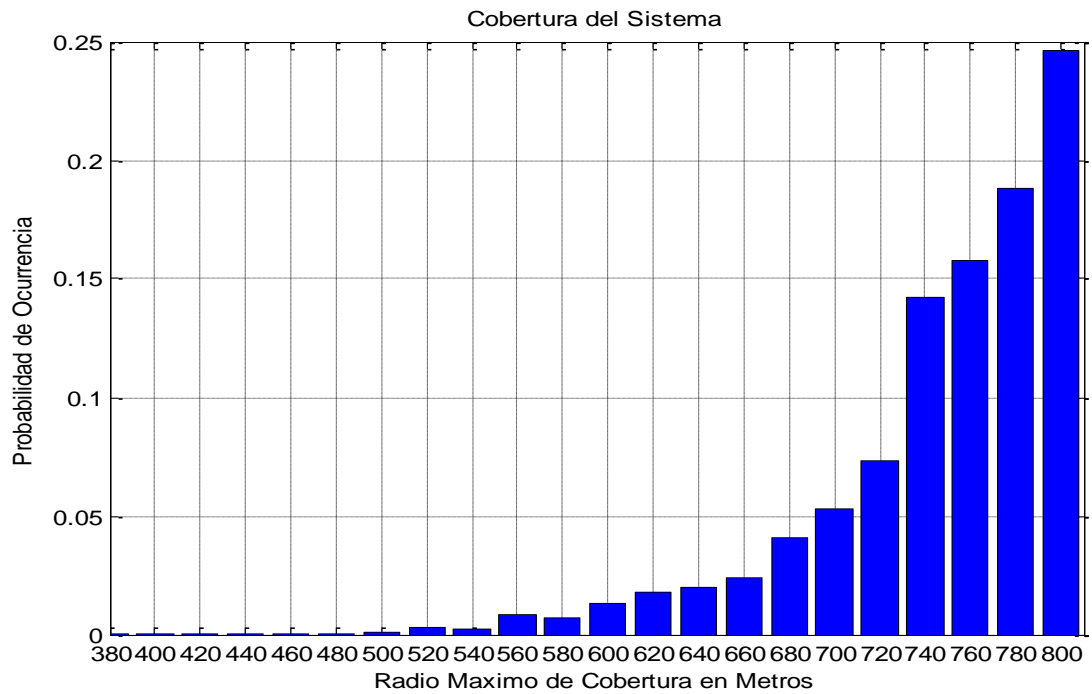


Figura 3.26 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida<sup>40</sup>.

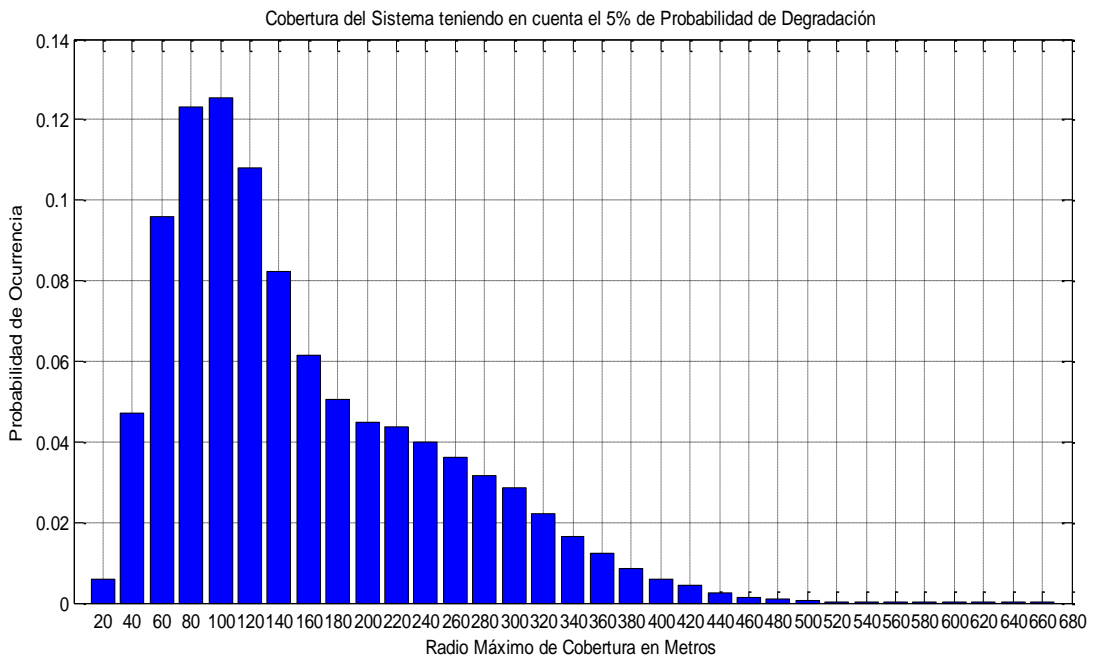


Figura 3.27 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación<sup>41</sup>.

<sup>40</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1'000.000.

<sup>41</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1'000.000.



De acuerdo con los resultados mostrados en las figuras 3.26 y 3.27, se ve que no implementar un procedimiento de Control de Potencia (PC), trae como consecuencia una disminución en la cobertura del sistema, debido a que los niveles de interferencia en el sistema aumentan.

De la figura 3.28 se puede visualizar que al no aplicar Control Ideal de Potencia (IPC) los resultados de la probabilidad de degradación del sistema aumentan considerablemente, pasando de tener valores en moda de 0,6 cuando se aplica IPC a 0,8 en este caso. Del mismo modo, de esta figura se observa que la probabilidad de que la probabilidad de degradación sea menor a 0,6 es de 0,32, disminuyendo en 0,2 con respecto al valor obtenido en el caso 2.1. Esto se debe a que al no aplicar IPC, los usuarios transmiten con su nivel de potencia máximo, haciendo que se presenten fenómenos como el efecto cerca-lejos, el cual causa un incremento en la interferencia presente en el sistema y por consiguiente una degradación en la calidad de las comunicaciones, la cual se ve reflejada en valores de probabilidad de degradación más elevados.

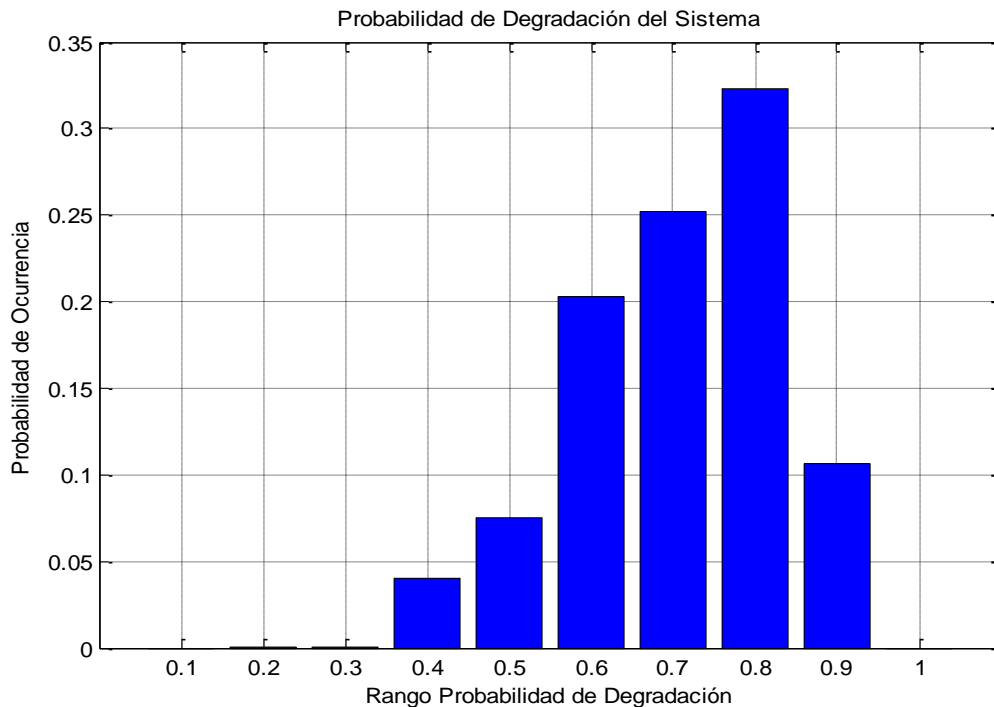


Figura 3.28 Probabilidad de Degradación del Sistema<sup>42</sup>.

La figura 3.29 muestra los valores de Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) de los usuarios al interior de la celda. De esta figura se observa que la probabilidad de que la SINR sea superior a -20 dB es de 0,277, lo que quiere decir que un 27,7% de los usuarios satisfacen su requerimiento de SINR. De estos

<sup>42</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1'000.000.



resultados se observa que al no implementar IPC el porcentaje de los usuarios que cumplen con la SINR objetivo disminuye, pasando de tener un 40% de los usuarios conectados en el caso 2.1 a un 27,7% en este caso.

De los resultados obtenidos en las figuras 3.26 a 3.29 se evidencia la importancia que tiene el procedimiento de Control de Potencia como mecanismo de control de interferencia, ya que al implementar este procedimiento los niveles de interferencia presentes en el sistema disminuyen, causando que el desempeño del sistema mejore en términos de capacidad y cobertura.

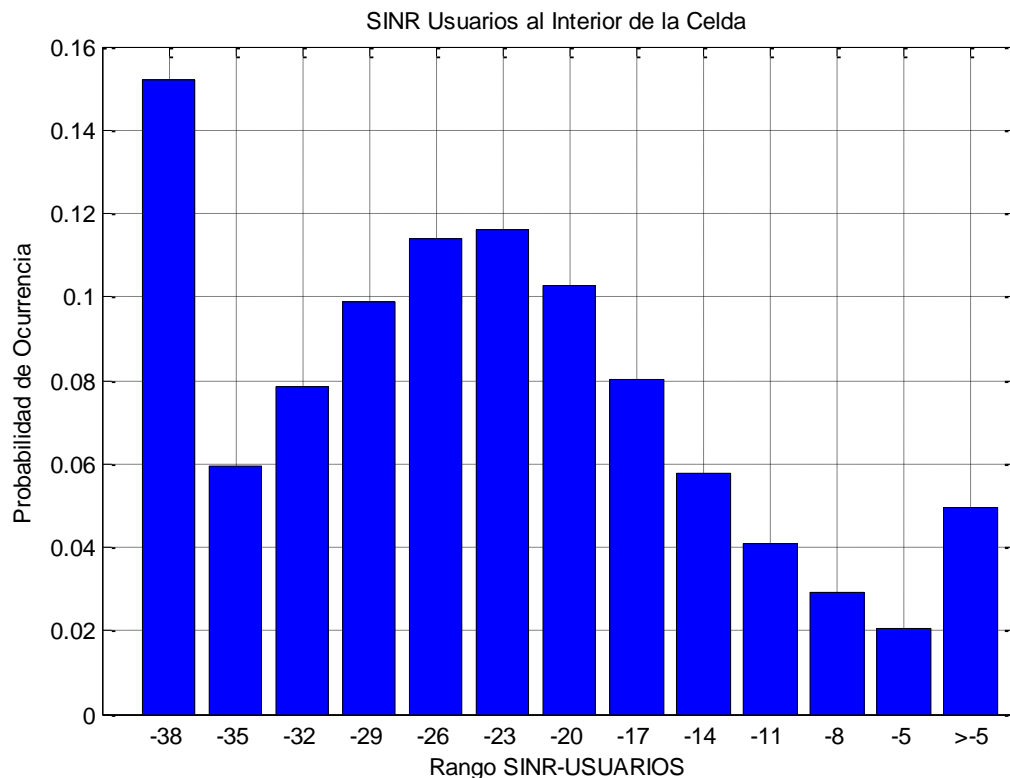


Figura 3.29 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda<sup>43</sup>.

En la tabla 3.6 se presentan los valores obtenidos de las diferentes medidas estadísticas para cada una de las variables analizadas (Potencias de Transmisión, Cobertura del Sistema, Probabilidad de Degradación y SINR).

<sup>43</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 23'122.000.



| CASO 3.1               |                                     |   |   |                                   |                          |
|------------------------|-------------------------------------|---|---|-----------------------------------|--------------------------|
| Variables<br>Medida    | Potencia de<br>Transmisión<br>(dBm) | Cobertura del<br>Sistema ( sin 5% de<br>PD) (m) | Cobertura del<br>Sistema ( con 5% de<br>PD) (m) | Probabilidad<br>de<br>Degradación | SINR<br>Usuarios<br>(dB) |
| Media                  | 24                                  | 735,871   | 208,271   | 0,7226                            | -26,045                  |
| Moda                   | 24                                  | 800   | 100   | 0,8                               | -67,557                  |
| Mediana                | 24                                  | 760   | 220   | 0,7                               | -26,746                  |
| Varianza               | 0                                   | 4227,62   | 7453,801  | 0,0066                            | 173,353                  |
| Desviación<br>Estándar | 0                                   | 65,0202   | 86,3354   | 0,0815                            | 13,166                   |

Tabla 3.6 Estadísticas de las variables analizadas para el caso de simulación 3.1.

Los resultados obtenidos en los casos 3.2 y 3.3 se muestran en el apéndice B.1 y B.2 respectivamente. De estos resultados se observa que el comportamiento del sistema es semejante al obtenido en los casos 1.2 y 1.3, dado que el efecto de incrementar el requerimiento de SINR de los usuarios y disminuir el número de usuarios al interior del escenario, es el mismo para un escenario con y sin Control Ideal de Potencia (IPC). Por esta razón, los casos 3.2 y 3.3 se presentan en el apéndice B.

### 3.3.4 Comparación entre Escenarios con 100 Usuarios y SINR Objetivo de -20 dB.

Para comprender el comportamiento del sistema, tras aplicar o no el procedimiento de Control Ideal de Potencia (IPC) y el algoritmo de movilidad de usuario, se debe realizar un análisis comparativo que permita determinar el efecto que éstos tienen sobre el desempeño del sistema.

De la tabla 3.7 puede observarse que en el caso 2.1 al implementar la movilidad de los usuarios se tienen valores de cobertura muy similares, sin embargo se observa que la movilidad hace que los niveles de las potencias de transmisión incrementen, causando que los niveles de interferencia presentes en el sistema aumenten y por ende se obtengan valores de probabilidad de degradación más elevados. Así mismo, de la tabla se puede ver que el caso 3.1, es el caso con peor desempeño en términos de capacidad y cobertura, esto debido a que al no aplicarse el procedimiento de Control Ideal de Potencia (IPC), todos los usuarios transmiten a 24 dBm, que es la potencia máxima de transmisión, ocasionando que se presenten fenómenos de interferencia como el efecto cerca-lejos y que por ende, la probabilidad de obtener una cobertura superior a 700 metros disminuya y los valores de probabilidad de degradación del sistema aumenten.



|   | Caso 1.1 | Caso 2.1 | Caso 3.1 |
|---|----------|----------|----------|
| $P\{P_{tx} \leq 12 \text{ dBm}\}$                           | 0,614    | 0,535    | 0        |
| $P\{\text{cobertura} > 700 \text{ m}\}$                     | 0,9      | 0,964    | 0,807    |
| $P\{\text{cobertura con } 5\% \text{ PD} > 280 \text{ m}\}$ | 0,155    | 0,333    | 0,104    |
| $P\{P. \text{Degradación} \leq 0,6\}$                       | 0,57     | 0,52     | 0,318    |
| $P\{SINR > -20 \text{ dB}\}$                                | 0,436    | 0,4      | 0,277    |

Tabla 3.7 Comparación entre Escenarios para 100 Usuarios y SINR objetivo de -20 dB.

En el apéndice C se presentan los resultados de simulación de un cuarto escenario en el cual se definieron dos casos de simulación. El primero de ellos es un escenario en el cual los usuarios permanecen estáticos durante toda la simulación y el segundo caso, es un escenario donde se incluye la movilidad de los usuarios. En ambos casos se implementa el procedimiento de Control Ideal de Potencia (IPC), la SINR objetivo se fija en -20 dB y se ubican 100 usuarios al interior del escenario de manera aleatoria siguiendo una distribución uniforme. En este apéndice se presentan graficas de potencias de transmisión y la SINR alcanzada por diferentes usuarios al interior de la celda de análisis, de las cuales se puede observar que tanto la potencia de transmisión como la SINR de los usuarios varían en función del movimiento de éstos.



