

Tesis defendida por  
**Héctor Manuel Félix Ibarra**  
y aprobada por el siguiente comité

---

**Dr. David Hilario Covarrubias Rosales**  
*Director del Comité*

---

**Dr. Carlos Alberto Brizuela Rodríguez**  
*Miembro del Comité*

---

**Dr. Salvador Villarreal Reyes**  
*Miembro del Comité*

---

**Dr. Enrique Pacheco Cabrera**  
*Miembro del Comité*

---

**Dr. César Cruz Hernández**  
*Coordinador del programa de posgrado  
en Electrónica y Telecomunicaciones*

---

**Dr. David Hilario Covarrubias Rosales**  
*Director de Estudios de Posgrado*

Ensenada, Baja California, 20 de Agosto de 2012

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DE ENSENADA**



---

**Programa de Posgrado en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones**

---

**Técnicas heurísticas aplicadas a la optimización del radio de  
la celda en una red celular basada en WCDMA**

Tesis

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

Héctor Manuel Félix Ibarra

Ensenada, Baja California, México, 20 de Agosto 2012

**Resumen** de la tesis de **Héctor Manuel Félix Ibarra** presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones. Ensenada, Baja California. Agosto de 2012

**Técnicas Heurísticas Aplicadas a la Optimización del Radio de la Celda en una Red Celular Basada en WCDMA**

Resumen aprobado por:

---

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales  
Director de Tesis

La planificación celular en las redes móviles celulares se encarga de resolver la complejidad del proyecto de suministro de servicio al maximizar la cobertura y capacidad del sistema, considerando los factores importantes de desempeño y calidad de servicio, que tanto el mercado como las nuevas tecnologías celulares demandan. El radio de la celda cuenta con una importancia tal en la planificación de la red que una estimación inadecuada refleja una influencia directa tanto en los costos de su desarrollo como en los compromisos entre capacidad de usuarios, tráfico y cobertura que los sistemas actuales presentan, como WCDMA. Establecer un adecuado balanceo de los parámetros determinantes en la optimización del radio celular, presenta un problema con un espacio de solución bastante amplio en escenarios con distintos tipos de servicios y comportamientos de tráfico, para lo que proponemos la implementación de cuatro técnicas heurísticas que resuelvan la asignación de carga en el cálculo del radio de la celda. Se validan los algoritmos con escenarios que cuentan con mezclas de servicios de distintas características y tasas de transmisión, así como comportamientos de tráfico balanceado y no balanceado. Se realiza un análisis riguroso del desempeño de las heurísticas y de la calidad de las soluciones obtenidas, además de un reporte de resultados adicionales generados que complementan la investigación.

**Palabras Clave:** Planificación celular, Optimización del radio celular, Técnicas heurísticas, WCDMA, Comunicaciones móviles celulares.

**Abstract** of the thesis presented by **Héctor Manuel Félix Ibarra** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Electronics and Telecommunications with orientation in Telecommunications. Ensenada, Baja California, México. August 2012.

### **Heuristic Techniques Applied to the Optimization of the Cell Radius in a Cellular Network Based on WCDMA**

The cell planning in the mobile cellular networks is responsible for resolving the complexity of the project of service delivery by maximizing coverage and system capacity, considering the important factors of performance and quality of service, that both the market and new cellular technologies require. The radius of the cell has such importance in the planning of the network that an inadequate estimation reflects a direct influence both the cost of developing and compromises between user capacity, traffic and coverage than current systems present, such as WCDMA. Establishing an adequate balance of key parameters in optimizing cellular radio, has a problem with a fairly large solution space in scenarios with different types of services and traffic behavior, for which the implementation of four heuristics is propose to solve the capacity allocation in the cell radius calculation. The algorithms are validated with scenarios that have different mixes of services, characteristics and transmission rates, as well as balanced and unbalanced traffic behaviors. A thorough analysis of the performance of the heuristics and the quality of the solutions obtained is conducted, as well as a report of additional generated results that complement the research.

**Keywords:** Cell planning, Optimization of the cell radius, Heuristic Techniques, WCDMA, Cell mobile communications.

## Dedicatorias

*A mi familia, por ser mi principal y más fuerte apoyo durante toda mi vida.  
Gracias a ustedes por siempre.*

*A mis amigos.*

*Y a todas esas personas que, de una u otra manera,  
me hicieron crecer más como ser humano.*

## Agradecimientos

Gracias a la vida por esa belleza que guarda en su misterio y que ha motivado con ella mi deseo por descubrirla a través de la ciencia y el arte.

A mi familia que han estado conmigo en todo momento, siempre apoyándome y aconsejándome ante cualquier situación y dificultad que se me ha presentado. A mi madre por ese cariño incomparablemente incondicional y fuerte. A mi padre por su consejo certero y comprensivo. A mi abuela por las tantas bendiciones que me dio para que llegara salvo. A mis hermanos por esos momentos de sano humor inolvidables. A todos ellos por ayudarme a mantenerme en pie por más dura que sea la lucha.

Al Dr. David Covarrubias por ser maestro y guía en este proceso de enseñanza. Por su disciplina, formalidad y consejos de trabajo que dirigieron nuestro desempeño durante esta formación académica. Por su amistad, que nos ayudó a no bajar la guardia.

A mi comité de tesis: Dr. Carlos Brizuela, Dr. Salvador Villarreal y Dr. Enrique Pacheco, por sus observaciones, comentarios, aportaciones y consejos que fortalecieron y mejoraron mi trabajo de investigación.

Al CICESE por permitirme ser miembro de la institución brindándome esta oportunidad de estudio profesional y aprendizaje invaluable al abrirme sus puertas a sus herramientas de apoyo académico e institucional.

Al miembro administrativo de una excelente calidad y de trato incomparable.

A los investigadores y personal del CICESE, en especial al departamento de electrónica y telecomunicaciones, por estar ahí en todo momento con sus consejos durante todo el periodo de la maestría.

A mis compañeros de generación: Fernando, Arturo, Enrique, Shiro, Mañe, Ricardo, Raúl, Rodrigo, Antonio, Miriam, Oscar, Jorge, Marta, Lilia, por los tantos momentos de convivencia y por compartir esta experiencia juntos.

A mis compañeros del Grupo de Comunicaciones inalámbricas: Leonardo, Guillermo, Armando, Alejandro, Leopoldo, que tanto nos apoyaron y aconsejaron técnica y personalmente mejorando la calidad del trabajo de tesis.

A todos mis amigos que a pesar de la distancia y el tiempo, la amistad se ha mantenido firme.

Al CONACYT, por la beca recibida a lo largo de los estudios de maestría

## CONTENIDO

	<b>Página</b>
<b>Resumen español .....</b>	<b>i</b>
<b>Resumen ingles .....</b>	<b>ii</b>
<b>Dedicatorias .....</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimientos .....</b>	<b>iv</b>
<b>Contenido .....</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Tablas .....</b>	<b>ix</b>
<b>Capítulo I. Introducción .....</b>	<b>1</b>
I.1 Escenario de aplicación.....	1
I.2 Planteamiento del problema.....	3
I.3 Objetivo de la tesis.....	5
I.4 Organización de la tesis.....	5
<b>Capítulo II. WCDMA dentro de la planificación celular.....</b>	<b>8</b>
I.II.1 Objetivo del capítulo.....	8
II.2 El concepto de planificación celular.....	9
II.2.1 Dimensionamiento.....	10
II.2.2 Planificación detallada.....	11
II.2.3 Optimización y monitorización.....	12
II.3 Análisis de la interfaz radio WCDMA.....	13
II.4 Planificación celular de WCDMA.....	15
II.5 Conclusiones.....	17
<b>Capítulo III. Modelado matemático en el cálculo del radio celular.....</b>	<b>18</b>
III.1 Objetivo del capítulo.....	18
III.2 Proceso de modelado del radio de la celda.....	18
III.3 Modelo de propagación en WCDMA.....	19
III.4 Modelo de capacidad en WCDMA.....	24
III.5 Esquema de solución al problema de optimización.....	30
III.6 Conclusiones.....	33
<b>Capítulo IV. Técnicas heurísticas aplicadas a la optimización del radio celular.....</b>	<b>34</b>
IV.1 Objetivo del capítulo.....	34
IV.2 Optimización.....	34
IV.3 Técnicas heurísticas.....	36