## 4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 4.1 INTRODUCCION

En este capítulo se presentan las conclusiones y diferentes recomendaciones sobre futuras líneas de investigación que pueden desprenderse del desarrollo y análisis del trabajo de grado realizado.

### 4.2 CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos y el análisis realizado en el presente trabajo de grado se plantean las siguientes conclusiones:

- Una simulación a nivel de sistema permite analizar características que en una simulación a nivel de enlace no se pueden tener en cuenta, como el uso global de recursos o el estado de las comunicaciones de los usuarios presentes en un sistema. El modelo de simulación a nivel de sistema implementado en este trabajo, permitió modelar el procedimiento de Control Ideal de Potencia (IPC), que es una técnica de Gestión de Recursos Radio (RRM) de gran importancia para el control de interferencia en aquellos sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos, que son limitados por interferencia.
- De las pruebas se nota que al disminuir el número de usuarios al interior del escenario se logran valores de cobertura más grandes, evidenciándose de este modo, el compromiso existente entre capacidad y cobertura en sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos limitados por interferencia, en los cuales estos parámetros dependen de la cantidad de interferencia o carga en el sistema.
- A mayor cantidad de usuarios al interior del escenario, mayor es la interferencia presente en el sistema, lo que implica que los usuarios deben transmitir con un nivel superior de potencia, subiendo considerablemente el piso de ruido, haciendo que muchas de las Estaciones Móviles (MS) no puedan conectarse a la Estación Base aun transmitiendo con el nivel de potencia máximo, generando así, valores de probabilidad de degradación mayores a los obtenidos con un número de usuarios menor en el escenario.



- Incrementar el requerimiento de SINR supone que los usuarios deben transmitir con niveles de potencia más elevados, causando que los niveles de interferencia del sistema se intensifiquen y por consiguiente, la probabilidad de degradación del sistema aumente y la cobertura del mismo disminuya.
- Al comparar los resultados obtenidos en el escenario con Control Ideal de Potencia (IPC) con el escenario donde no se aplica ningún control, se encontró que el Control Ideal de Potencia (IPC) permite mitigar la interferencia del sistema, obteniendo mayores rangos de cobertura, potencias de transmisión de usuario más bajas y valores de probabilidad de degradación menores. En general, el Control de Potencia (PC) permite un mejor desempeño del sistema en relación a la cobertura y la capacidad del mismo, disminuyendo el deterioro causado en la calidad de las comunicaciones de usuario.
- En un escenario con movilidad se pueden alcanzar las mismas distancias de cobertura que en un escenario estático, pero la probabilidad de que la comunicación se degrade es mucho mayor en el caso con movilidad.
- Ante la dificultad de la construcción o adquisición de sistemas de telecomunicaciones, Matlab® como lenguaje de programación de alto nivel enfocado a la investigación científica, resulta una herramienta muy útil a la hora de simular esta clase de sistemas, facilitando el proceso de implementación de las simulaciones, dando una visión general del funcionamiento de dichos sistemas.
- La aplicación software desarrollada en este trabajo de grado mediante Matlab® puede ser considerada como soporte para el proceso de enseñanza y aprendizaje en el área de sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricas. Debido a su sencillez este trabajo, será una base y una guía para el desarrollo de trabajos futuros.





### 4.3 TRABAJOS FUTUROS

De la experiencia obtenida durante el desarrollo de este trabajo de grado, se proponen los siguientes trabajos:

- Aplicación del modelo en un escenario de simulación con un mayor número de celdas y analizar comparativamente con el presente trabajo, la cobertura, capacidad y degradación del sistema.
- Análisis de cobertura, capacidad y degradación de un sistema de comunicaciones móvil e inalámbrico aplicando otro u otros mecanismos de Gestión de Recursos Radio (RRM) y movilidad en los usuarios.
- Aplicación del modelo sobre un sistema de comunicaciones móvil e inalámbrico que implemente una tecnología en particular como WCDMA o LTE y analizar la cobertura, capacidad y degradación del sistema.
- Análisis de cobertura y capacidad de un sistema de comunicaciones móvil e inalámbrico aplicando otro u otros algoritmos de Control de Potencia y movilidad en los usuarios.
- Análisis de capacidad vista como la velocidad promedio alcanzada por las Estaciones Móviles (MS) en el sistema de comunicaciones.
- Incluir una interfaz de usuario mediante la herramienta GUI de Matlab, en la que se puedan variar diferentes parámetros como el tamaño de la celda, el número de usuarios, los requerimientos de SINR, entre otros.



## REFERENCIAS

- [1] D. R. Martínez, "Comunicaciones Inalámbricas", Mexico: Alfaomega, 2005.
- [2] E. A. Picado, "Análisis de las tecnologías de Redes Heterogéneas", San Pedro, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2012.
- [3] D. Rodriguez Muñoz, "Sistemas Inalámbricos de Comunicación Personal", Mexico, D.F.: Alfaomega, 2002.
- [4] E. Rey, "Telecomunicaciones Móviles", Mexico, D.F.: Alfaomega, 1999.
- [5] J. M. Huidobro Moya, D. Roldán Martínez y R. J. Millán Tejedor, "Tecnologías de Telecomunicaciones", España: Larmor , S.A, 2005.
- [6] R. K. Anguizaca, A. M. Remache, A. G. Rodríguez y S. G. Santana, "Comunicación Satelital Utilizando el Sistema Globalstar en el Ecuador", Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2000.
- [7] P. G. Arangon, "Estudio de la Tecnología Sistema General de Transmisión de Paquetes vía Radio (GPRS) y sus Aplicaciones en el Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM)", Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, 2004.
- [8] T. S. Rappaport y J. Feuerstein, "*Wireless Personal Communications*", Kluwer Academy Publishers.
- [9] T. Sanjuán Flores, «Hacia Los Sistemas del Futuro,» de *Telecomunicaciones Móviles*, Mexico, Alfaomega, 1999, pp. 225-234.
- [10] M. d. P. Muñoz y J. A. Valdés, "Análisis de Interferencia en Femtoceldas para WCDMA", Popayán: Universidad del Cauca, 2010.
- [11] M. Morales Céspedes, Gestión de Interferencias en Sistemas Femtocelda, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [12] O. Sallent Roig, J. L. Valenzuela González y . Agustí Comes, "Principios de Comunicaciones Móviles", Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2003.



- [13] K. Kim, *"Interference Mitigation in Wireless Communications"*, Georgia: Georgia Institute of Technology, 2005.
- [14] J. M. D. Moyano, *"Ruidos e Interferencias: Técnicas de reducción"*, Santander: Universidad de Cantabria, 2005.
- [15] P. Stavroulakis, *"Reliability, Survivability and Quality of Large Scale Telecommunication Systems"*, Londres: John Wiley & Sons, Ltd., 2003.
- [16] P. Stavroulakis, *"Interference Analysis and Reduction for Wireless Systems"*, Boston: Artech House, 2003.
- [17] I. S. MISRA, *"Wireless Communication and Networks: 3G & Beyond"*, New Delhi: Tata McGraw Hill, 2009.
- [18] H. Holma y A. Toskala, *"WCDMA for UMTS: HSPA evolution and LTE"*, Cuarta ed.: John Wiley & Sons, 2007.
- [19] H. V. Poor, «"Multiple-Access Interference",» de *Classical, Semi-classical and Quantum Noise*, Springer, 2012, pp. 145-155.
- [20] S. J. Honade y P. V. Ingole, «"Removal of Multiple Access Interference in DS-CDMA System",» *International Journal of Scientific and Research*, vol. II, nº 6, 2012.
- [21] A. F. Quemba y C. . H. Obando , "Análisis de Capacidad de un Sistema WCDMA (release 99) en el Enlace de Subida mediante Control de Potencia y Detección Multiusuario (MUD)", Popayán: Universidad del Cauca, 2012.
- [22] J. Zander y S. L. Kim, *Radio Resource Management for Wireless Networks*, Artech House, 2001.
- [23] R. Agustí, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, y O. Sallent, *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*, Fundación Vodafone España, 2010.
- [24] J. Pérez Romero, O. Sallent, R. Agustí y M. A. Díaz Guerra, *Radio Resource Management Strategies in UMTS*, John Wiley & Sons, 2005.
- [25] H. F. Geerdes, *"UMTS Radio Network Planning: Mastering Cell Coupling for Capacity Optimization"*, Vieweg+ Teubner Research.



- [26] P. M. de Alwis, "*Call Admission Control and Resource Utilization in WCDMA Networks*", Christchurch, Nueva Zelanda: Universidad de Canterbury, 2005.
- [27] V. F. Miramá Pérez, "Control de Potencia basado en Teoría de Juegos en Comunicaciones Inalámbricas", Popayán: Universidad del Cauca, 2012.
- [28] E. Astaiza, H. Bermudez y P. Muñoz, "Simulación de Sistemas de Telecomunicaciones", Arte e Imagen., 2007.
- [29] ETSI, "*TR 101 112: Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS*", European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 1997.
- [30] V. Quintero, "Evaluación del Desempeño de Sistemas de Comunicación Móvil Celular de Tercera Generación – WCDMA.", Popayán: Universidad del Cauca, 2010.
- [31] L. Mendo, "Capacidad en Sistemas Celulares W-CDMA", Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
- [32] J. A. Macías Iglesias, "Matlab una Introducción con Ejemplos Prácticos", Madrid: Reverté, S.A, 2006.



## APÉNDICES

### APÉNDICE A. ESCENARIO 2: CONTROL IDEAL DE POTENCIA (IPC) Y MOVILIDAD EN LOS USUARIOS.

#### A.1. Caso 2.2

Este caso se configuró con un valor de Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) objetivo igual a -14 dB y se ubicaron 100 usuarios al interior del escenario de manera aleatoria siguiendo una distribución uniforme.

Los resultados estadísticos tras ejecutar 1'000.000 de veces el caso 2.1 en Matlab se muestran en las figuras A.1 a A.6.

Los valores de potencias de transmisión requeridas por las Estaciones Móviles (MS) al interior de la celda se ilustran en las figuras A.1 y A.2. La figura A.2, muestra que la potencia de transmisión que mayor probabilidad de ocurrencia presenta es la de 24 dBm, es decir, los usuarios transmiten con su nivel de potencia máximo. De los resultados obtenidos en este caso se infiere que el 75,52% de las potencias de transmisión de los usuarios son superiores a 12 dBm, esto implica que en este caso, para que los usuarios cumplan con el valor de SINR objetivo, deben transmitir con valores de potencias más elevados a los obtenidos en el caso 2.1 (Sección 3.3.2.1). Por lo tanto, de estos resultados se puede concluir que si el valor del requerimiento de SINR aumenta, los niveles de potencia de transmisión también deben aumentar.

El análisis de cobertura del sistema muestra en la figura A.3 que los valores mayores a 700 metros presentan una probabilidad de ocurrencia de 0,5107, siendo 45,41% menor al valor de probabilidad obtenido en el caso 2.1 (Sección 3.3.2.1). Por otro lado, la figura A.4 muestra que al considerar el 5% de probabilidad de degradación los valores de cobertura son mucho más variables, obteniéndose una probabilidad de ocurrencia de 0,6026 para distancias superiores a 280 metros. Esta variabilidad se debe a que en este caso, al aumentar el requerimiento de SINR a -14 dB los usuarios que lograron conectarse a la Estación Base (BS) eran los usuarios más cercanos a esta. Por ello, al evaluar la cobertura del último usuario que completa el 5% de probabilidad de degradación, este arroja valores altos de cobertura.

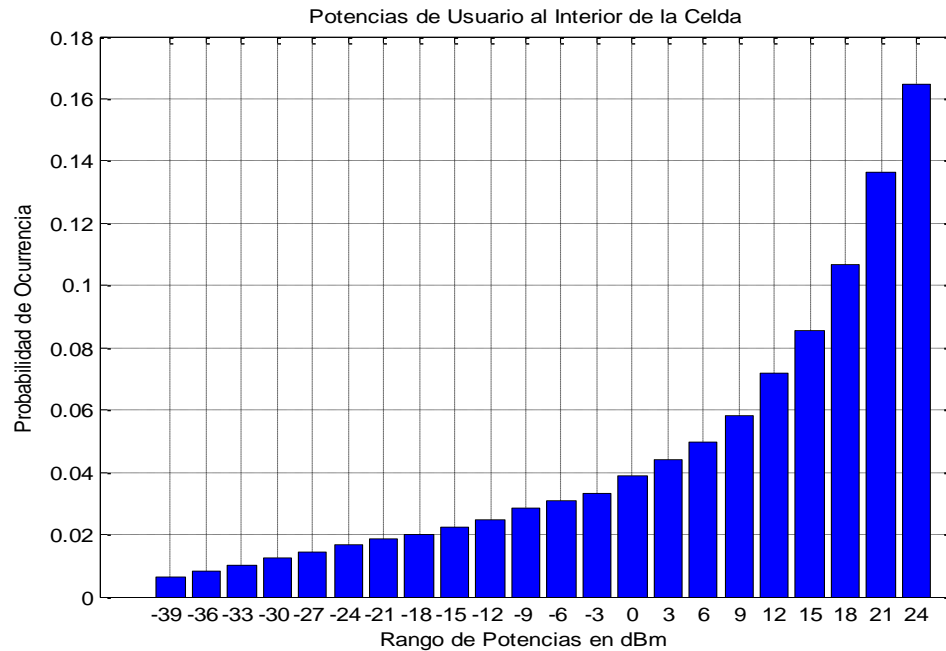


Figura A.1 Potencias de Transmisión de Usuario al Interior de la Celda<sup>44</sup>.

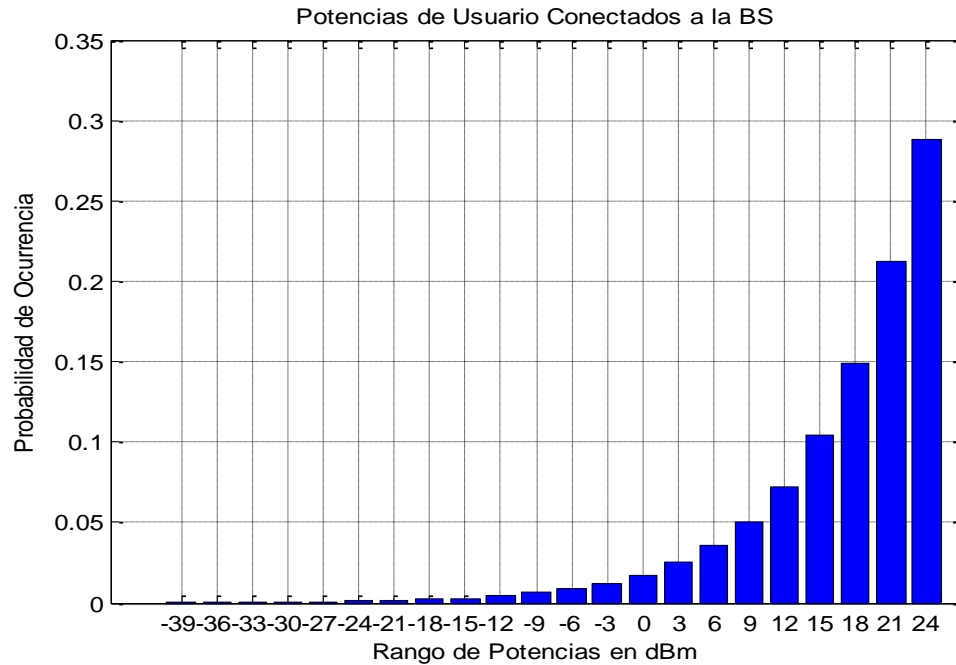


Figura A.2 Potencias de Transmisión de Usuarios Conectados a la BS<sup>45</sup>.

<sup>44</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 23'002.000.

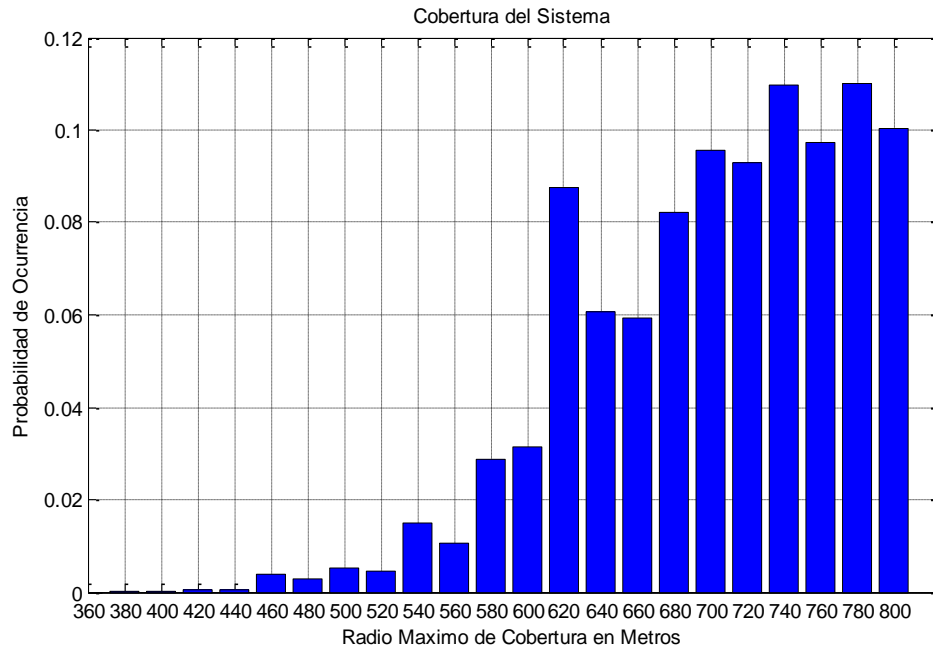


Figura A.3 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida<sup>46</sup>.

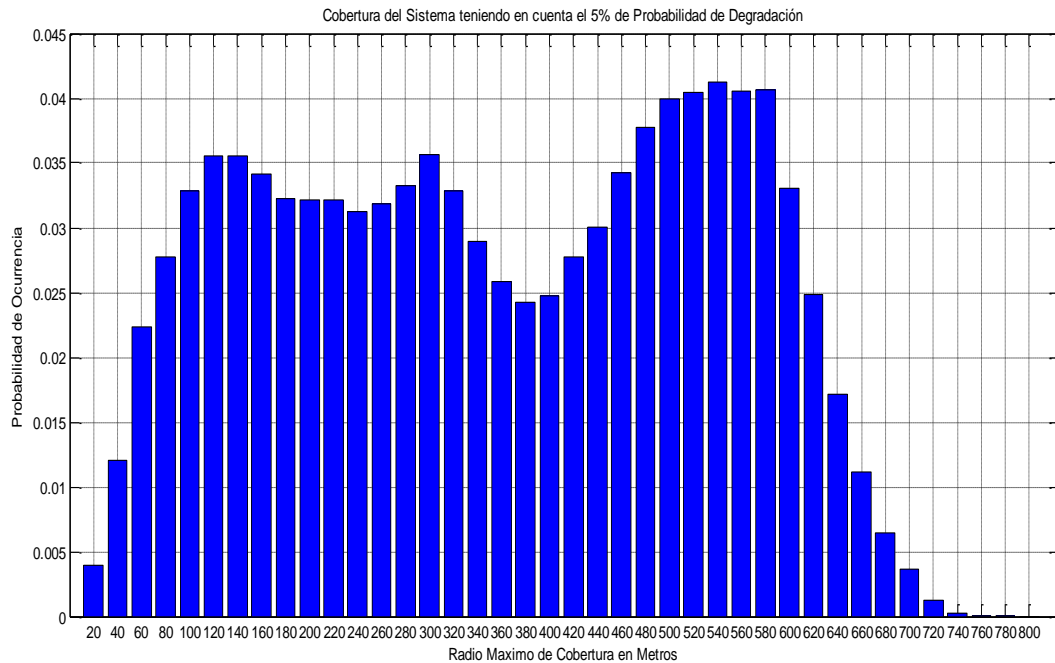


Figura A.4 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación<sup>47</sup>.

<sup>45</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 8'034.988.

<sup>46</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1'000.000.



La figura A.5 muestra los resultados de la probabilidad de degradación del sistema. Puede notarse de esta figura que la probabilidad de que la probabilidad de degradación sea menor al 60% es de 0,486, disminuyendo 0,0365 en relación al valor de la probabilidad logrado en el caso 2.1

Se observa de la figura A.6 que los valores de Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) superiores a -14 dB, presentan una probabilidad de ocurrencia de 0,349 lo cual indica que un 34,9% de los usuarios satisfacen su requerimiento de SINR.

De las figuras A.5 y A.6 se puede deducir que la probabilidad de degradación del sistema es mayor cuando los requerimientos de SINR de los usuarios aumentan, haciendo que la capacidad del sistema disminuya, dado que en este escenario se presentan niveles de interferencia más altos.

La tabla A.1 presenta los valores obtenidos de las diferentes medidas estadísticas para cada una de las variables analizadas (Potencias de Transmisión, Cobertura del Sistema, Probabilidad de Degradación y SINR).

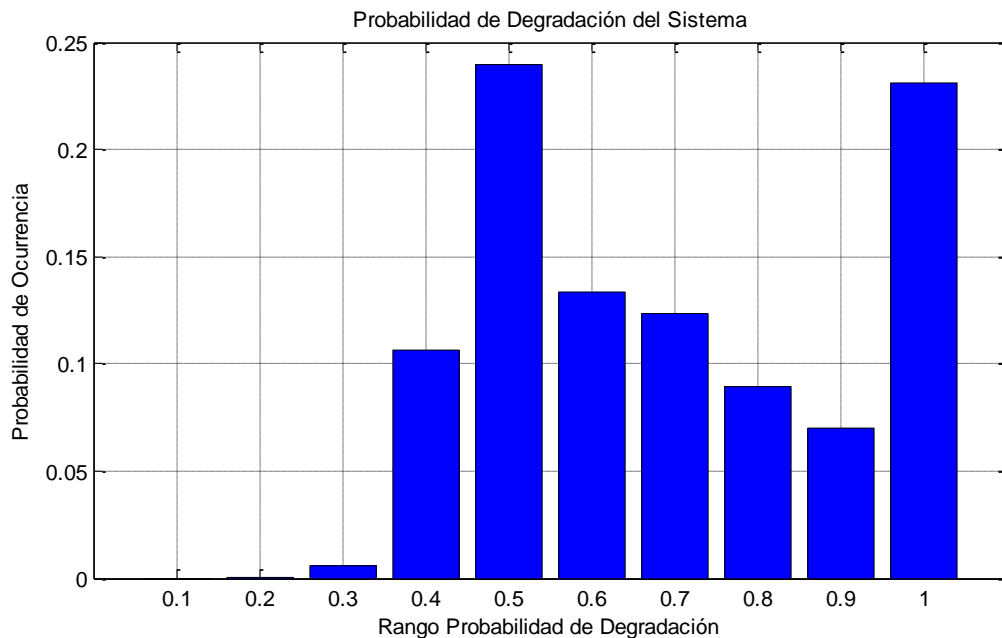


Figura A.5 Probabilidad de Degradación del Sistema<sup>48</sup>.

<sup>47</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1'000.000..

<sup>48</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1'000.000.



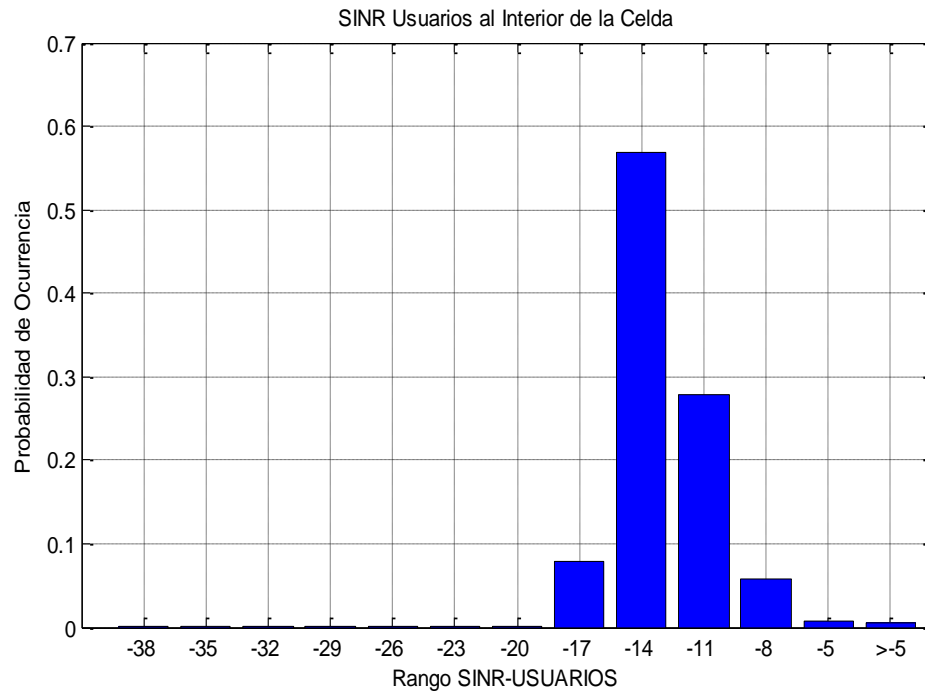


Figura A.6 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda<sup>49</sup>.

| CASO 2.2            |                               |   |   |                             |                    |
|---------------------|-------------------------------|---|---|-----------------------------|--------------------|
| Variables / Medida  | Potencia de Transmisión (dBm) | Cobertura del Sistema ( sin 5% de PD) (m) | Cobertura del Sistema ( con 5% de PD) (m) | Probabilidad de Degradación | SINR Usuarios (dB) |
| Media               | 16,8306                       | 691,117                                   | 346,0131                                  | 0,6506                      | -17,88             |
| Moda                | 24                            | 780                                       | 540                                       | 0,5                         | -15,22             |
| Mediana             | 21                            | 700                                       | 360                                       | 0,6                         | -15,662            |
| Varianza            | 71,973                        | 6014,002                                  | 32045,761                                 | 0,056                       | 43,093             |
| Desviación Estándar | 8,484                         | 77,55                                     | 179,0133                                  | 0,2365                      | 6,5646             |

Tabla A.1 Estadísticas de las variables analizadas para el caso de simulación 2.2.

## A.2. Caso 2.3

Esta prueba consistió en establecer el valor de la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) objetivo en -20 dB y ubicar 50 usuarios al interior del escenario

<sup>49</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 23'002.000.



de manera aleatoria siguiendo una distribución uniforme. Cabe resaltar que en este caso, la densidad de usuarios al interior de la celda es de 12, siendo esta menor a la de los dos casos anteriores, puesto que en este caso el número de usuarios es menor.

De acuerdo con las consideraciones anteriores y luego de simular 1'000.000 de veces el presente caso en Matlab, se obtuvieron los siguientes resultados estadísticos presentados en las figuras A.7 a A.12.

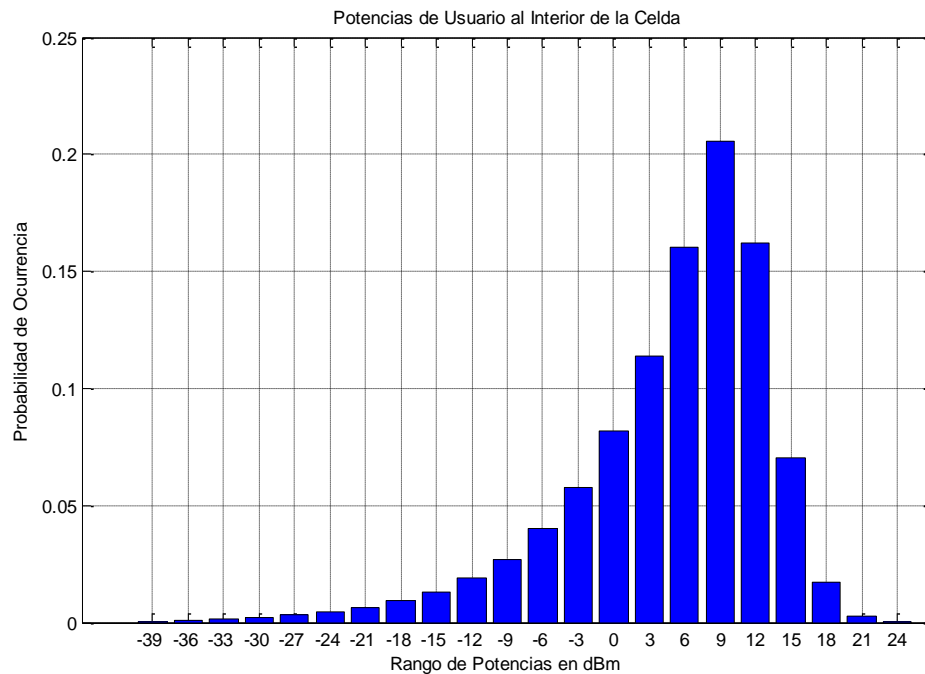


Figura A.7 Potencias de Transmisión de Usuario al Interior de la Celda<sup>50</sup>.

En la figura A.8, se muestra que el valor de potencia de transmisión de 9 dBm, es el valor de potencia más utilizado por las Estaciones Móviles (MS) conectadas a la Estación Base (BS) y que la máxima potencia asignada a los usuarios es de 24 dBm. De estos resultados se tiene que la probabilidad de que las potencias de transmisión sean menores o iguales a 12 dBm es de 0,875. Además, de esta figura se puede apreciar que al disminuir el número de usuarios al interior del escenario, el valor de potencia de transmisión máximo asignado a las Estaciones Móviles (MS) también disminuye pasando de 18 dBm en la simulación 2.1 (Sección 3.3.2.1) a 9 dBm en este caso.

Los resultados de cobertura del sistema en el enlace de subida se exponen en la figura A.9. De esta figura se observa que el 98,89% de los resultados de cobertura son superiores a 700 metros. En la figura A.10 se ve que la probabilidad de la

<sup>50</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 23'122.000.



cobertura para valores mayores a 280 metros, teniendo en cuenta el 5% de la probabilidad de degradación es 0,2226. Para estos resultados, la probabilidad de que los valores de cobertura sean menores a 280 metros aumenta en 10%, en relación a los resultados de probabilidad del escenario 2.1.

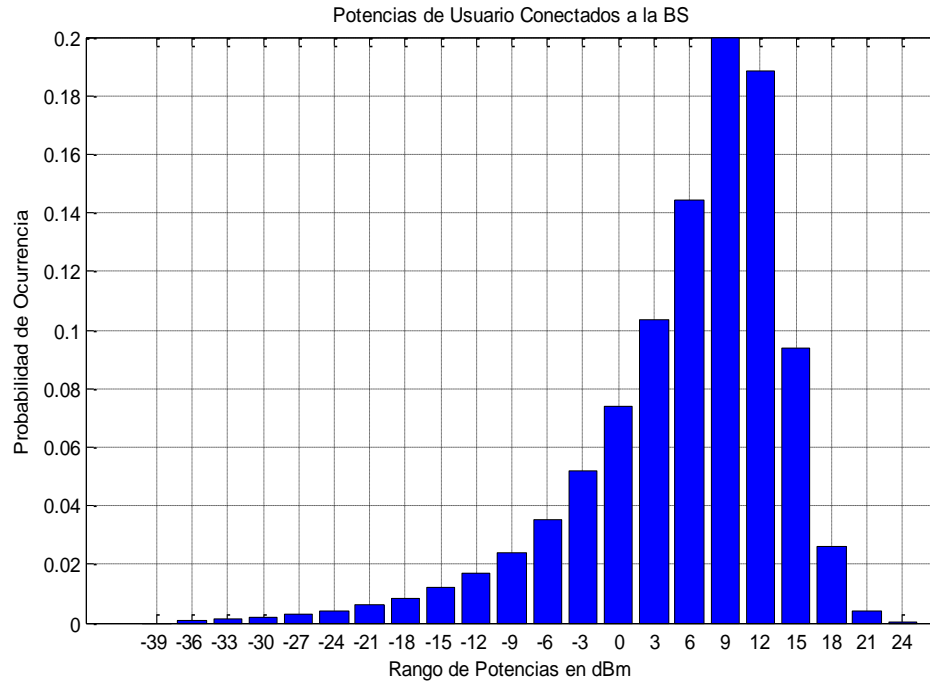


Figura A.8 Potencias de Transmisión de Usuarios Conectados a la BS<sup>51</sup>.