## CONTENIDO (continuación)

	<b>Página</b>
IV.3.1 Heurística de redistribución iterativa del factor de carga.....	37
IV.3.2 Algoritmo reducido.....	45
IV.3.3 Heurística combinada.....	51
IV.3.4 Algoritmo genético.....	51
IV.3.4.1 Representación (Definición de individuos)	53
IV.3.4.2 Población.....	54
IV.3.4.3 Evaluación de función (función de aptitud)	55
IV.3.4.4 Mecanismo de selección de padres.....	55
IV.3.4.5 Variación de operadores, recombinación y mutación.....	56
IV.3.4.6 Mecanismo de selección de sobrevivientes (reemplazo).....	58
IV.3.4.7 Criterio de convergencia.....	59
IV.3.4.8 Funcionamiento de algoritmo implementado.....	59
IV.4 Conclusiones.....	60
<b>Capítulo V. Escenario de simulación y discusión de resultados.....</b>	<b>61</b>
V.1 Objetivo del capítulo.....	61
V.2 Parámetros de simulación.....	61
V.3 Caracterización del modelo de propagación.....	65
V.4 Caracterización del modelo de capacidad.....	67
V.5 Resultados de optimización por técnicas heurísticas....	73
V.6 Conclusiones.....	80
<b>Capítulo VI. Escenario de simulación y discusión de resultados.....</b>	<b>82</b>
VI.1 Objetivo del capítulo.....	82
VI.2 Sobre la planificación celular en WCDMA.....	83
VI.3 Sobre el modelado matemático en el cálculo del radio celular.....	84
VI.4 Sobre técnicas heurísticas aplicadas a la optimización del radio celular.....	86
VI.5 Sobre el escenario de simulación y discusión de resultados.....	87
VI.6 Trabajo a futuro.....	89
<b>Referencias.....</b>	<b>91</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Esquema de diferentes radios de celda ejemplificando un escenario con asignación no óptima y óptima de capacidad por servicio (línea punteada corresponde al radio de celda mínimo).	4
2	Organización de la tesis.	6
3	Fases de desarrollo del proceso de planificación celular.	9
4	Proceso de planificación de cobertura y capacidad en WCDMA.	16
5	Gráfica de la relación del margen de interferencia con el factor de carga de WCDMA.	24
6	Algoritmo general de solución al problema de optimización del radio de la celda.	32
7	Distribución de valores al factor de asignación utilizando interpolación lineal.	40
8	Fases de funcionamiento del algoritmo de la heurística de redistribución iterativa del factor de carga.	44
9	Fases de funcionamiento del algoritmo reducido.	50
10	Diagrama de flujo del diseño general de un algoritmo genético.	52
11	Representación de la codificación del cromosoma de un individuo y el conjunto completo de población.	54
12	Esquema del operador de selección por torneo.	56
13	Ejemplo de inversión de componentes de vector por operador de mutación.	57
14	Representación de recombinación de cromosomas por punto aleatorio de cruce elegida para algoritmo genético implementado.	58
15	Radios de celda obtenidos por modelo de propagación para cada uno de los servicios estudiados bajo el comportamiento del margen de interferencia.	66
16	Caracterización de la inversión de la función de tráfico Erlgan B.	68

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
17	Radios de celda obtenidos por modelo de capacidad con tráfico balanceado para cada uno de los servicios estudiados bajo el comportamiento del factor de carga individual.	69
18	Radios de celda obtenidos por modelo de capacidad con tráfico no balanceado para cada uno de los servicios estudiados bajo el comportamiento del factor de carga individual.	70
19	Radios de celda obtenidos por modelo de capacidad con tráfico balanceado para cada uno de los servicios estudiados bajo el comportamiento del factor de carga individual utilizando el ajuste de curvas spline cúbico.	72
20	Radios de celda obtenidos por modelo de capacidad con tráfico no balanceado para cada uno de los servicios estudiados bajo el comportamiento del factor de carga individual utilizando el ajuste de curvas spline cúbico.	73
21	Optimización del radio de la celda para cada uno de los escenarios de simulación y tipos de tráfico.	75
22	Número de usuarios atendidos con todos los servicios dentro de la celda con radio optimizado por cada heurística para cada escenario de simulación.	78
23	Tráfico total ofrecido con radio de la celda optimizado para cada uno de los escenarios de simulación y heurísticas.	79
24	Caudal eficaz total ofrecido para el radio de la celda optimizado por escenario de simulación y heurística.	80

## LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Resumen de restricciones del modelo COST-231 OKumura-Hata.	22
II	Valor de los parámetros utilizados en modelo de cobertura.	62
III	Parámetros generales de en el modelo de propagación.	63
IV	. Parámetros de servicios	63
V	Figuras de tráfico para escenarios de simulación.	64
VI	Radios máximos de celda por modelo de propagación para cada servicio.	66
VII	Escenarios de simulación con mezcla de servicios y tipo de tráfico.	74
VIII	Resultados de optimización del radio de la celda mínimo en Km por las cuatro heurísticas para los ocho escenarios.	75
IX	Valor de la función objetivo de la solución para cada uno de los escenarios de simulación.	76
X	Número de iteraciones necesarias por cada heurística para alcanzar su mejor solución.	76

# Capítulo I

---

## Introducción

---

### I.1. Escenario de aplicación

La investigación en el campo de las comunicaciones móviles es, en la actualidad, uno de los tópicos de mayor relevancia debido a la rápida evolución tecnológica que presentan, además de contar con una demanda creciente año con año alcanzando para el primer cuarto del 2011, cerca de los 6000 millones de abonados a nivel mundial (ChetanSharman, 2011), por lo que prestar el mejor servicio, sostenerlo y contar con la mayor cobertura para ampliar el mercado efectivo, es uno de los problemas principales dentro de la planificación celular en la historia generacional de las redes móviles, donde los compromisos entre cobertura y capacidad de cara a reducir costos de infraestructura y diseño, se vuelven cada vez más presentes con las nuevas tecnologías.

En un principio, el control del área de cobertura para prestar el servicio deseado se encontraba íntimamente relacionado con la potencia y las condiciones de canal, donde el espectro radioeléctrico siendo un recurso limitado, dio la motivación para la creación del concepto celular que permitió repartirlo adecuadamente y además controlar la energía radio eléctrica emitida dentro de un área espacial, llamada célula, por lo que el mismo espectro de frecuencias puede utilizarse tantas veces como sea posible o se planifique sin entrar (Rappaport, 2002). Cada una de estas células daba cobertura a un área relativamente extensa de algunas decenas de kilómetros, donde tanto la estación emisora como la

receptora eran capaces de irradiar una amplia cantidad relativa de potencia y operar en un área dinámica; donde en la mayoría de los casos, la potencia de cobertura podía ser aproximada por una distribución log-normal<sup>1</sup>, cuyo valor promedio depende de la distancia entre la estación emisora y la receptora. (Cátedra & Pérez-Arriaga, 1999).