De la figura A.11 se puede visualizar que la probabilidad de que el valor de probabilidad de degradación del sistema se encuentre por debajo de 0,6 es de 0,58, lo que implica que en este caso hay mayor probabilidad de que los valores de probabilidad de degradación sean más bajos respecto al valor obtenido en la simulación 2.1, debido a que la interferencia presente en el sistema disminuye.

La figura A.12 muestra que el valor de Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) de los usuarios dentro de la celda. De esta figura se puede ver, que un 44% de los usuarios lograron satisfacer su requerimiento de SINR, incrementando en un 4% el valor obtenido en el caso 2.1.

De las figuras A.11 y A.12 se puede concluir que la probabilidad de degradación del sistema es menor cuando el número de usuarios al interior del escenario disminuye, ya que al disminuir el número de usuarios al interior de la celda, la interferencia del sistema disminuye y por ende se obtiene un mejor desempeño del sistema el cual se ve evidenciado en una probabilidad de degradación menor.

<sup>51</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 9'248.800.

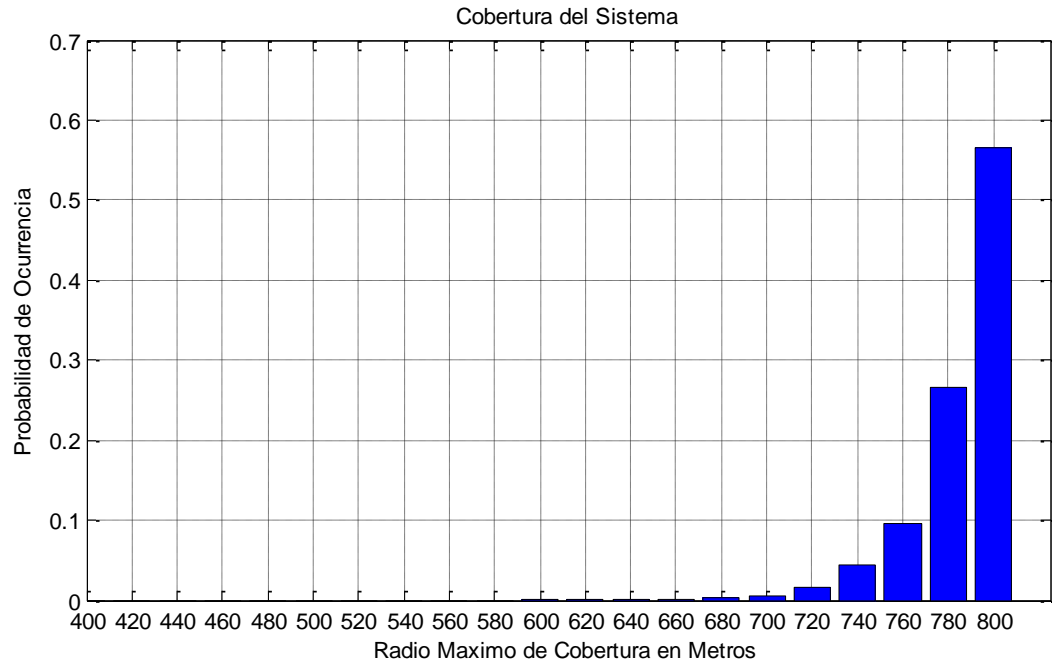


Figura A.9 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida<sup>52</sup>.

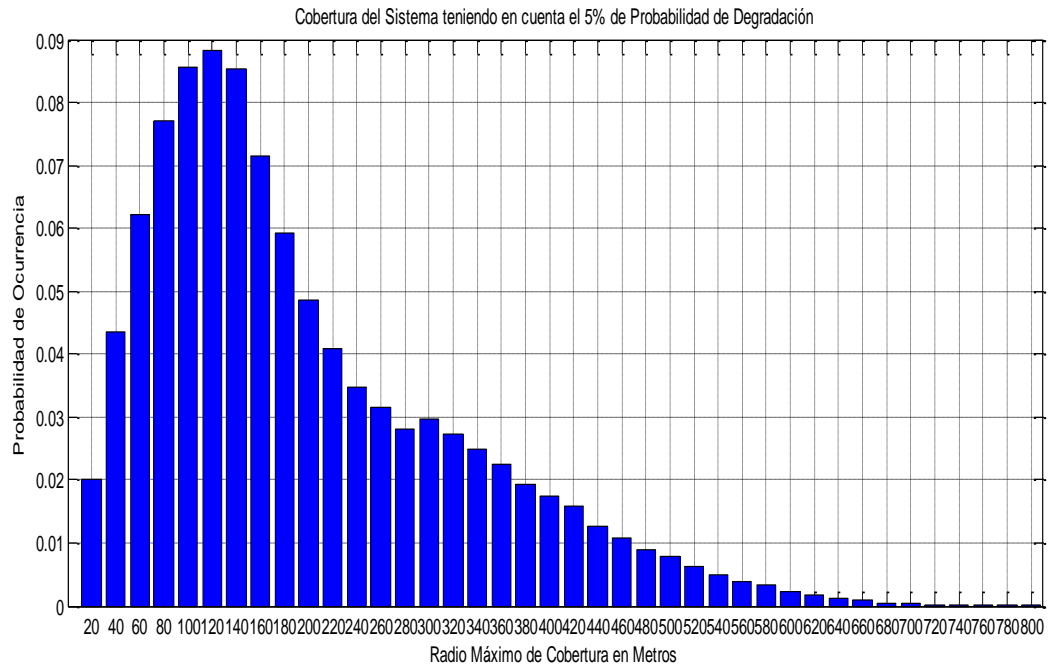


Figura A.10 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación<sup>53</sup>.

<sup>52</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1'000.000.

<sup>53</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1'000.000.

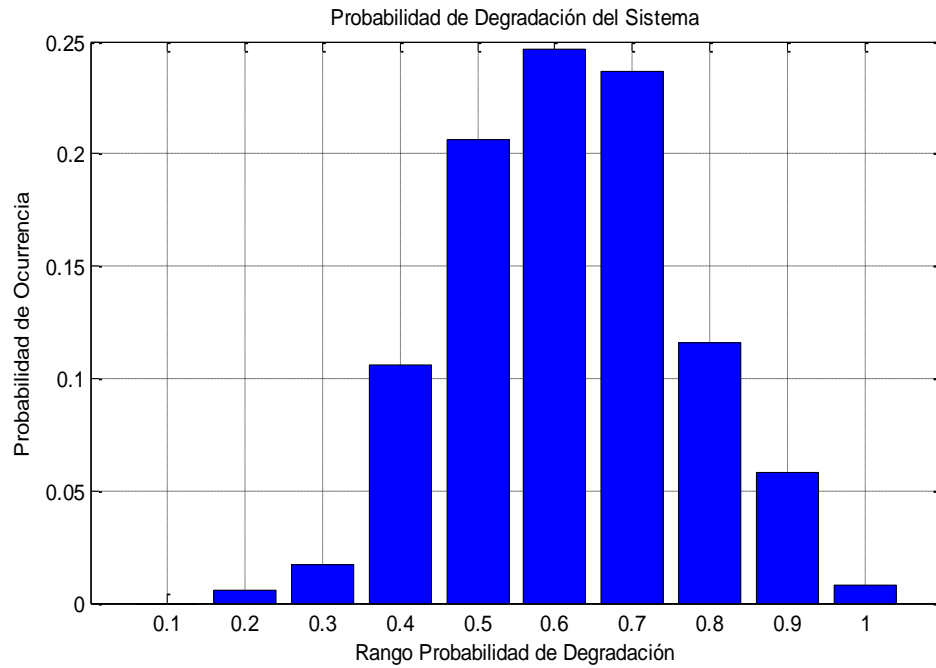


Figura A.11 Probabilidad de Degradación del Sistema<sup>54</sup>.

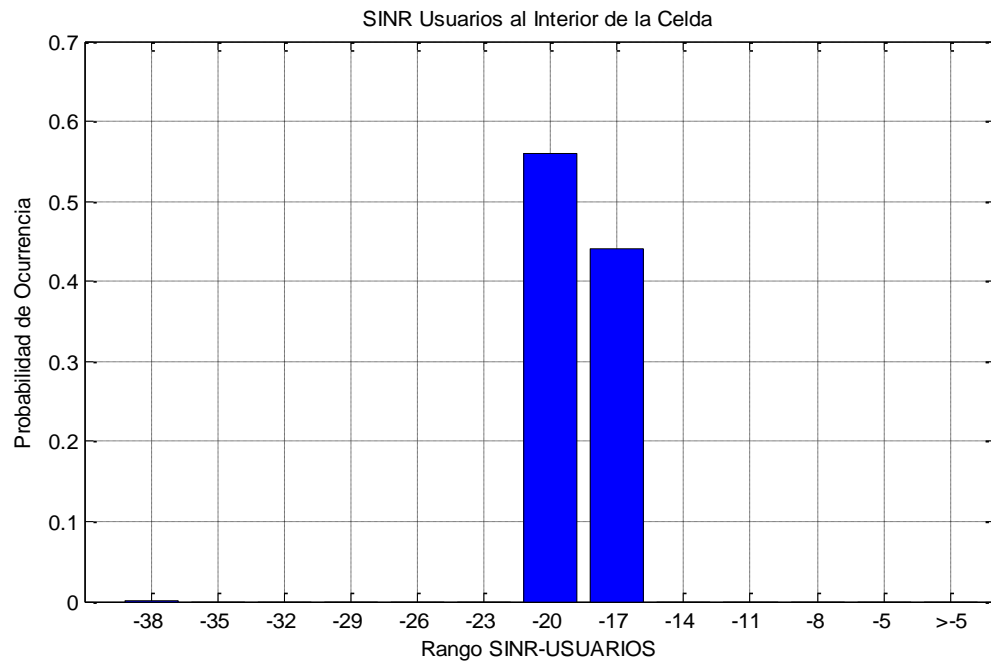


Figura A.12 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda<sup>55</sup>.

<sup>54</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1'000.000.

<sup>55</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 23'122.000.



Las diferentes medidas estadísticas evaluadas para cada una de las variables analizadas (Potencias de Transmisión, Cobertura del Sistema, Probabilidad de Degradación y SINR) se detallan en la tabla A.2.

| CASO 2.3            |                               |   |   |                             |                    |
|---------------------|-------------------------------|---|---|-----------------------------|--------------------|
| Variab<br>Medida    | Potencia de Transmisión (dBm) | Cobertura del Sistema ( sin 5% de PD) (m) | Cobertura del Sistema ( con 5% de PD) (m) | Probabilidad de Degradación | SINR Usuarios (dB) |
| Media               | 4,933                         | 770,011                                   | 247,834                                   | 0,56                        | -21,146            |
| Moda                | 9                             | 800                                       | 120                                       | 0,6                         | -21,265            |
| Mediana             | 6                             | 780                                       | 160                                       | 0,6                         | -20,7212           |
| Varianza            | 57,153                        | 2130,09                                   | 9630,281                                  | 0,017                       | 16,785             |
| Desviación Estándar | 7,56                          | 46,153                                    | 98,134                                    | 0,133                       | 4,097              |

Tabla A.2 Estadísticas de las variables analizadas para el caso de simulación 2.3.

## APÉNDICE B. ESCENARIO 3: SIN CONTROL IDEAL DE POTENCIA (IPC) Y CON MOVILIDAD EN LOS USUARIOS.

### B.1. Caso 3.2

En este caso se ubican de manera aleatoria en el escenario 100 usuarios siguiendo una distribución uniforme y se cambia el valor de la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) objetivo a -14 dB.

Luego de simular 1'000.000 de veces este caso en Matlab se obtuvieron los resultados presentados en las figuras B.1 a B.4.

En la figura B.1, se muestra el resultado de cobertura máxima en la celda de análisis. De esta figura se observa que la probabilidad de que la cobertura este por encima de 700 metros es de 0,289, 51,8% menor al valor obtenido en el caso 3.1.

La figura B.2, muestra que al considerar el 5% de probabilidad de degradación, existe un 8% de probabilidad de que la cobertura del sistema sea mayor a 280 metros. De los resultados obtenidos se presenta una disminución en el radio de cobertura, debido a que en este caso la SINR requerida por los usuarios es mayor a la requerida en el caso de simulación 3.1, lo cual hace que el sistema sea menos tolerante frente al ruido y la interferencia, por ello los valores de cobertura se ven afectados, es decir, disminuyen.

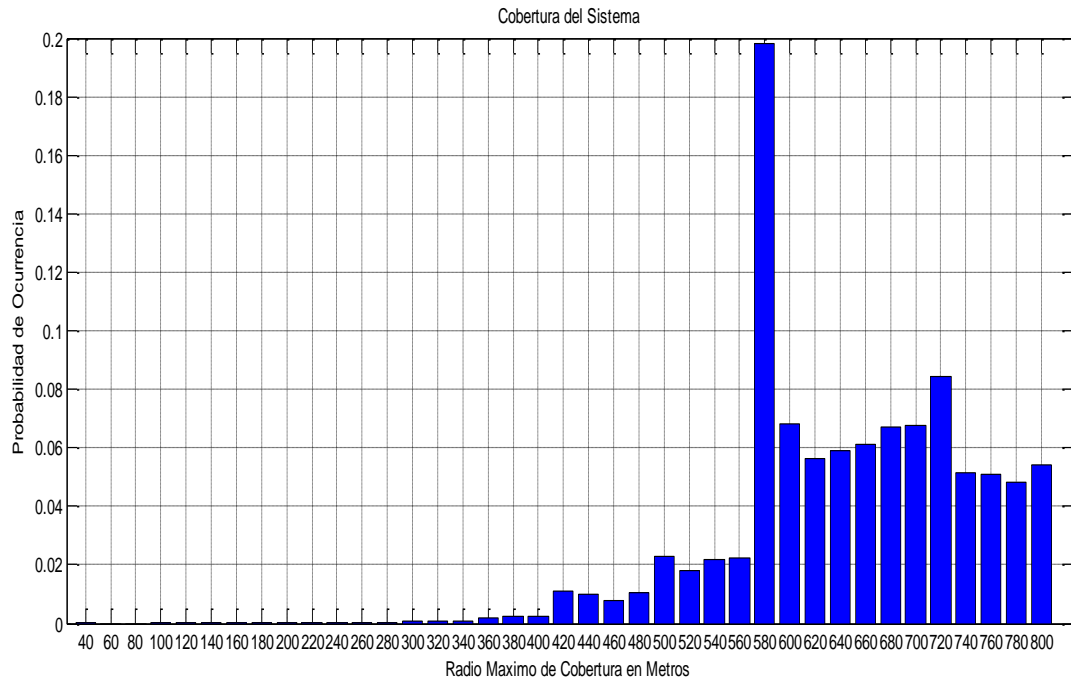


Figura B.1 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida<sup>56</sup>.

De la figura B.4 se puede notar que al incrementar el requerimiento de SINR objetivo, el desempeño del sistema se degrada, pasando de tener valores en moda de 0,8 en el caso de simulación 3.1 a 0,9 en este caso. Del mismo modo, de esta figura se observa que la probabilidad de que la probabilidad de degradación sea menor a 0,6 es de 0,20, disminuyendo en 0.1 con respecto al valor obtenido en el caso 3.1

Por otra parte, en la figura B.5 se observan los valores de Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) de los usuarios al interior de la celda. De esta figura se observa que la probabilidad de que la SINR sea superior a -14 dB es de 0,14, lo que quiere decir que un 14% de los usuarios satisfacen su requerimiento de SINR.

De los resultados obtenidos en las figuras B.4 y B.5 se observa que este escenario es el que peor desempeño presenta, ya que al no aplicar Control de Potencia (PC) los niveles de interferencia en el sistema aumentan, y por otro lado requerir un valor de SINR objetivo mayor, hace al sistema menos tolerante frente a ruido e interferencia. Por estas dos razones en este escenario se obtienen valores de probabilidad de degradación tan altos.

<sup>56</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1'000.000.

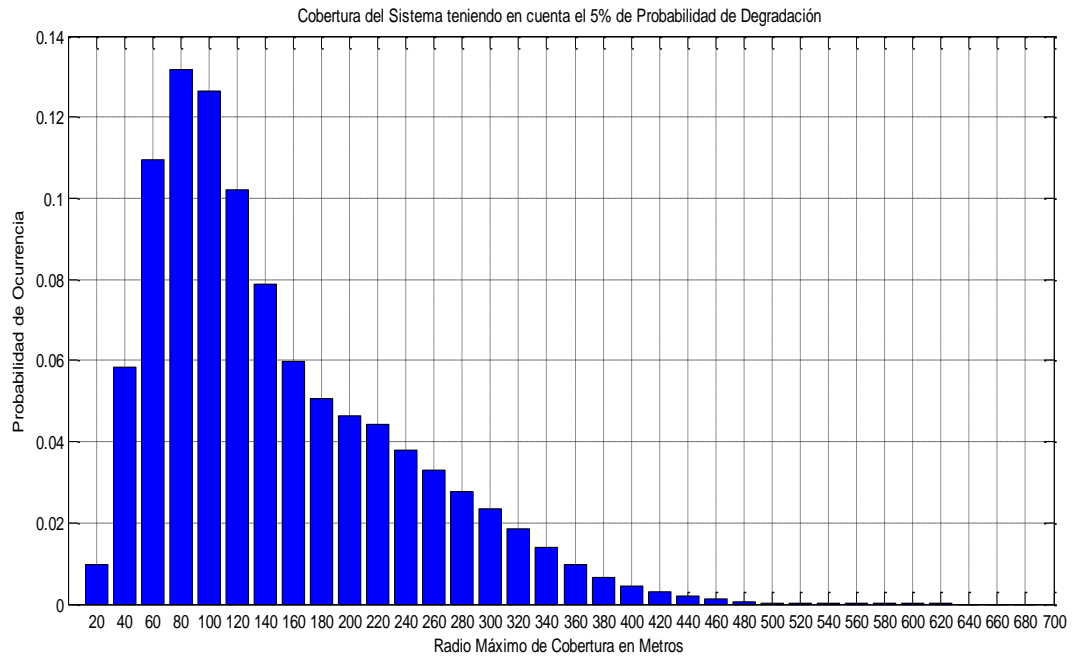


Figura B.2 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación<sup>57</sup>.

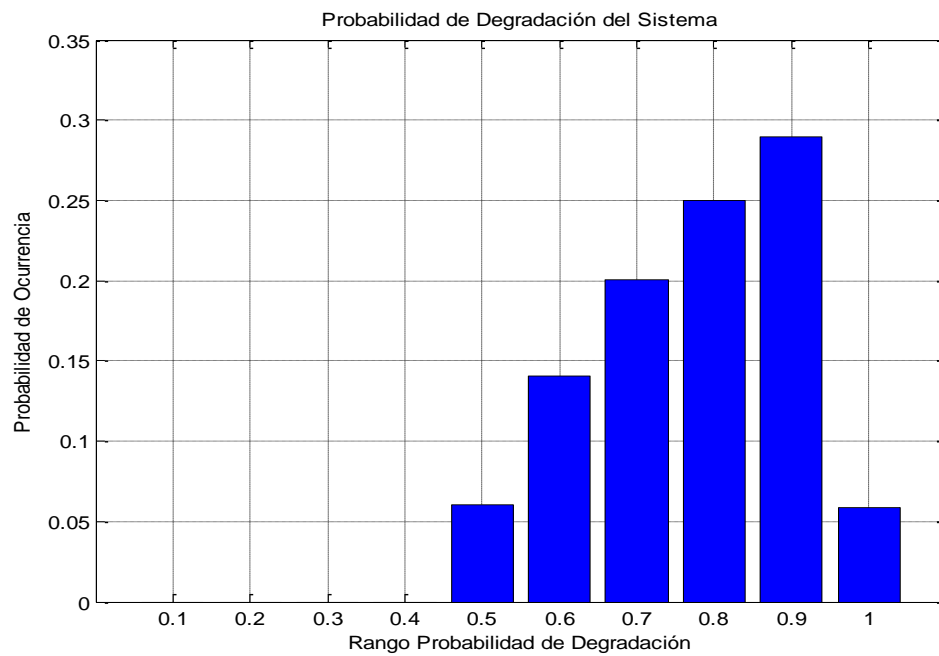


Figura B.3 Probabilidad de Degradación del Sistema<sup>58</sup>.

<sup>57</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1'000.000.

<sup>58</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1'000.000.



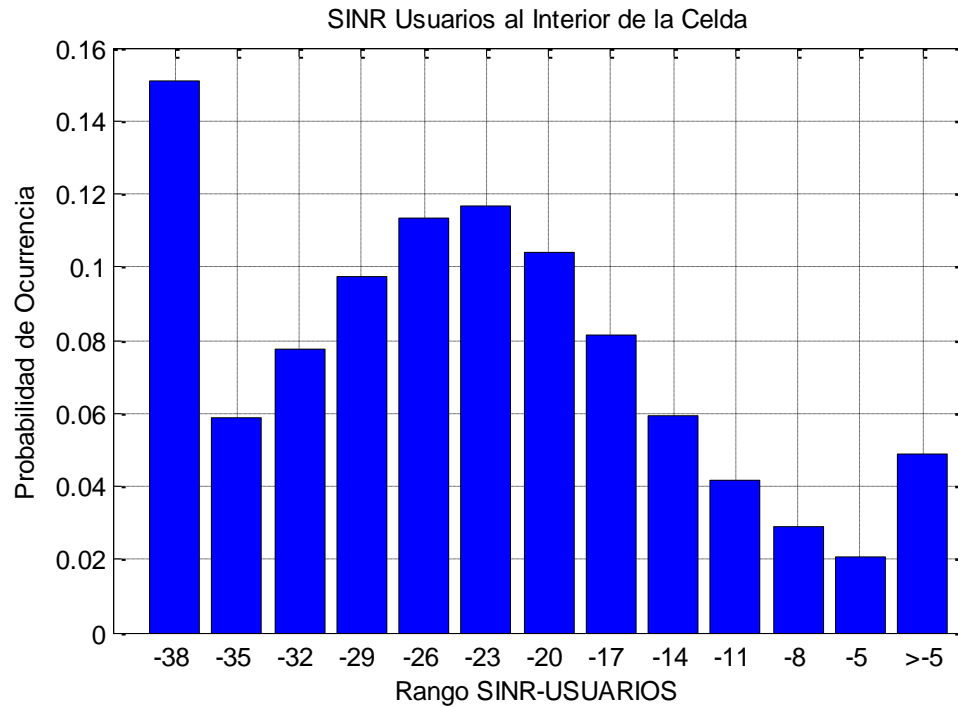


Figura B.4 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda<sup>59</sup>.

La tabla B.1 exhibe los valores obtenidos de las diferentes medidas estadísticas para cada una de las variables analizadas (Potencias de Transmisión, Cobertura del Sistema, Probabilidad de Degradación y SINR).

| CASO 3.2            |                               |   |   |                             |                    |
|---------------------|-------------------------------|---|---|-----------------------------|--------------------|
| Variables           | Potencia de Transmisión (dBm) | Cobertura del Sistema ( sin 5% de PD) (m) | Cobertura del Sistema ( con 5% de PD) (m) | Probabilidad de Degradación | SINR Usuarios (dB) |
| Media               | 24                            | 636,987                                   | 196,26                                    | 0,858                       | -25,684            |
| Moda                | 24                            | 580                                       | 80  | 0,9                         | -54,911            |
| Mediana             | 24                            | 640                                       | 120                                       | 0,8                         | -25,842            |
| Varianza            | 0                             | 8539,404                                  | 7112,223                                  | 0,0065                      | 167,427            |
| Desviación Estándar | 0                             | 92,4089                                   | 84,334                                    | 0,0807                      | 12,9394            |

Tabla B.1 Estadísticas de las variables analizadas para el caso de simulación 3.2.

<sup>59</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 23'203.000.



## B.2. Caso 3.3

Para este caso se configura el valor de la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) en -20 dB y se sitúan aleatoriamente 50 usuarios al interior del escenario siguiendo una distribución uniforme.

En las figuras B.6 a B.9 se muestran los resultados estadísticos después de ejecutar 1'000.000 de veces el presente caso en Matlab.

En la figura B.6, se muestra el resultado de cobertura máxima en la celda de análisis. De esta figura se puede notar que la probabilidad de que la cobertura este por encima de 700 metros es de 0,874, 6.7% mayor al valor obtenido en el caso de simulación 3.1. Por otra parte, la figura B.7 muestra que al considerar el 5% de probabilidad de degradación, existe un 25,6% de probabilidad de que la cobertura del sistema se encuentre por encima de 280 metros. Puede notarse, como los porcentajes obtenidos de cobertura para este caso son mayores a los del caso de simulación 3.1, esto debido a que al haber un número de usuarios menor dentro del escenario, la interferencia total del sistema disminuye, lográndose de este modo que los usuarios consigan conectarse a la Estación Base (BS) a distancias mayores.

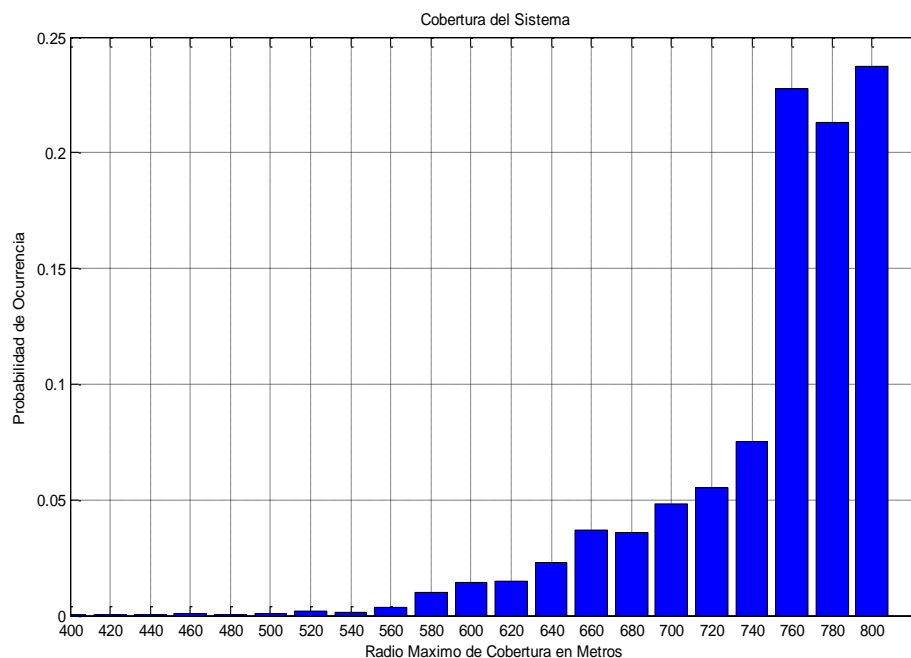


Figura B.5 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida<sup>60</sup>.

<sup>60</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1'000.000.



De la figura B.8 se puede visualizar que el valor en moda de la probabilidad de degradación es similar al obtenido en el caso de simulación 3.1, pero la probabilidad de ocurrencias para este caso es 9% menor, esto como consecuencia de haya un número menor de usuarios en el sistema

La figura 3.29 muestra los valores de Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) de los usuarios al interior de la celda. De esta figura se observa que la probabilidad de que la SINR sea superior a -20 dB es de 0.277, lo que quiere decir que un 27,7% de los usuarios satisfacen su requerimiento de SINR. De estos resultados se observa que al no implementar IPC el porcentaje de los usuarios que cumplen con la SINR objetivo disminuye, pasando de tener un 40% de los usuarios conectados en el caso 2.1 a un 27.7% en este caso.

Los valores de Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) de los usuarios al interior de la celda se presentan en la figura B.9. De esta figura se observa que la probabilidad de que la SINR sea superior a -20 dB es de 0.252, lo que quiere decir que un 25.2% de los usuarios satisfacen su requerimiento de SINR, disminuyendo en 2.47% el número de usuarios conectados a la Estación Base con relación al caso 3.1.

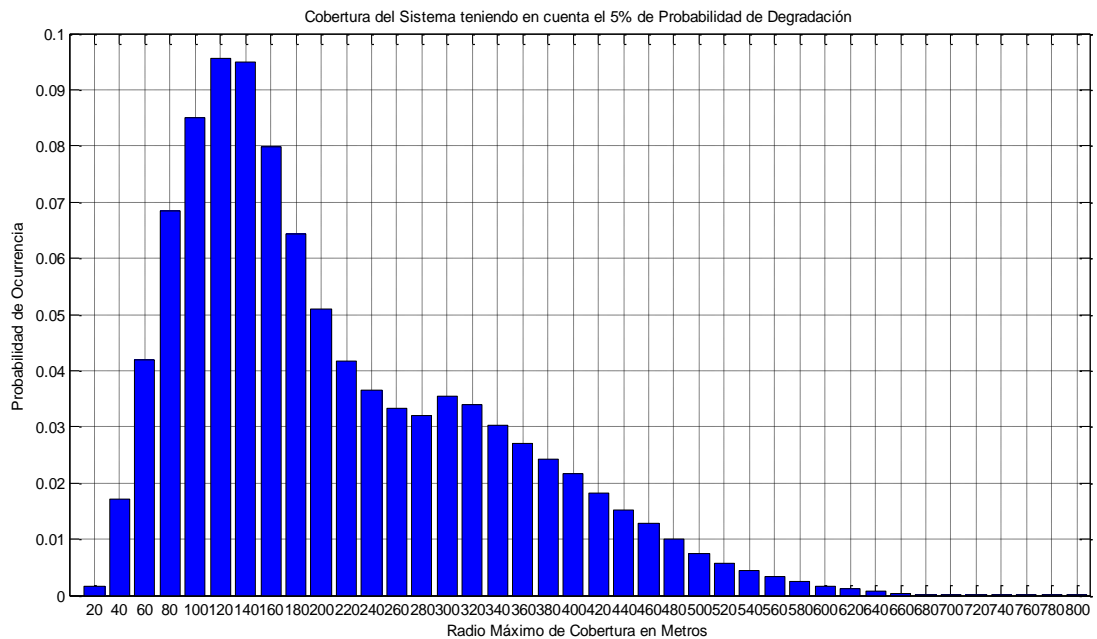


Figura B.6 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación<sup>61</sup>.

<sup>61</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1'000.000.

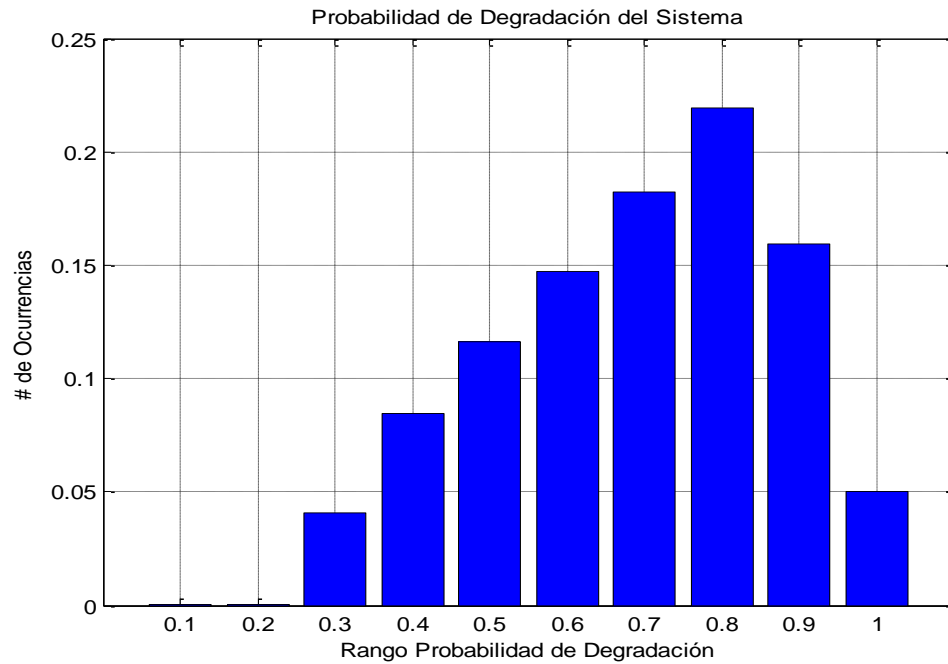


Figura B.7 Probabilidad de Degradación del Sistema<sup>62</sup>.