Conforme fue incrementándose la demanda de servicio y dado el limitado espectro radioeléctrico con el que se cuenta en las comunicaciones inalámbricas, el empleo de tecnologías de multicanalización (inicialmente análogas) tal como FDMA (*Frequency Division Multiple Access*, por sus siglas en inglés) ayudó a atender diferentes llamadas simultáneamente en una misma celda y así prestar servicio a un tráfico creciente mediante la gestión organizada del recurso. Inclusive, el uso de una red celular teselada hexagonal, permite, en principio, atender a un ilimitado número de usuarios si el número de *clusters* (Conjunto de celdas que bajo ciertas restricciones, permiten un factor de reúso de frecuencias) en la teselación puede ser incrementado simplemente reduciendo el tamaño de las mismas. Fue de esta forma que los sistemas de Primera Generación irrumpieron en el ámbito de las comunicaciones. Más adelante, con el aumento de la demanda de servicio, necesidad de movilidad, transferencia de datos y mejora en sus velocidades, nuevos sistemas y otro tipo de tecnologías fueron naciendo, entre ellas las más importantes han sido CDMA (*Code Division Multiple Access*) y TDMA (*Time Division Multiple Access*) donde este último, como parte del sistema GSM, permitió el más importante crecimiento en el préstamo de servicio, reducción de costos y primer paso en la transferencia de información, aún a tasas moderadas.

Por otra parte, CDMA (*Code Division Multiple Access*) de segunda generación para los sistemas cdmaOne e IS-95, colocó las bases para lo que sería la tecnología que reemplazaría al popular sistema GSM (Andrade Reatiga, 2005), en lo que es hasta hoy en día el sistema UMTS (*Universal Mobil*

---

<sup>1</sup> En probabilidad y estadística, una distribución log-normal consiste en una distribución de probabilidad de una variable aleatoria distribuida normalmente, que puede ser modelada como log-normal si puede ser considerada como un producto multiplicativo de muchos pequeños factores independientes.

*Telecommunications System*) con su mejora denominada WCDMA (**Wideband Code Division Multiple Access**) que permite tasas de transmisión de datos de hasta 2Mbps, convirtiéndolo en un sistema que además de estar enfocado a prestar servicio de voz, cuenta con capacidades avanzadas para la transferencia de datos, videoconferencias y navegación por internet, cumpliendo con las especificaciones que la *ITU-R* propuso como requisitos y características para los sistemas de tercera generación en las recomendaciones *IMT-2000*.

## **I.2. Planteamiento del problema**

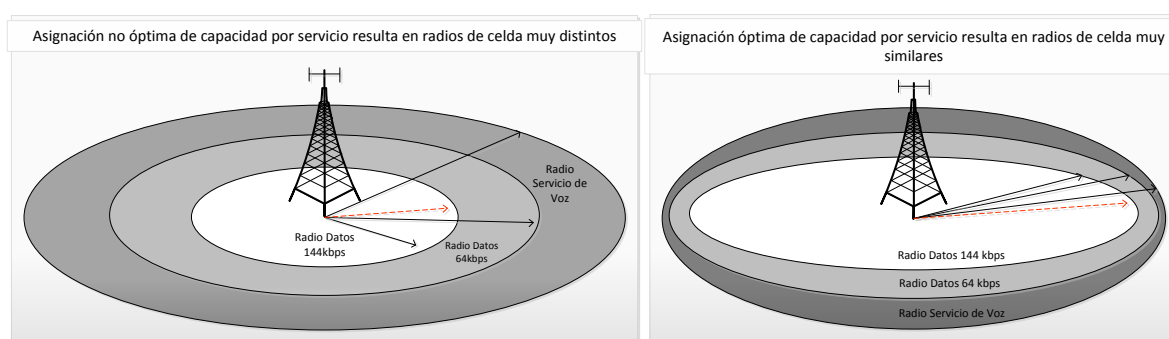
Considerando un escenario de tercera generación WCDMA formado por un conjunto de varios servicios a diferentes tasas de transmisión, donde cada uno cuenta con características y parámetros distintos (densidad de usuarios, tasa de datos, QoS), cada servicio determinará un radio de la celda diferente para el enlace ascendente como para el enlace descendente, tomando en consideración el factor de carga<sup>2</sup> correspondiente al tráfico de la celda debido a la relación entre capacidad y cobertura del sistema. Por lo tanto, el radio de la celda puede ser determinado mediante un modelo de propagación de señal que tome en cuenta el margen de interferencia y las características de canal correspondientes para cada tipo de enlace; además, mediante un modelo de capacidad de tráfico permitido que considere probabilidad de bloqueo y factor de carga para cada servicio y tipo de enlace.

La solución para el radio de la celda recae en encontrar la mejor asignación de valores de factores de carga a cada uno de los servicios del escenario considerado, de tal forma que la diferencia en magnitud del radio de celda calculado entre los servicios sea mínima para cada modelo y tipo de enlace, lo que representa un balance adecuado de los compromisos entre los parámetros de

---

<sup>2</sup> Parámetro que nos entrega información relacionada con la capacidad de tráfico soportada por la celda.

propagación y capacidad como de factor de carga y margen de interferencia, constituyendo así, el radio óptimo de la celda, y además, un paso primordial en la fase de planificación celular. En la Figura 1, ejemplificamos el escenario de una estación base con distintos radios de celda generados por servicios distintos con asignaciones de capacidad no óptimo y la comparamos con la misma estación base con los mismos servicios pero con factores de carga asignados óptimamente, generando radios de celda similares entre sí.



**Figura 1. Esquema de diferentes radios de celda ejemplificando un escenario con asignación no óptima y óptima de capacidad por servicio (línea punteada corresponde al radio de celda mínimo). (Fuente: Portilla-Figueras, Salcedo-Sanz, Hackbarth, López-Ferreras, & Esteve-Asensio, 2009).**

La complejidad de la planificación recae en la solución del problema de asignación de capacidad a cada uno de los servicios, por lo que la optimización del radio de la celda mediante algoritmos de solución para una función multi objetivo que permitan, bajo métricas de eficiencia enfrentar el problema, es una estrategia de solución popularmente utilizada e implementada. Sin embargo, mantener una baja complejidad de los mismos también es importante.

En la literatura, se han reportado investigaciones sobre el uso de algoritmos y simuladores para enfrentar del radio de la celda en WCDMA. Estudios como en (Figueras & Saenz, 2006) implementan algoritmos evolutivos para la estimación del radio de la celda en la solución del problema de capacidad. En (Burley, 2001) se hace una estimación de capacidad e interferencia a partir de estadísticas

considerando el modelo de propagación y cobertura; sin embargo, sólo en una dirección del enlace. En (Laiho, Wacker, & Novosad, 2002) se hace un estudio estadístico adecuado de planificación estimando el tráfico con un grado de interferencia estable mediante simuladores estáticos y dinámicos. Sin embargo, en esos estudios no se hace un análisis multi servicio (con excepción de (Figueras & Saenz, 2006), lo cual puede resultar en modelos de estimación no muy precisos. Por otra parte, los modelos de simulación requieren una amplia cantidad de parámetros.

En (Soto Olivares, 2010) y (Lin, Juang, Lin, Ke, & Wang, 2004) se hace una implementación de algoritmos metaheurísticos genéticos enfocados al problema de emplazamiento de estaciones base *NP-Difícil*, sin resolver apropiadamente la optimización del radio de la celda.

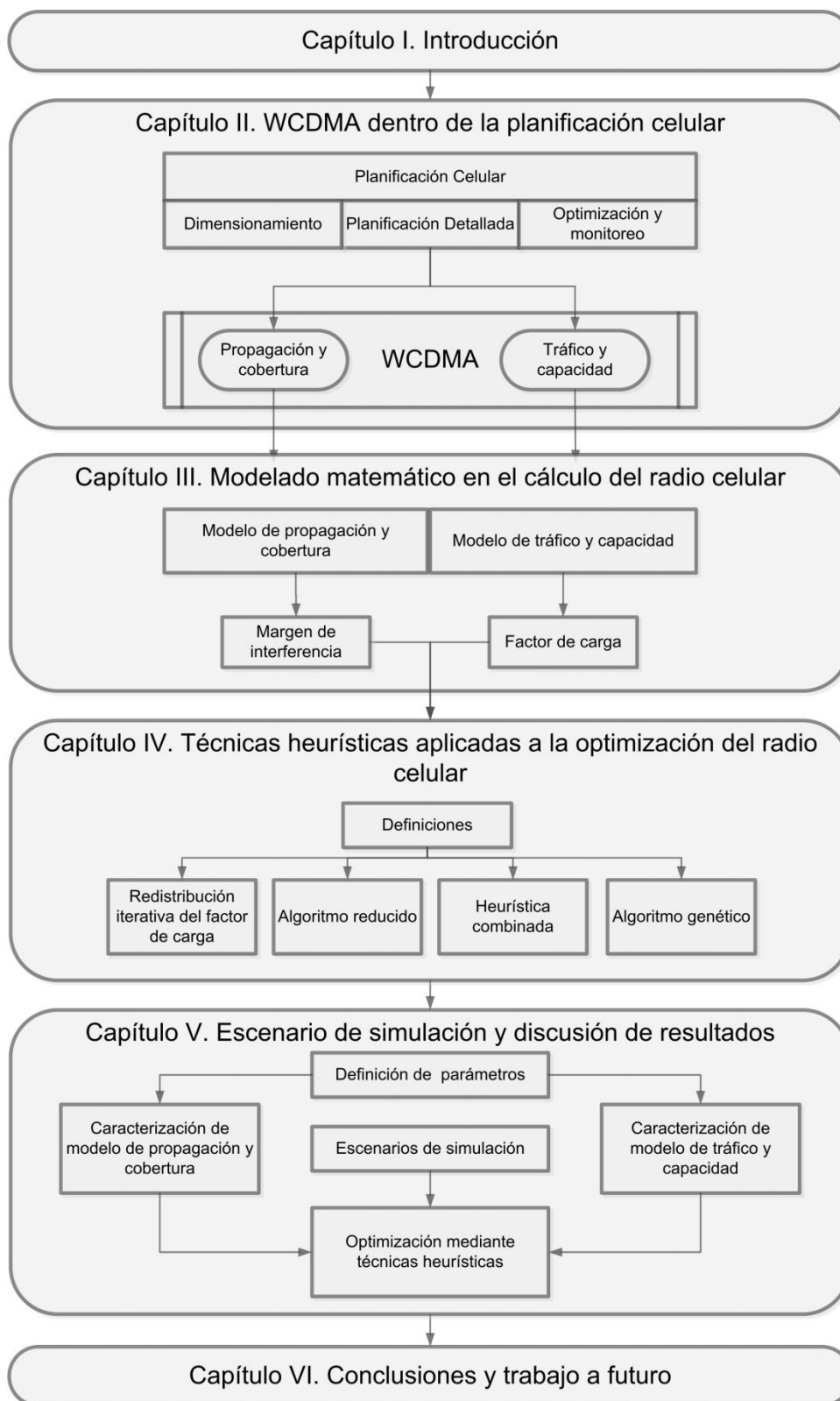
### **I.3. Objetivo de la tesis**

El objetivo de la tesis es emplear técnicas heurísticas como algoritmos de solución para resolver el problema de asignación de carga y cálculo del radio de la celda, considerando las condiciones en un escenario macro celular urbano multiservicios del tipo 3G WCDMA. El resultado del empleo de heurísticas se reflejará en la maximización del radio de la celda y la optimización del factor de carga aplicado en el análisis de tráfico de la red celular

### **I.4. Organización de la tesis**

En la Figura 2, mostramos la organización de esta tesis, donde resaltamos las conexiones entre los conceptos importantes vistos en cada capítulo escrito y las conexiones entre ellos durante su desarrollo.





**Figura 2. Organización de la tesis.**

En el Capítulo II, describiremos el marco de referencia principal donde se ubica este trabajo de investigación, enfocado hacia un escenario WCDMA actual, además de una perspectiva amplia del proceso de planificación celular donde la optimización del radio de la celda es parte importante de su desarrollo.

En el Capítulo III, mostramos en detalle el modelado matemático utilizado para la determinación del radio de la celda en WCDMA. Desarrollamos las expresiones que demuestran los compromisos y la íntima relación entre los modelos de propagación y cobertura mostrando los parámetros que se deben tomar en cuenta en cada uno de los modelos, haciendo énfasis en la influencia del margen de interferencia de la celda y el comportamiento de tráfico, de cara a la asignación del factor de carga individual de cada servicio.

En el Capítulo IV, describimos los conceptos relacionados con los algoritmos de optimización y las técnicas heurísticas. Explicamos el uso del modelado matemático y la forma en que se ejecuta dentro de los algoritmos. Además, hacemos mención del funcionamiento detallado de cada uno de los algoritmos heurísticos implementados en esta tesis y las consideraciones de su diseño e implementación para la búsqueda de solución al problema del radio celular.

En el Capítulo V, definimos los parámetros y características que describen a cada uno de los servicios y lo que los distingue entre sí. Describimos las características de los escenarios de simulación que usamos en esta tesis y cómo los subdividimos en tipo de tráfico considerado y mezcla de servicios. Sometemos los cuatro algoritmos heurísticos a la optimización del radio de la celda para cada uno de los casos. Reportamos y explicamos los resultados más importantes de este trabajo de investigación complementando el capítulo con comentarios de las gráficas obtenidas.

Finalmente, el Capítulo VI presenta las conclusiones del análisis numérico realizado de los resultados, las principales aportaciones al estado del arte en la rama de las telecomunicaciones, una perspectiva general de todo el trabajo de tesis y además, las líneas de trabajo a futuro que expandan la investigación.

## Capítulo II

---

### WCDMA dentro de la planificación celular

---

#### II.1. Objetivo del capítulo

Determinar el radio de la celda no sólo para una red celular de tercera generación, sino para cualquier proyecto celular, requiere de una metodología detallada, minuciosa y cuidadosa que permita mantener sumo control de los costos, tiempos y eficiencia en la totalidad del sistema. Es por eso que este trabajo de tesis forma parte del concepto definido como planificación celular, donde se distinguen y, vaya, se planea la coordinación total de la puesta en marcha de una red celular en un área específica con sus características de población, servicio demandado, tipo de tecnología implementada, geografía y demás parámetros variados que la planificación celular debe tomar en cuenta. Así, conocer la contextualización de la que forma parte la optimización del radio de la celda lleva a una comprensión mucho más adecuada no sólo de la importancia de este trabajo sino además de su potencial dentro de los proyectos de planificación celular. Por esta razón, en este capítulo presentamos los conceptos y descripciones que permiten alcanzar dicho objetivo contextualizando el problema de la optimización del radio de la celda en una red celular basada en WCDMA.

## II.2. El concepto de planificación celular

Llevar a cabo un proyecto de suministro de servicio ha sido desde un principio una problemática con un grado de complejidad tal que ha requerido que se desarrolle bajo planificación ordenada, cuidadosa y detallada que permita reducir los costos de producción, tiempo de desarrollo y de infraestructura, así como los compromisos entre capacidad de servicio y cobertura que maximicen el desempeño y las ganancias generadas de una red celular, distribuyendo lo más posible el servicio en un área geográfica y poblacional típicamente irregular, constantemente en cambio y en crecimiento, cumpliendo con las restricciones y exigencias que las nuevas tecnologías y estándares solicitan.