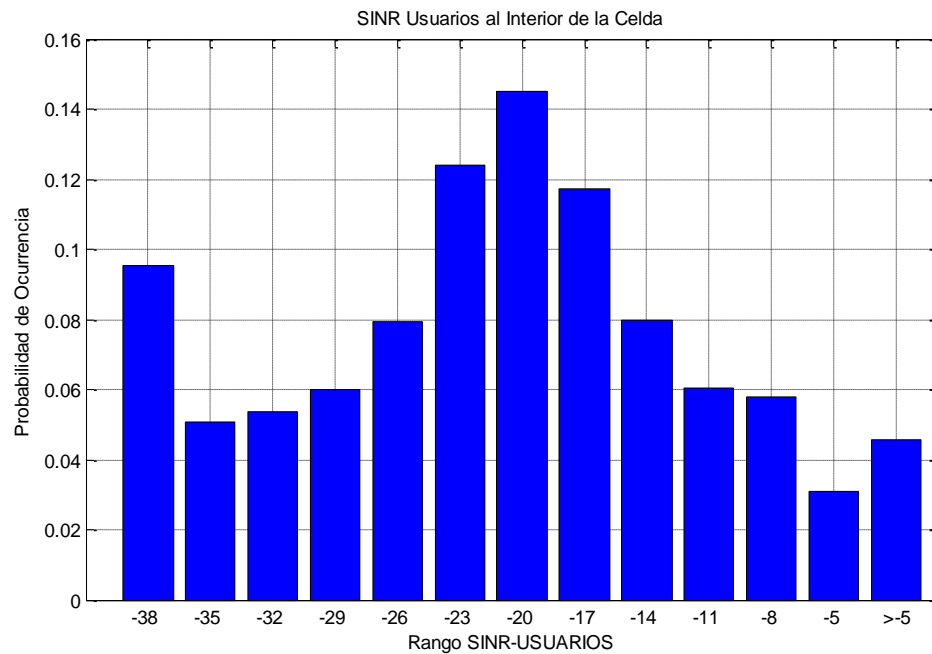


Figura B.8 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda<sup>63</sup>.

<sup>62</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 1'000.000.

<sup>63</sup> El valor de probabilidad de ocurrencia se calcula en relación a un valor total de datos de 11'958.000.



Las medidas estadísticas evaluadas para cada una de las variables analizadas (Potencias de Transmisión, Cobertura del Sistema, Probabilidad de Degradación y SINR) se exponen en la tabla B.2.

| CASO 3.3            |                               |   |   |                             |                    |
|---------------------|-------------------------------|---|---|-----------------------------|--------------------|
| Variables<br>Medida | Potencia de Transmisión (dBm) | Cobertura del Sistema ( sin 5% de PD) (m) | Cobertura del Sistema ( con 5% de PD) (m) | Probabilidad de Degradación | SINR Usuarios (dB) |
| Media               | 24                            | 740,488                                   | 288,0528                                  | 0,747                       | -23,9555           |
| Moda                | 24                            | 800                                       | 120                                       | 0,8                         | -67,557            |
| Mediana             | 24                            | 760                                       | 180                                       | 0,7                         | -26,746            |
| Varianza            | 0                             | 3988,149                                  | 13029,01                                  | 0,0478                      | 164,6934           |
| Desviación Estándar | 0                             | 63,1518                                   | 114,1447                                  | 0,2188                      | 12,8333            |

Tabla B.2 Estadísticas de las variables analizadas para el caso de simulación 3.3.

## APÉNDICE C. ESCENARIO 4: CON Y SIN MOVILIDAD EN LOS USUARIOS.

### C.1. Caso 4.1

En este caso se genera un escenario completamente estático, en el que se mantiene constante la posición de los usuarios durante toda la simulación y en el cual se implementa el procedimiento de Control Ideal de Potencia (IPC). Además, se configura el escenario con 100 usuarios en su interior, ubicados de manera aleatoria siguiendo una distribución uniforme y se establece el valor de la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) objetivo en -20 dB.

Luego de ejecutar 1000 veces la simulación 4.1 en Matlab, se obtienen los resultados mostrados en las figuras C.1 a C.8.

Las potencias de transmisión requeridas por las Estaciones Móviles (MS) al interior de la celda se presentan en las figuras C.1 y C.2. De la figura C.2 se puede observar que las potencias de transmisión requeridas tomaron únicamente los valores de -21, -3, 6, 9 y 15 dBm, siendo 15 dBm la potencia con probabilidad de ocurrencia máxima, igual a 0.26.

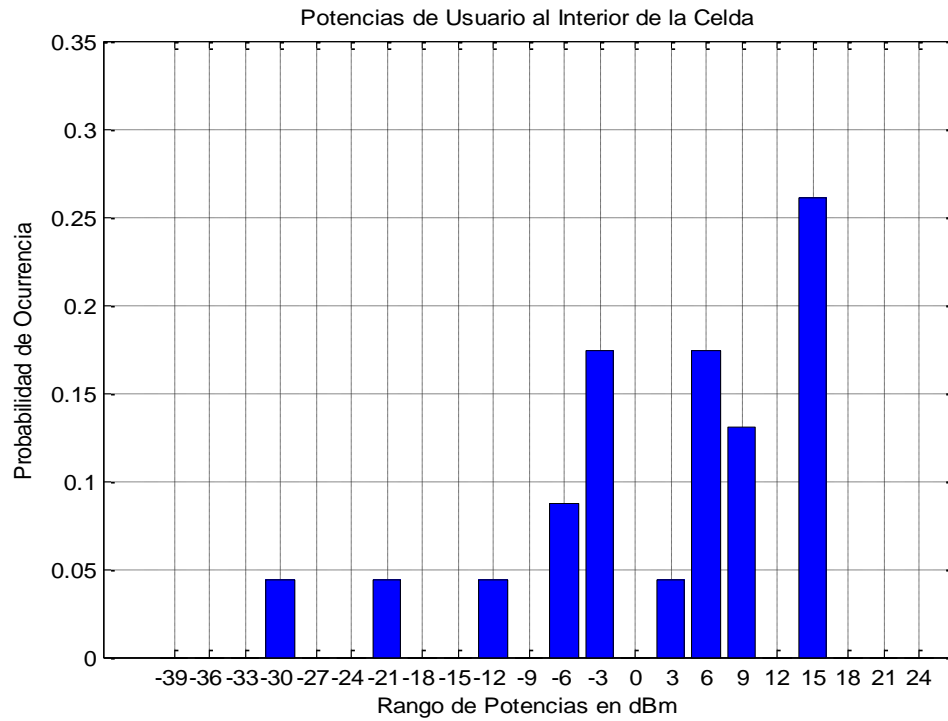


Figura C.1 Potencias de Transmisión de Usuario al Interior de la Celda.

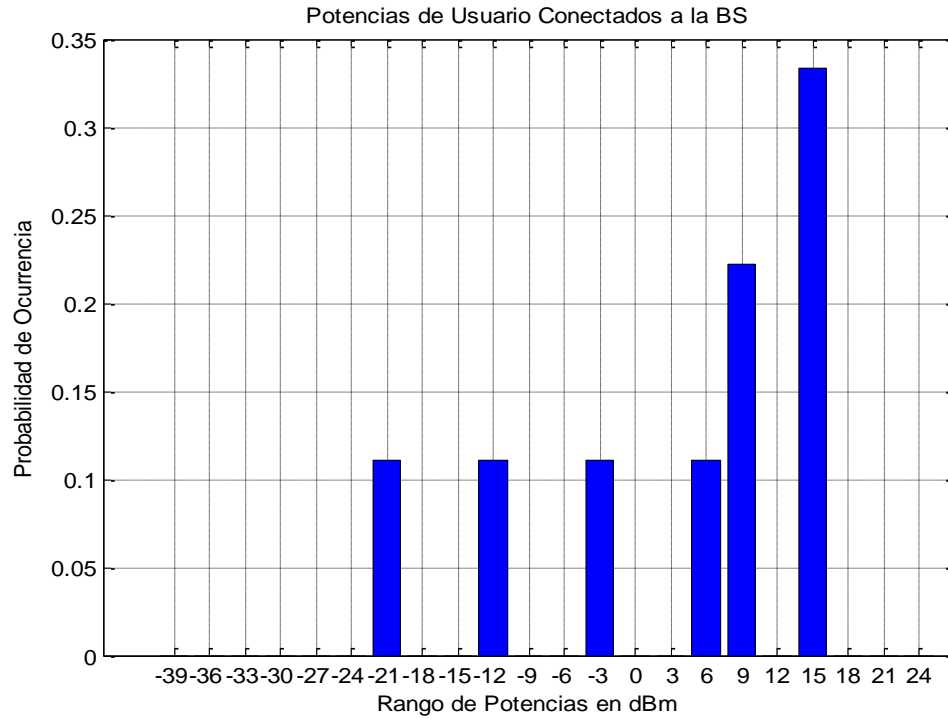


Figura C.2 Potencias de Transmisión de Usuarios Conectados a la BS.



Las figuras C.3 a C.5 hacen visible el hecho de que en un escenario completamente estático<sup>64</sup> se espera obtener siempre el mismo resultado, dado que al no variar la posición de los usuarios, las condiciones del sistema se mantienen constantes en toda la simulación, por lo que la solución al sistema de ecuaciones lineales del Control Ideal de Potencia (IPC) siempre es la misma. La figura C.3 muestra que la cobertura máxima alcanzada durante toda la simulación siempre se mantuvo en 700 metros, de la figura C.4 se observa que la cobertura máxima alcanzada teniendo en cuenta el 5% de probabilidad de degradación fue de 300 metros y en la figura C.5 se ve que el valor de la probabilidad de degradación tomo siempre el valor de 0,7, lo que indica que solo un 30 % de los usuarios al interior de la celda logro conectarse a la Estación Base (BS).

La figura C.6 muestra que el valor de Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) de -17 dB tiene un numero de ocurrencia aproximadamente de 8.000 veces de un total de 23.000, lo cual indica que un 34.78% de los usuarios satisfacen su requerimiento de SINR.

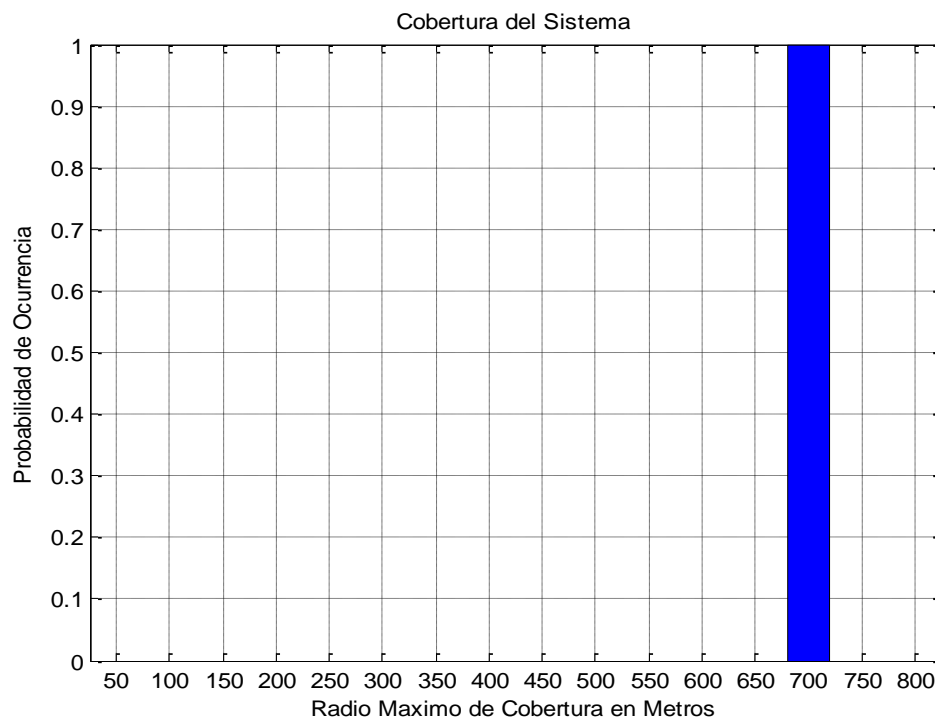


Figura C.3 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida.

<sup>64</sup> Los usuarios al interior del escenario conservan la misma posición durante toda la simulación.

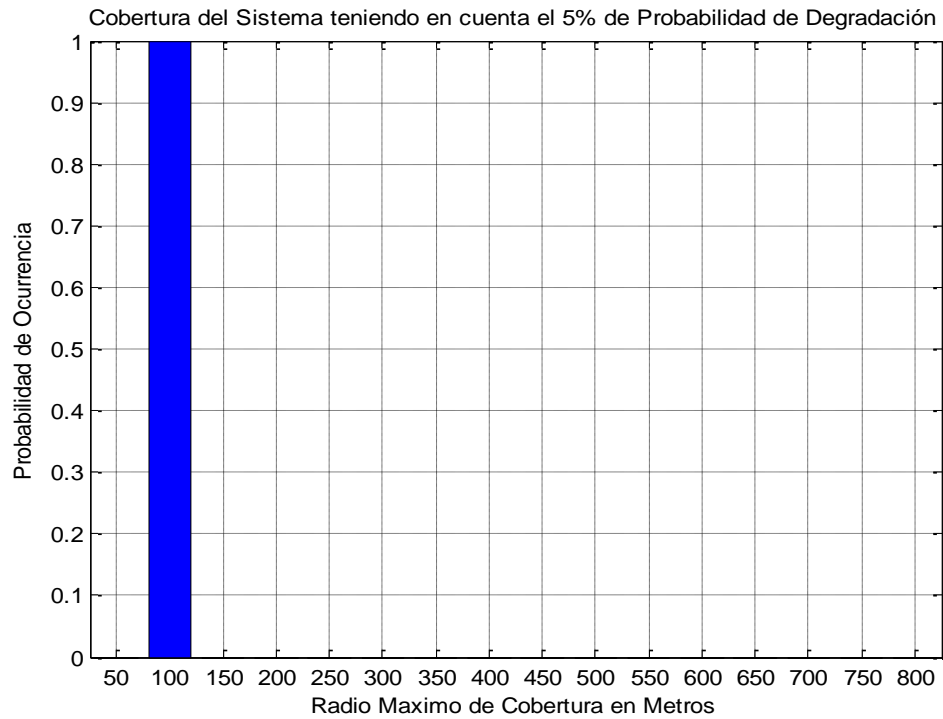


Figura C.4 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación.

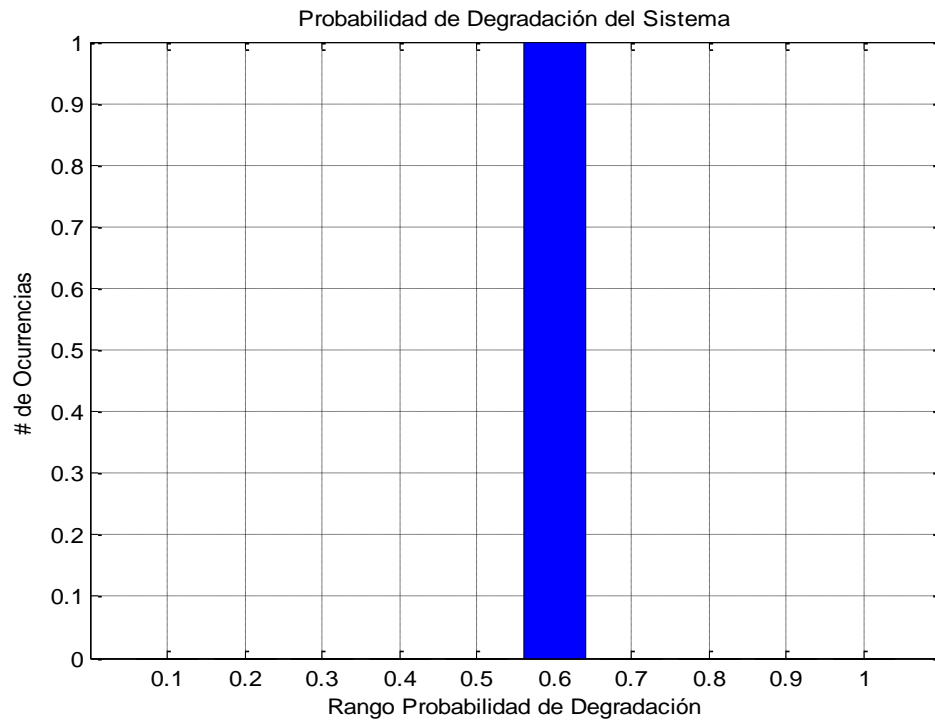


Figura C.5 Probabilidad de Degradación del Sistema.