Así fue como nació el concepto de planificación celular que, aplicada a cualquier sistema inalámbrico, cumple el objetivo primordial de maximizar la cobertura y capacidad del sistema considerando los factores importantes de desempeño y calidad de servicio (Dihan, Kurochin, & Kettani, 2002). Su principal dificultad recae en combinar todos los requerimientos de la planificación en un proceso de optimización exhaustivo y detallado, el cual, típicamente se implementa siguiendo las fases de desarrollo mostradas en la Figura 3



Figura 3. Fases de desarrollo del proceso de planificación celular.

## II.2.1. Dimensionamiento

Representa la primera fase del proceso de planificación del sistema requerido para analizar de forma general la configuración de la red, recopilando información tal como tipo de geografía, características de propagación, elementos y características de las antenas, umbrales de cobertura, características del sistema y de tráfico. Así, estima los requerimientos de equipo basado en los siguientes aspectos del operador (Holma & Toskala, 2004):

- Cobertura:
  - Regiones de cobertura.
  - Información del tipo de área.
  - Condiciones de propagación
- Capacidad:
  - Disponibilidad de espectro.
  - Pronóstico del crecimiento de los suscriptores.
  - Información de la densidad de tráfico.
- Calidad de servicio:
  - Probabilidad de cobertura.
  - Probabilidad de bloqueo.
  - Caudal eficaz del usuario final.

El objetivos de cobertura es garantizar una probabilidad de servicio en un área geográfica de la red haciendo una generalización de las características de propagación necesarias. Por otra parte, los objetivos de capacidad ubican la planificación celular en las condiciones de mercado para garantizar competitividad, además de hacer las consideraciones pertinentes de la probabilidad de aumento de demanda de servicio. Finalmente, los objetivos de calidad están relacionados con los factores de éxito de llamada, tasa de llamada (que no deben exceder los valores acordados por el operador) y la tasa de éxito de asignación de llamada y

*handover*<sup>3</sup> (Mishra, 2007). Finalmente, en su conjunto la fase de dimensionamiento permite recabar información detallada de asignación de capacidad a las celdas individualmente, utilizando herramientas digitales como mapas e información de tráfico. Así, los resultados del dimensionamiento son la entrada a la planificación de cobertura, la cual es el siguiente paso en el proceso de planificación de red.

## II.2.2. Planificación detallada

Requerida para diseñar de forma precisa la red celular considerando los parámetros del sistema, así como los modelos de cobertura y capacidad. En esta fase, la información entregada por el dimensionamiento resulta en datos específicos, precisos y generadores de información adicional para el buen desempeño de la red. Esta fase a su vez, se subdivide típicamente en los siguientes sub procesos:

- Configuración de la planificación
- Planificación de cobertura.
- Planificación de capacidad.
- Planificación de parámetros.

Aunque es claro el objetivo principal de cada uno de los sub procesos, para el caso de WCDMA la planificación de cobertura y capacidad no puede hacerse por separado, como normalmente se hace en tecnologías anteriores, ya que existe un compromiso importante entre ellos debido a las relaciones de interferencia generadas por el tipo de interfaz radio que es WCDMA (esto será tratado más en detalle en el siguiente capítulo). Por esta razón es que la planificación de

---

<sup>3</sup> Se denomina *handover* (también *Handoff*) al sistema utilizado en comunicaciones móviles celulares con el objetivo de transferir el servicio de una estación base a otra cuando la calidad del enlace es insuficiente garantizando el servicio mientras se traslada sobre el área de cobertura.

cobertura conlleva factores de carga y tráfico dentro de su modelado (Soto Olivares, 2010) y poder estimar así adecuadamente, bajo las restricciones de interferencia, el radio de cada una de las estaciones base de la red mientras se balancean las potencias de transmisión entre el transmisor y el receptor en la propagación radio. A lo anterior hay que agregar en el presupuesto de enlace (ganancia de antena, pérdidas de cables, sensibilidad del receptor y márgenes de potencia) y hacer consideraciones de densidad y tráfico irregular para cada una de las celdas de la red.

### **II.2.3. Optimización y monitorización**

Mediante la estimación, medición y verificación de tráfico, cobertura y capacidad, se hacen los ajustes necesarios a los parámetros de planificación que permitan hacer uso eficiente de los recursos del sistema. Típicamente, la red celular es verificada utilizando herramientas de medición de campo, mientras que la monitorización de la red es continuamente realizada durante la operación comercial del sistema, recolectando los indicadores clave de desempeño relacionados con las tasas de éxito y bloqueo de llamada. Otra forma, es el monitoreo mediante mensajes de señalización entre las estaciones base y el dispositivo móvil que indiquen el estado de la interfaz radio, o bien haciendo uso de herramientas de análisis de calidad de servicio (Niemelä, 2006). En conclusión, el proceso de optimización incluye tanto niveles de medición de la red como pruebas de campo, en orden para análisis de localización de problemas o, también, indicar donde son más potenciales.

En los sistemas de tercera generación el esquema clásico provocó a los operadores celulares a olvidar la filosofía "primero cobertura y después capacidad", implementada típicamente en las tecnologías anteriores de primera y segunda generación donde no existía una íntima relación entre estos dos parámetros importantes. Pero antes de entrar en el análisis específico de la

planificación celular enfocada hacia WCDMA, es pertinente comprender el funcionamiento de esta interfaz radio de tercera generación y sus principales diferencias con las tecnologías anteriores.

### **II.3. Análisis de la interfaz radio WCDMA**

Los sistemas de tercera generación fueron diseñados con propósitos multimedios, es decir, para que la comunicación entre persona a persona pueda ser mejorada mediante imágenes y video de alta calidad, así como tener acceso a información con altas tasas de transmisión. La tecnología WCDMA fue diseñada y adoptado como una interfaz inalámbrica que cumpliera con las especificaciones de una tecnología de tercera generación, y funcionar así dentro del sistema UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). La Unión Internacional de Telecomunicaciones (International Telecommunication Union, ITU) bajo la iniciativa IMT-2000 definió los sistemas de tercera generación como capaces de soportar niveles de tasas de transmisión que van desde los 144 Kbps hasta 2 Mbps

Su estrategia de implementación debe ser cuidadosamente planificada ya que UMTS es un sistema completamente distinto a los demás. Opera típicamente en las bandas de frecuencias de 2100 MHz, superior a los 900 MHz y 1900 MHz utilizados en GSM y sistemas TDMA. También, dadas las altas tasas de transmisión de datos para UMTS se requiere mejor calidad de señal y relación energía de bit contra interferencia. Las distintas frecuencias de operación más las altas tasas de transmisión implica que la propagación radio no será equivalente a los sistemas anteriores implementados. Como resultado, las áreas de cobertura no son necesariamente válidas en UMTS (Dihan *et al.*, 2002).

WCDMA funciona bajo el procedimiento de acceso al canal radio basado en la tecnología CDMA con ensanchamiento de secuencia directa (*DS-CDMA, Direct Sequence-Code Division Multiple Access*), utilizando portadoras de 5 MHz de



ancho de banda, en la que todos los usuarios comparten la misma portadora utilizando distintos códigos pseudoaleatorios cuasi ortogonales que dan lugar a los 3.84 Mcps (Holma & Toskala, 2004). Por lo tanto, dado que todos los usuarios utilizan la misma frecuencia de operación<sup>4</sup> y ancho de banda, existe un nivel importante de interferencia entre los usuarios que considerar, el cual se encuentra íntimamente relacionado con la función de densidad de usuarios y la demanda de servicio. Esto requiere que la planificación en WCDMA de cobertura y capacidad sean realizadas al mismo tiempo, a diferencia de sistemas como GSM donde son realizadas por separado (Hamad-Ameen, 2008).