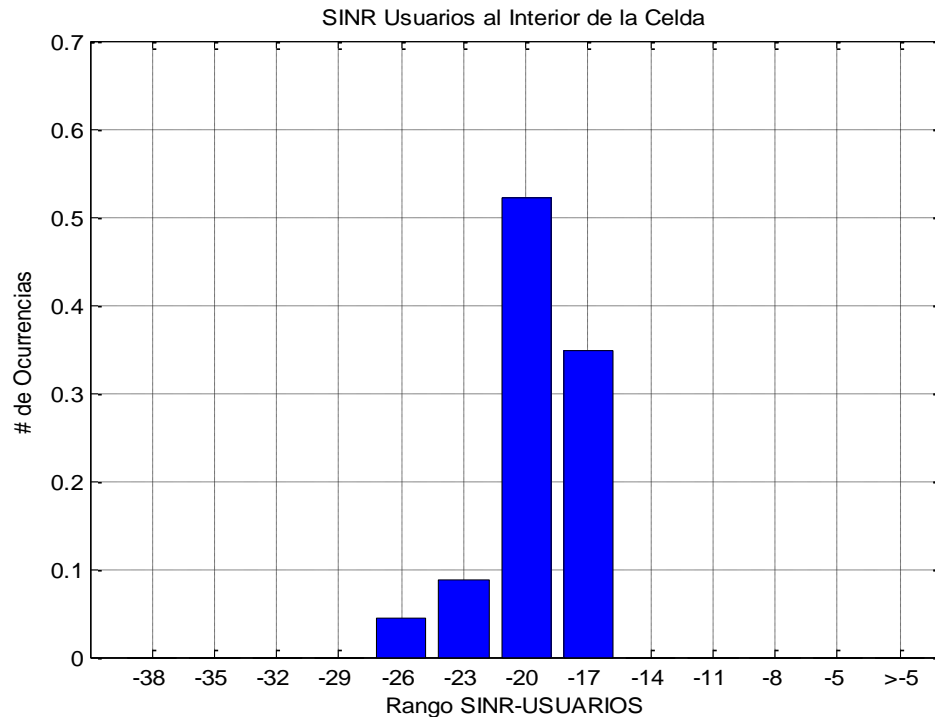


Figura C.6 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda.

Para mostrar de una manera más específica el hecho de que al simular un escenario completamente estático la respuesta que se obtiene siempre es la misma, se presentan las figuras C.7 y C.8, en las cuales se muestra respectivamente la potencia de transmisión y la Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de tres usuarios elegidos aleatoriamente, los cuales quedaron ubicados al interior de la celda.

De la figura C.7 se visualiza que mediante el procedimiento de Control Ideal de Potencia (IPC) a los usuarios 1, 35 y 41 siempre se les asignó la potencia de transmisión de 0, 9 y -39 dBm respectivamente. Por otro lado, en la figura C.8 se observa en color rojo la SINR requerida por los usuarios (-20 dB) y en colores azul, verde y magenta la SINR alcanzada por los usuarios 1, 35 y 41 respectivamente. De esta figura se puede ver que los usuarios 1 y 35 cumplieron con el requerimiento de SINR; el usuario 1 alcanzó una SINR de -18.372 y el usuario 35 una SINR de -19.122, mientras que el usuario 41 quedó sin servicio al no cumplir con el valor de SINR objetivo, al obtener una SINR de -65.083.

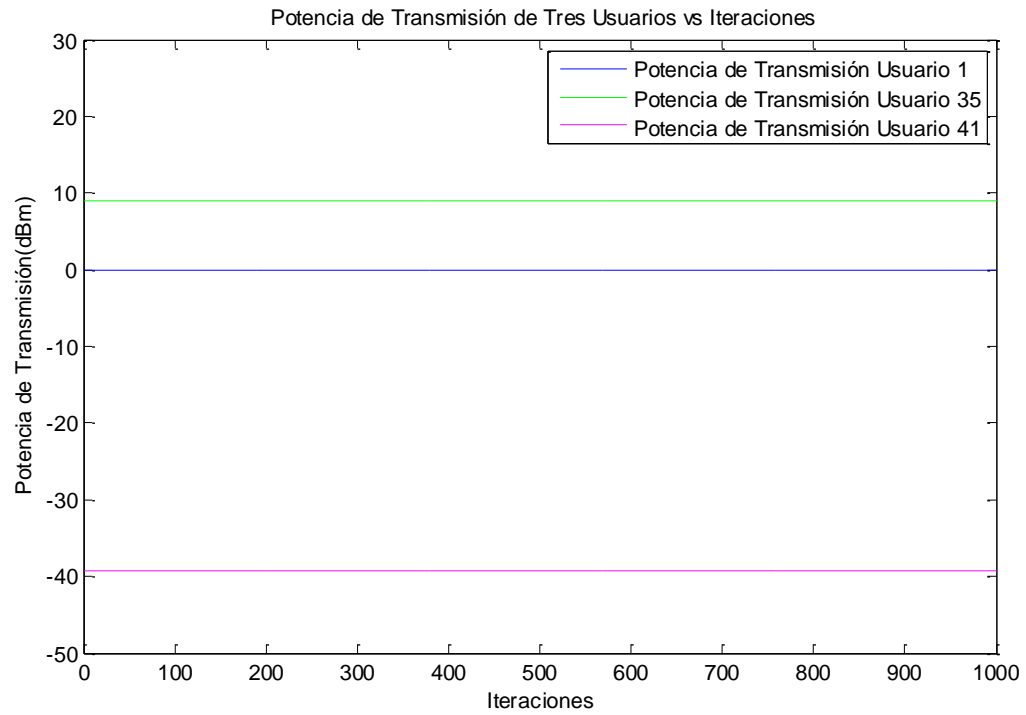


Figura C.7 Potencia de Transmisión Usuario 1 vs Iteraciones.

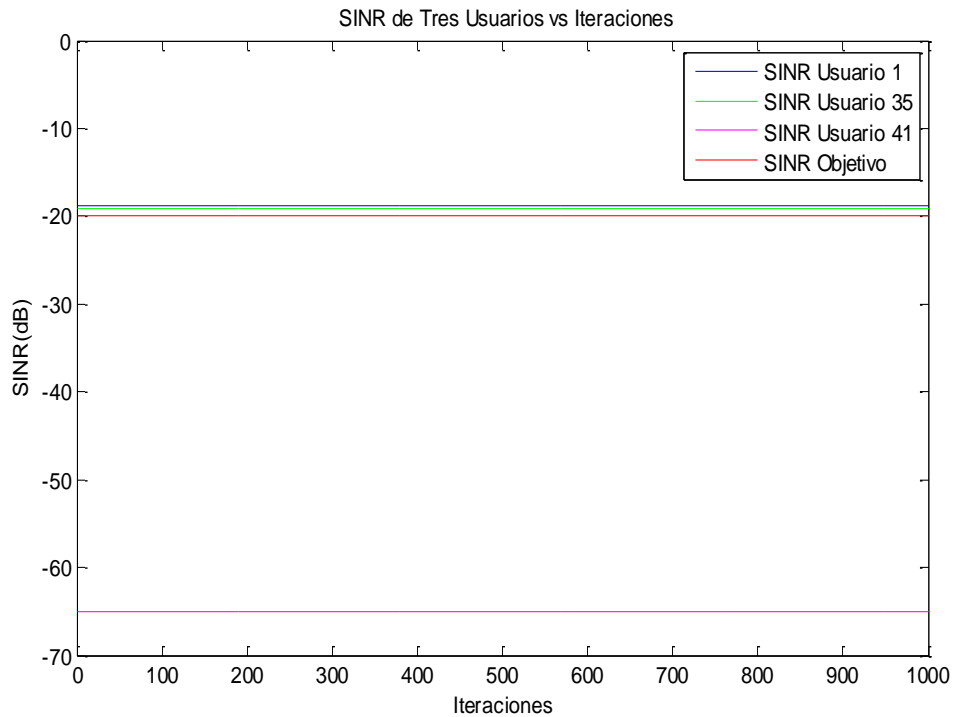


Figura C.8 Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) Usuario 1 vs Iteraciones.



## C.2. Caso 4.2

En este caso se implementan el Control Ideal de Potencia (IPC) y la movilidad de los usuarios durante las 1000 iteraciones de la simulación, con el objetivo de observar el impacto que tiene la movilidad en el desempeño del sistema.

Las figuras C.9 a C.16 muestran los resultados estadísticos tras simular 1000 veces la simulación 4.2 en Matlab.

En las figuras C.9 y C.10, se muestra que las potencias de transmisión requeridas por las Estaciones Móviles (MS) conectadas a la Estación Base (BS) en moda, son iguales a 12 dBm, del mismo modo se ve que los valores de potencia inferiores a 12 dBm, presentan un número de ocurrencia significativo en comparación con los resultados obtenidos en el caso estático. Estos resultados se deben al movimiento de los usuarios, ya que a medida que estos se desplazan alejándose o acercándose a la Estación Base (BS), las potencias de transmisión requeridas por estos son más altas o bajas respectivamente.

Del análisis de cobertura presentado en la figura C.11, se puede notar que los valores de cobertura se distribuyen en los rangos de 700, 750 y 800 metros, siendo este último el valor de cobertura con mayor número de ocurrencia en la simulación. De la figura C.12 se observa que la moda de la cobertura del sistema teniendo cuenta el 5% de probabilidad de degradación es 200 metros, reduciéndose el valor de cobertura en una cuarta parte.

De la figura C.13 se puede ver que al igual que en el caso estático 0,7 es el valor de probabilidad de degradación más ocurrente, sin embargo valores como 0,6 y 0,8 también presentan un número de ocurrencia considerable. En la figura C.14 se observa que el valor de -17 dB tiene una probabilidad de ocurrencia de 0.43, lo cual indica que un 43% de los usuarios alcanzaron un valor de SINR mayor o igual a -20 dB, que es el valor de SINR objetivo en este caso.

De los resultados obtenidos en las figuras C.9 a C.14 se observa como al implementar la movilidad, se logran distancias de cobertura superiores y valores de probabilidad de degradación inferiores a los obtenidos en el caso estático, ya que el movimiento de los usuarios permite que estos puedan ubicarse en sitios en los cuales encuentren mejores condiciones, como una zona libre de obstrucciones o niveles de ruido más bajos, y de este modo puedan conectarse a la Estación Base (BS). Además, implementar la movilidad de los usuarios permite representar el sistema de una manera mucho más real.

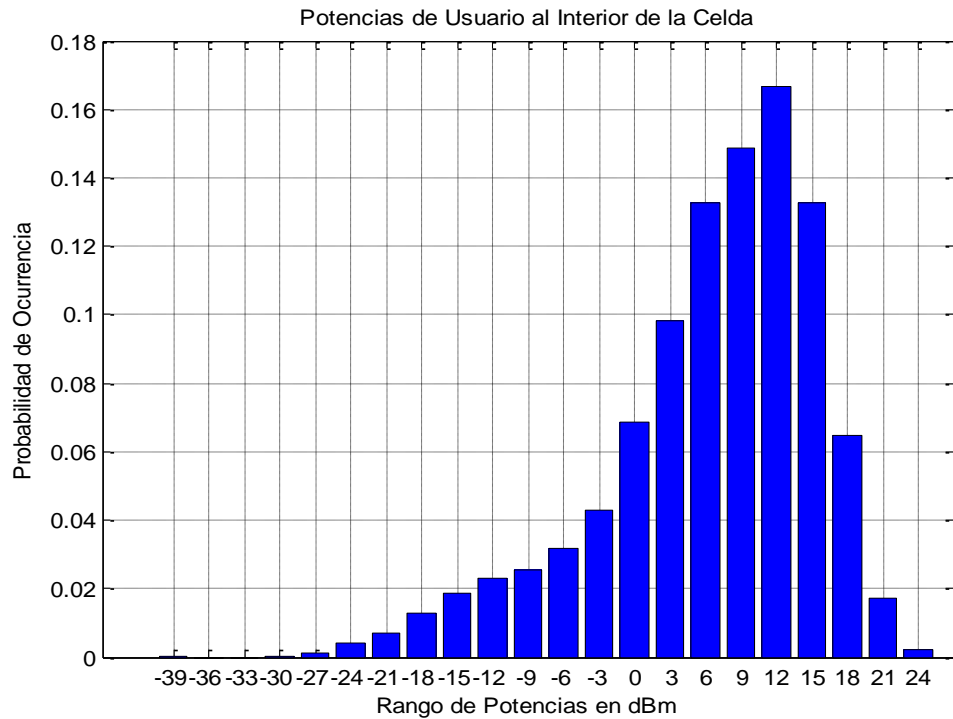


Figura C.9 Potencias de Transmisión de Usuario al Interior de la Celda.

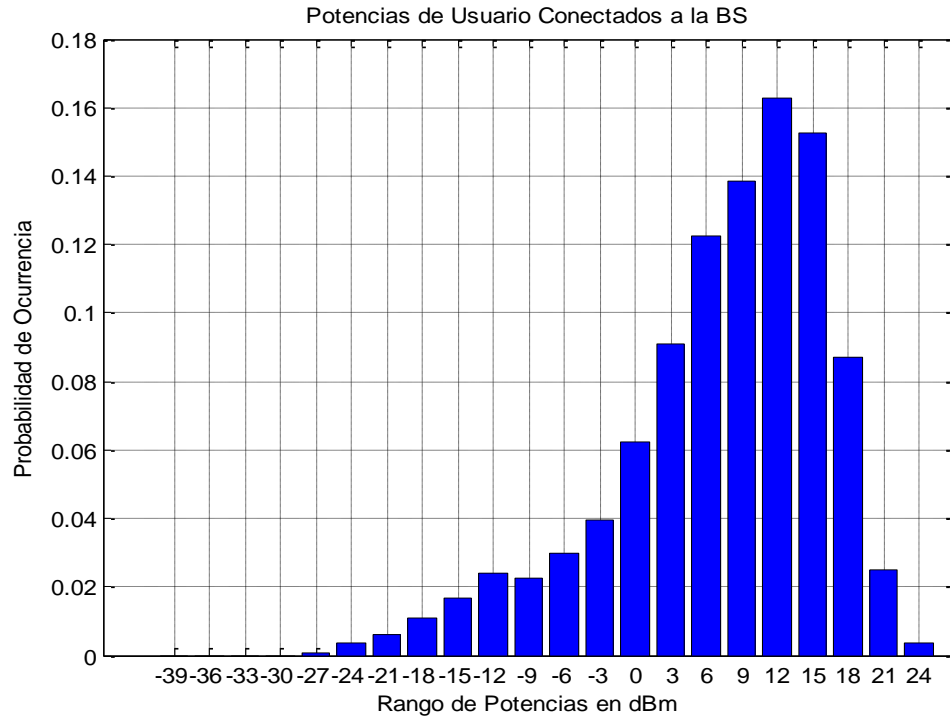


Figura C.10 Potencias de Transmisión de Usuarios Conectados a la BS.

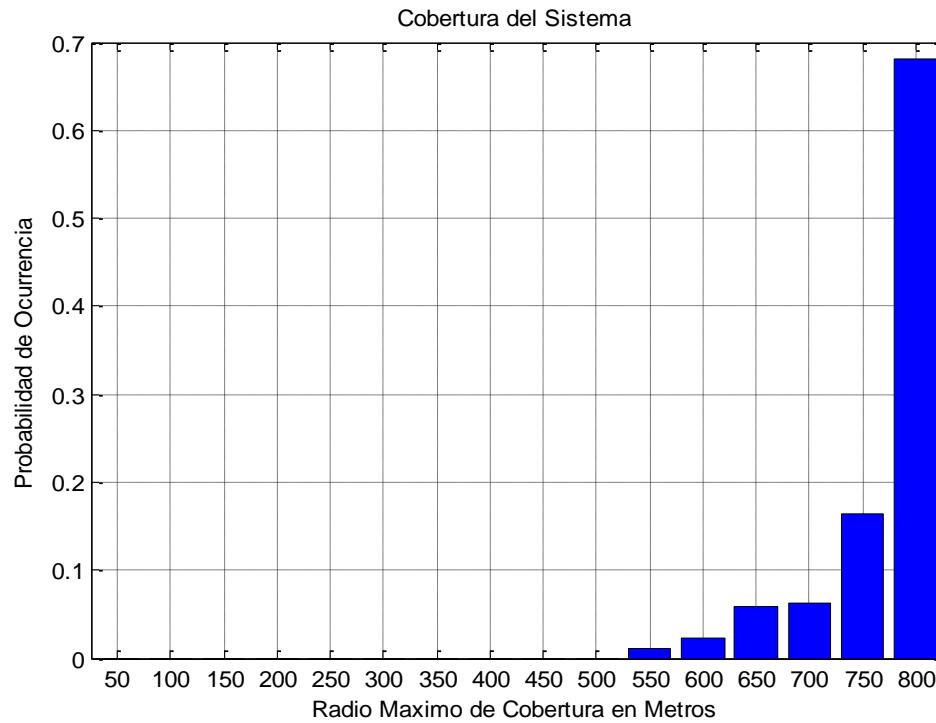


Figura C.11 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida.