Para esto, se toma parte del parámetro de *margen de interferencia*, el cual determina el grado de interferencia recibida y permitida para cada usuario. Mediante los parámetros de calidad de servicio, tasas de transmisión, enlace y antenas, además de los datos considerados en la fase de dimensionamiento, es posible realizar las especificaciones del modelo de propagación que determinarán el área de cobertura de la celda para el servicio en cuestión. Esto lleva a considerar el modelo de tráfico del sistema con lo que se realiza la estimación de capacidad con el cálculo del *factor de carga* de la celda. Este factor permite realizar ajustes en el margen de interferencia y, por lo tanto, en todo el modelo de planificación celular.

En esta tecnología de secuencia directa, la señal modulada (con técnica BPSK, *Binary Phase Shift Keying*, en el enlace ascendente y QPSK, *Quadrature Phase Shift Keying*, para el enlace descendente) de datos es modulada una segunda vez (fase de modulación digital) utilizando una señal extendida (secuencia pseudoaleatorio distinta para cada usuario), por lo que dado que la información es transmitida en un ancho de banda superior, el sistema se vuelve tolerante ante las señales interferentes de banda estrecha. La técnica de espectro ensanchado permite un uso eficiente del espectro además de que múltiples usuarios hagan uso del sistema simultáneamente (en la misma banda de frecuencia). Cuando el receptor recibe la suma de distintas señales de usuarios,

---

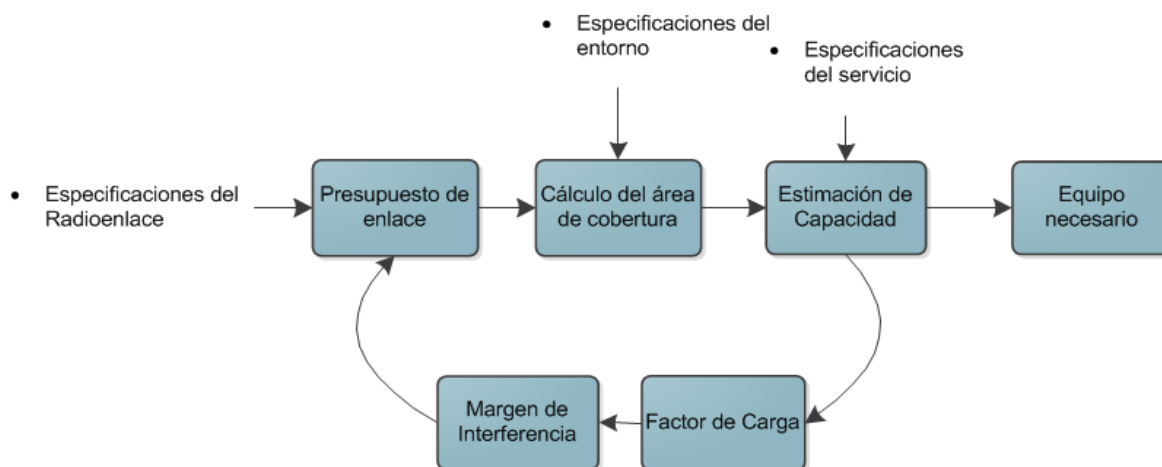
<sup>4</sup> Mega chips por segundo. Un chip es un pulso de información en un código DS-SS.

ésta es multiplicada por el código de ensanchado con lo que el efecto de otras señales, excepto la del usuario en interés, es removido. La señal de salida generada es integrada periódicamente por la duración de bit y la señal original es muestreada al final del período. El proceso es el mismo en el enlace descendente pero en sentido opuesto para la decodificación, aunque aun así el grado de procesado es considerablemente más compleja en la recepción.

El enlace de transmisión en WCDMA debe considerar el grado de interferencia del sistema, el cual se encuentra altamente relacionado con el número de usuarios de la celda en cuestión. La interferencia no sólo limita la capacidad del sistema, sino también la cobertura por propagación, ya que el ruido total se incrementa con el número de usuarios activos.

## **II.4. Planificación celular de WCDMA**

Las predicciones de propagación para WCDMA requieren las mismas fases de planificación que GSM. Como se muestra en la Figura 4. Proceso de planificación de cobertura y capacidad en WCDMA el primer paso en la planificación de cobertura se realiza sobre la estación base donde el presupuesto de enlace debe ser definido. Además, observamos los pronósticos de tráfico que afectan la cobertura y a su vez el factor de carga de la celda que determina el número de usuarios totales permitidos bajo umbrales de interferencia, que si no llegasen a ser los adecuados, deberán realizarse los ajustes pertinentes a los parámetros de la planificación y garantizar así un desempeño estable en la puesta en marcha (Dihan *et al.*, 2002).



**Figura 4. Proceso de planificación de cobertura y capacidad en WCDMA.**

La configuración final consiste en la planificación de la topología de la red (que cubre simultáneamente la planificación de capacidad y cobertura), la cual puede requerir distintos niveles de simulación de cara a lograr un buen desempeño. Los resultados de las simulaciones, finalmente entregan un estimado de la localización de las estaciones base y un estimado del caudal eficaz por celda.

Después de la planificación de la topología, se prosigue a determinar los códigos y los parámetros de ensanchado que son necesarios antes de la puesta en marcha de la red. Siendo el núcleo principal de funcionamiento de la tecnología WCDMA, la planificación de los códigos de ensanchado y su asignación a diferentes celdas permite separarlas durante el enlace descendente<sup>5</sup>. Dichos parámetros pueden incluir señales de control de potencia, *handover* y de señalización (modos de conexión) (Niemelä, 2006).

Como última fase, el proceso de verificación debe considerar la monitorización de las condiciones de tráfico en el sistema WCDMA, ya que cualquier variación influye directamente en toda la calidad de la red. Dicha monitorización incluye además de una constante observación del comportamiento

<sup>5</sup> La planificación de codificación para el enlace ascendente es más sencilla y rápida debido a la poca demanda de los mismos.

del tráfico, la desviación del mismo, la mezcla de tráfico, el porcentaje de *soft handover* (que corresponde a otro aspecto importante de WCDMA influyente en la capacidad), potencia de transmisión y recepción, llamadas caídas. interferencia, *handover* por celda, *handovers* inter-sistemas, caudal eficaz, tasa de error de bit y tasa de error de trama.

## **II.5. Conclusiones**

En este capítulo, se ha establecido el marco teórico principal que respalda este trabajo de tesis, contextualizando la situación formal de la planificación celular y la importancia de la estimación de cobertura y capacidad en las redes de tercera generación, así como la íntima influencia mutua que existe entre ellas. Encontramos como el proceso de planificación puede ser sumamente complejo y exhaustivo a causa de querer cumplir con los vastos requerimientos del operados y de los estándares actuales. Por otra parte, Describimos en detalle las características principales del funcionamiento de WCDMA, donde se muestra el gran cambio en la interfaz radio con respecto a tecnologías anteriores como TDMA y FDMA. Finalmente, colocamos a WCDMA dentro del concepto de planificación celular aclarando los detalles y aspectos importantes de ajuste.

En el siguiente capítulo mostraremos los detalles específicos enfocados hacia el problema de cobertura y capacidad que demuestren los compromisos y relaciones pertinentes en los modelos de propagación y capacidad y así llegar a expresiones matemáticas necesarias para responder a nuestro enfoque de cobertura hacia la optimización del radio de la celda.

## Capítulo III

---

### Modelado matemático en el cálculo del radio celular

---

#### III.1. Objetivo del capítulo

En este capítulo mostramos el modelado matemático necesario para determinar las relaciones entre los parámetros importantes de la planificación celular, como son las características de propagación y el modelo de pérdidas adecuado a un escenario típico macrocelular WCDMA. Entre otras, como son las consideraciones de interferencia y estabilidad requeridas debido las características de tráfico únicas de las tecnologías de tercera generación.

#### III.2. Proceso de modelado del radio de la celda

El cálculo del radio celular en los sistemas móviles celulares se sustenta principalmente en dos factores : cálculo de cobertura y cálculo de capacidad. Mientras que en los sistemas de segunda generación como GSM, estos parámetros dependen directamente de la propagación radio y de las capacidades del equipo de cada estación base instalada; por lo que, para aumentar la capacidad del sistema basta con aumentar las capacidades del equipo. Sin embargo, en los sistemas de tercera generación, basados en acceso múltiple por división de código, se encuentran sumamente limitados en interferencia que a su vez limita la cobertura. Esto se debe a que en los sistemas de tercera generación

los equipos celulares ahora comparten el mismo espectro, a diferencia de los sistemas basados en TDMA donde usualmente se asignan canales de comunicación por usuario. Por lo tanto, el cálculo de la cobertura y capacidad en cada una de las estaciones base basadas en WCDMA, es notablemente más complicada que en los sistemas de segunda generación basadas en TDMA como GSM.

Es conveniente en este capítulo, por lo mencionado anteriormente, mostrar el modelado del radio celular pertinente al modelo de propagación y el modelo de capacidad de WCDMA.

### **III.3. Modelo de propagación en WCDMA**

El estudio de cobertura máxima en la tecnología WCDMA de cara a determinar el área geográfica donde la estación base dentro de la red presta servicio, implica dos pasos importantes (Holma & Toskala, 2004). El primero es calcular la máxima pérdida de propagación permitida en la celda, definida como  $L_{pathloss}$ ; y el segundo es utilizar un método de propagación empírico para calcular el radio de la celda.

El primer paso consiste en determinar la propagación radio de la señal en el espacio libre, de tal forma que tome en consideración los niveles de potencia aceptables en el receptor, las potencias máximas de transmisión de las antenas y las máximas pérdidas por propagación permitidas. Este análisis debe realizarse tanto para el enlace ascendente (Receptor - Transmisor) como para el descendente (Transmisor - Receptor) donde el único parámetro igual para ambos son las pérdidas por propagación, al experimentar las mismas pérdidas en ambos enlaces. En otras palabras, se deben tomar en consideración los parámetros de la planificación de cobertura.

Basta con utilizar un presupuesto de enlace para determinar las pérdidas por propagación  $L_p$  dadas por:

$$P_{Tx} + \sum G - \sum L - \sum M - Lp = R_s \quad (1)$$

donde  $P_{Tx}$  es la potencia del transmisor,  $\sum G$  es la suma de todas las ganancias de componentes, transmisores de antena, receptores de antena y ganancia de *soft handover*<sup>6</sup>,  $\sum L$  es la suma de todas las pérdidas por componentes y pérdidas estructurales,  $R_s$  es la sensibilidad del receptor:

$$R_s = \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{Vb_i}{W} \cdot \frac{1}{1-\eta} \cdot N_f k_0 T_0 W \quad (2)$$

la cual incluye la relación energía de bit - Interferencia  $E_b/N_0$  requerido, ruido térmico  $T_0$ , constante de Boltzman  $k_0$ , figura de ruido del receptor  $N_f$ , y ganancia de procesamiento con los parámetros  $Vb_i$  como tasa de datos del servicio,  $W$  como tasa de chip del sistema y  $\eta$  el número de usuarios expresado como factor de carga donde su valor unitario corresponde a la máxima carga de la celda. Por último,  $\sum M$  es la suma de los diferentes márgenes que necesitamos tomar en consideración, tal como margen de desvanecimiento rápido, margen de desvanecimiento log-normal, y el margen de interferencia, el cual es un parámetro muy relevante en el estudio de la propagación radio, ya que expresa la máxima interferencia permitida en el sistema debida a los mismo usuarios; por lo que, indirectamente limita el número máximo de mismos. Así, son estos últimos parámetros que constituyen una fuerte relación con las condiciones de canal. Por ejemplo, hemos de mencionar que un canal con desvanecimiento rápido refiere a un cambio rápido en la respuesta al impulso del canal dentro de la duración del

---

<sup>6</sup> El término *soft hand over*, de forma similar a *hand over*, se refiere al caso en el que el móvil se encuentra en el área de cobertura celular superpuesta de dos sectores adyacentes de una estación base, donde las dos señales son recibidas en el móvil por medio del procesamiento Rake, por lo que los dos lazos de control de potencia están activos, agregando cierta ganancia de potencia al enlace (Holma & Toskala, 2004)

símbolo, por lo que las amplitudes, fases y tiempo de retardo de cualquiera de las componentes de multi-trayectoria varían más rápido que la tasa de cambio de la señal transmitida (Rappaport, 2002). Este margen es sumamente importante para usuarios desplazándose a bajas velocidades donde un rápido control de potencia es necesario para compensar el desvanecimiento (Holma & Toskala, 2004). Por otra parte, el sombreado en el canal de transmisión es causado por los edificios, colinas, etc. que forman el escenario urbano y es modelado como un desvanecimiento log-normal.

Como segundo paso en el estudio de la cobertura en WCDMA, se hace uso de un método empírico para el cálculo de la pérdida por propagación. La aproximación empírica está basada en ajuste de curvas o expresiones analíticas que recrean un conjunto de información obtenida a base de mediciones reales, lo que toma en cuenta todos los factores de la propagación radio, conocidos y desconocidos, que actúan en el campo de medición. Sin embargo, su validez sólo se ajusta a aquellos escenarios similares a los que generaron la información de medición, inclusive dentro de las frecuencias de transmisión particulares (Rappaport, 2002).

El modelo COST-231 Okumura-Hata, que además de ser el modelo con más aplicaciones generales en redes móviles y áreas urbanas, cumple con las características necesarias que lo adecúan al escenario WCDMA macro celular urbano. Es aplicable para frecuencias en el intervalo 1500 a 1920 MHz (con posibilidad de extrapolación a 3000MHz) y distancias de propagación que van de 1km a 100km. Además, puede ser utilizado para antenas con alturas que van de los 30m a los 100m (Rappaport, 2002).

Inicialmente, el modelo Okumura está basado en mediciones sobre un área urbana sin grandes variaciones, sin embargo, presenta muy buenos resultados en áreas urbanas y suburbanas. Mientras que el modelo COST-231 Okumura-Hata consiste en una mejora del modelo inicial y una extensión para ciudades medianas, áreas sub urbanas y centros metropolitanos.