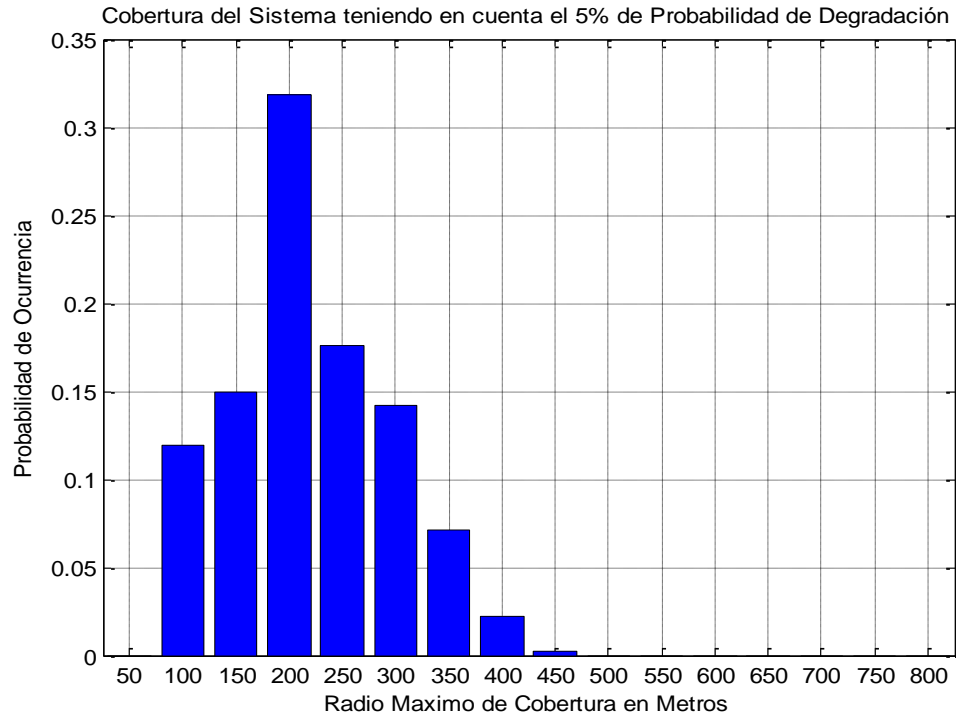


Figura C.12 Cobertura del Sistema en el Enlace de Subida sin superar el 5% de Probabilidad de Degradación.

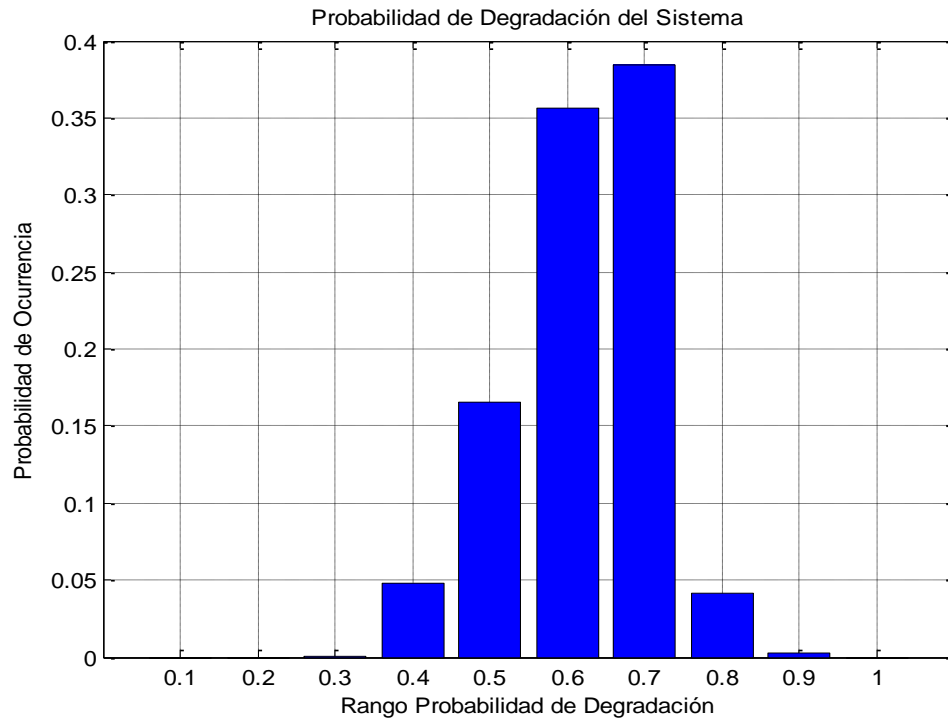


Figura C.13 Probabilidad de Degradación del Sistema.

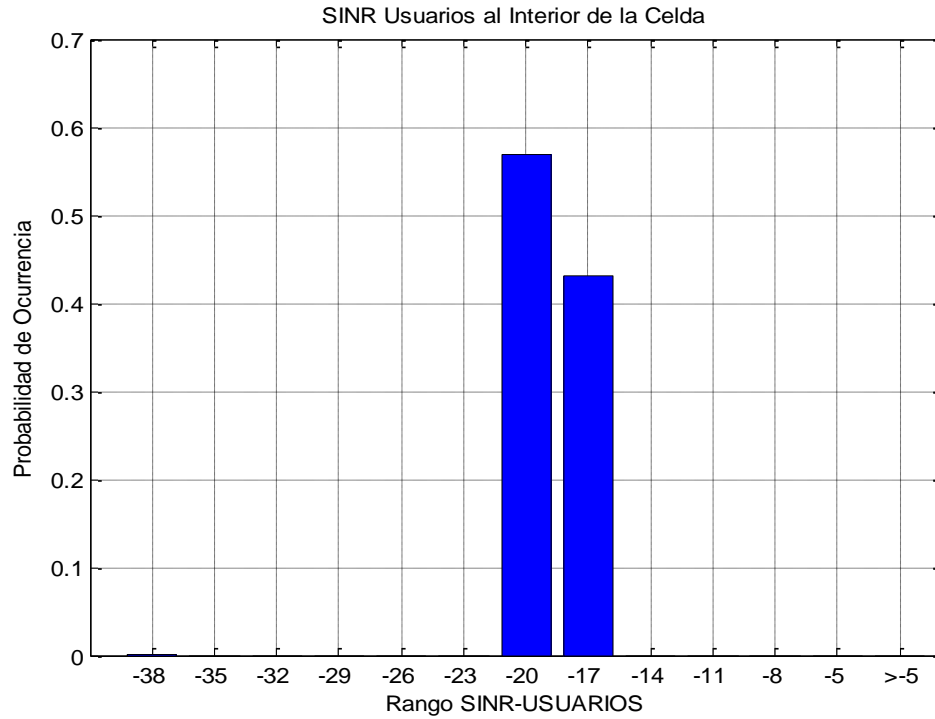


Figura C. 14 Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de los Usuarios al Interior de la Celda.



En las figuras C.15 y C.16, se muestran respectivamente la potencia de transmisión y la Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR) de tres usuarios ubicados al interior de la celda elegidos aleatoriamente. De la figura C.15 se puede ver que las potencias de transmisión asignadas a los usuarios varían en pasos de 3 dB a medida que éstos se desplazan. Por ejemplo, se observa como el usuario 1 inicia transmitiendo con un valor de 0 dBm, el cual aumenta cada vez que este se aleja de la Estación Base (BS), hasta llegar a 15 dBm. Igualmente se observa como el usuario 83 inicia transmitiendo con un valor de potencia igual a 15 dBm, el cual disminuye cada que este se acerca a la Estación Base (BS) hasta el valor de -18 dBm, luego en la iteración 900 se ve como el valor de la potencia comienza a aumentar pasando de -18 a -9 dBm, lo que indica que el usuario se empieza alejar de la Estación Base (BS).

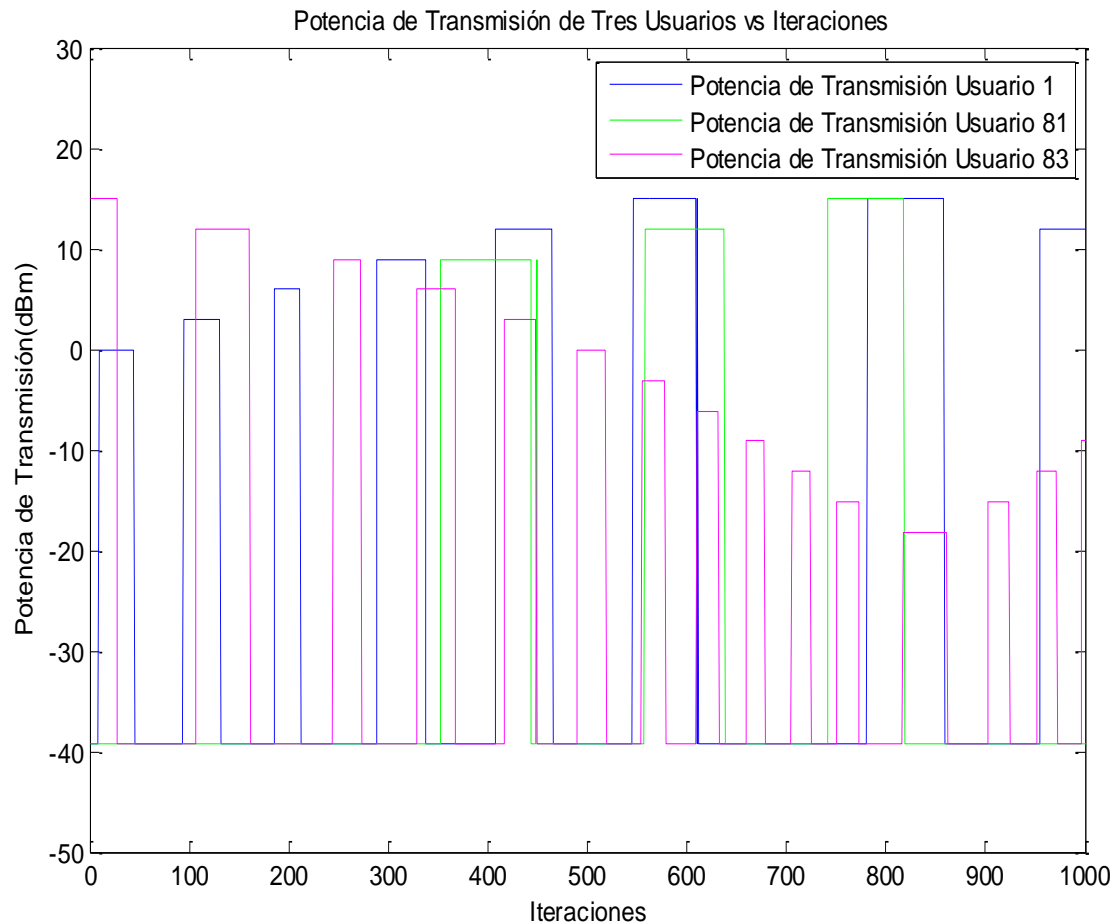


Figura C.15 Potencia de Transmisión de Tres Usuarios al interior de la celda vs Iteraciones.

Por otro lado, en la figura C.16 se observa en color rojo la SINR requerida por los usuarios (-20 dB) y en color azul, verde y magenta la SINR obtenida por los



usuarios 1, 81 y 83 respectivamente. De esta figura se observa como el movimiento de los usuarios causa que la SINR fluctuó y que en algunos instantes los usuarios se encuentren conectados a la Estación Base (BS) y en otros queden sin servicio. Además, se observa que el valor de la SINR aumenta o disminuye dependiendo de si el usuario se acerca o se aleja de la Estación Base (BS), dado que las pérdidas de propagación están en función de la distancia y estas a su vez influyen en la solución del sistema de ecuaciones lineales del Control Ideal de Potencia (IPC), solución de la cual depende el valor de la SINR alcanzada por los usuarios. Del mismo modo se ve que los intervalos donde la SINR cae por debajo del valor requerido coinciden con los intervalos donde la potencia de los usuarios es de -39 dBm, esto debido a que en la simulación se les asigna a los usuarios este valor mínimo de potencia para dejarlos sin servicio, ya que con la potencia determinada mediante el Control Ideal de Potencia (IPC) estos no cumplieron con la SINR objetivo.

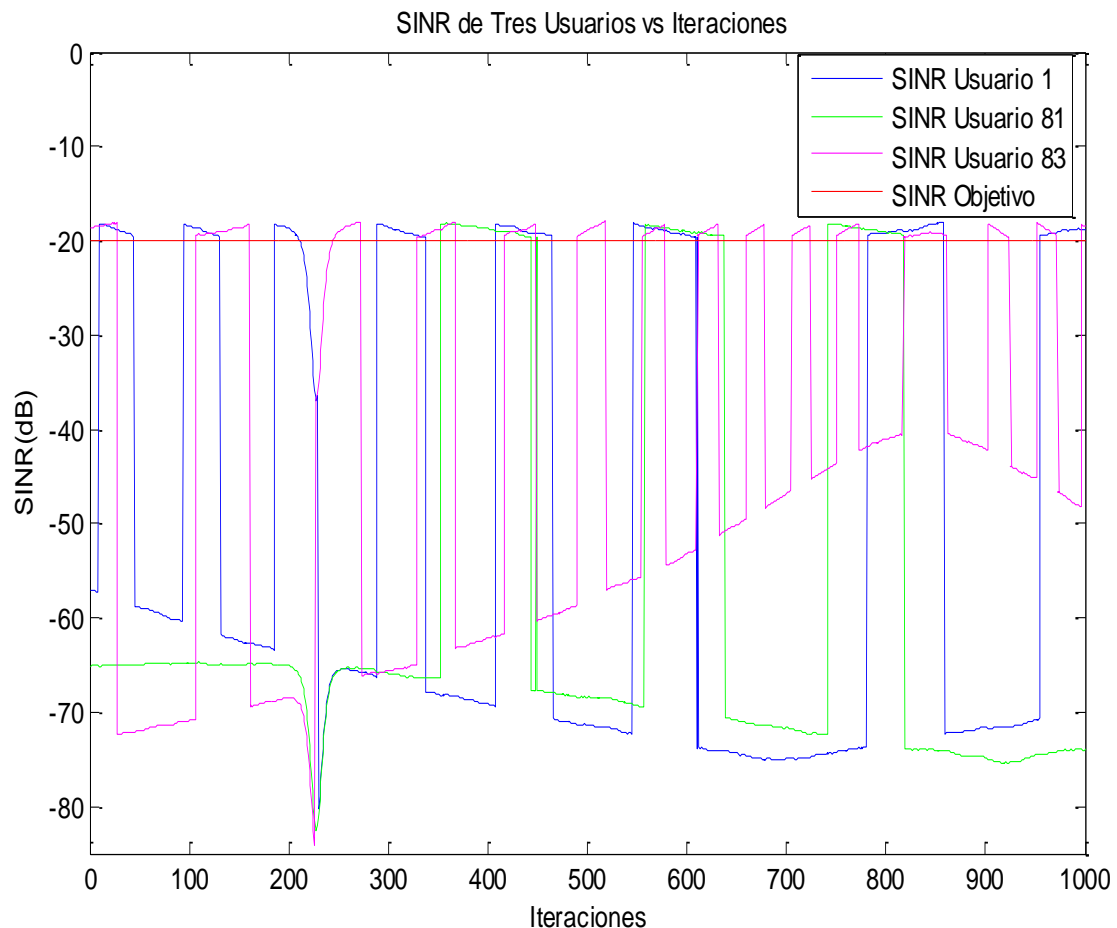


Figura C.16 Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR) de Tres Usuarios al interior de la celda VS Iteraciones.