**Tabla I. Resumen de restricciones del modelo COST-231 Okumura-Hata.**

Frecuencia de operación $f$	1500 MHz a 2000 MHz (Ext. 3000 MHz)
Altura de estación base $h_{BTS}$	30 m a 200 m
Altura del dispositivo móvil $h_m$	1 m a 10 m
Radio de cobertura $R^P$	1 km a 20 km

La expresión matemática de la extensión del modelo Okumura es la siguiente:

$$L_p = 46.3 + 33.9 \cdot \text{Log}(f) - 13.82 \cdot \text{Log}(h_{BTS}) - a(h_m) + (44.95 - 6.55 \cdot \text{Log}(h_{BTS})) \cdot \text{Log}(R^P) + C_m \quad (3)$$

donde  $f$  es la frecuencia en MHz,  $h_{BTS}$  es la altura del móvil del usuario en metros, y  $R^P$  es el radio de la celda por propagación en km. El modelo cuenta con el parámetro  $a(h_m)$  que es una corrección de ganancia por altura de la antena dependiente del ambiente, el cuál para nuestro estudio será:

$$a(h_m) = (1.1 \cdot \text{Log}(f) - 0.7) \cdot h_m - (1.56 \cdot \text{Log}(f) - 0.8) \quad (4)$$

Por otra parte, el parámetro  $C_m$  está definido en las especificaciones COST-231 (Rappaport, 2002), para ajuste del tamaño de ciudades de la siguiente forma:

$$C_m = \begin{cases} 0dB & \text{Para ciudades de tamaño medio y áreas suburbanas} \\ 3dB & \text{Para centros metropolitanos} \end{cases}$$

Tomando en cuenta estos dos pasos, es posible calcular el radio de la celda para un conjunto de  $S$  servicios, tanto para el enlace ascendente como para el

descendente. Resolviendo en (1) para  $Lp$  y en (3) para el radio de la celda por propagación para un servicio  $i$ ,  $R_i^P$ , tenemos:

$$Lp = R_s - P_{Tx} - \sum G + \sum L + \sum M \quad (5)$$

$$R_i^P = \frac{Lp - 46.3 - 33.9 \cdot \text{Log}(f) + 13.82 \cdot \text{Log}(h_{BTS}) + a(h_m) - C_m}{(44.95 - 6.55 \cdot \text{Log}(h_{BTS}))} \quad (6)$$

De esta forma, podemos calcular en base a los parámetros específicos para cada servicio y características del escenario, dos vectores que contengan los distintos radios de celda para cada enlace (ascendente y descendente) y servicio mediante el modelo de propagación.

$$\begin{aligned} R_{DL}^P &= [R_{DLi}^P; i = 1, \dots, S] \\ R_{UL}^P &= [R_{ULi}^P; i = 1, \dots, S] \end{aligned} \quad (7)$$

Los modelos empíricos de cobertura proveen una buena predicción del valor medio de las pérdidas por propagación y del tamaño aproximado de la celda deseada que puede tolerar las pérdidas máximas del presupuesto de enlace en un área circular de celda.

Recordando que WCDMA es un sistema limitado en interferencia, el *Margen de interferencia* considerado en el presupuesto de enlace, cuenta con una relación que podemos observar en la ecuación (8), que implica un compromiso exponencial con la capacidad del sistema en términos del factor de carga de la celda  $\eta$ , correspondiendo un valor unitario al encontrar la celda con su máxima capacidad de usuarios activos (Figura 5) y que, además, presenta un polo de inestabilidad del sistema, lo que exige tener sumo control sobre tráfico dentro de la celda, o bien, establecer límites de interferencia y capacidad permitidas.

$$MI = -10 \cdot \text{Log}(1 - \eta) \quad (8)$$

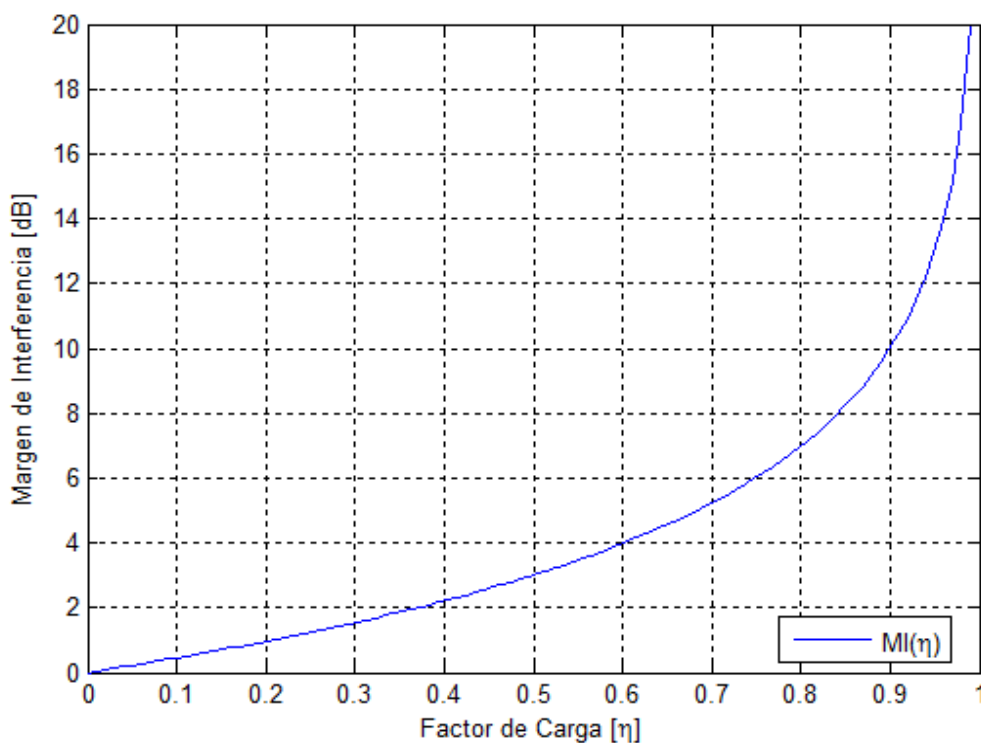


Figura 5. Gráfica de la relación del margen de interferencia con el factor de carga de WCDMA

Se puede observar que cuando deseamos aumentar la carga de usuarios asignada a una celda en particular, a la vez incrementamos logarítmicamente el nivel de interferencia. Lo anterior se ve reflejado en un aumento considerable a la restricción por pérdidas por propagación en el presupuesto de enlace debido al crecimiento del margen de interferencia determinado en el presupuesto de enlace, limitando así la cobertura.

### III.4. Modelo de capacidad en WCDMA

Analizando el modelo de propagación demostramos la profunda y crítica relación de la interferencia con el valor de capacidad del sistema; por lo tanto,

realizar un modelo adecuado en la estimación del radio de la celda, considerando las características que determinan el tráfico, calidad de servicio e interferencia para los dos tipos de enlace, permite a la planificación celular controlar los compromisos generados de capacidad y propagación radio en WCDMA.

Como observamos anteriormente, el factor de carga de la celda es un parámetro sumamente importante dentro de la determinación de la cobertura y a su vez limitante de capacidad para evitar las restricciones de estabilidad del sistema; por lo que es necesario contar con su análisis adecuado que nos lleve a expresiones cerradas de cara a determinar el radio de la celda dentro de los parámetros de tráfico y capacidad de WCDMA.

Aunque en la fase de operación de WCDMA no existe como tal una asignación de capacidad en la fase de dimensionamiento, a fin de calcular el radio celular se divide el total de la capacidad entre los diversos servicios. Sin embargo, contrariamente a las redes fijas y redes móviles anteriores, la capacidad conocida como caudal eficaz o *throughput*, depende en gran medida del servicio dominante, así como de la carga de las células vecinas, con lo cual es difícil realizar este reparto. Sin embargo, lo que permanece preciso es la carga total de la célula, fijada usualmente entre el 50 al 75% para los límites de interferencia permitidos, por lo tanto podemos determinar el factor de carga de reparto de la total para cada servicio.

Siguiendo las recomendaciones de la literatura, para el caso del enlace ascendente comenzamos con la eficiencia espectral teórica de una celda en WCDMA, que puede ser calculada de la ecuación de carga de la celda. A partir de la definición de la relación Energía de bit - Densidad espectral de Ruido, la cual se define como el producto de la ganancia de procesamiento por la relación de potencia del usuario  $j$  entre potencia total recibida, excluyendo la propia, tenemos:

$$(E_b/N_0)_j = GP \cdot \frac{P_j}{P_T} = \frac{W}{v_j \cdot Vb_i} \cdot \frac{P_j}{I_T - P_j} \quad (9)$$

donde  $P_j$  es la señal de potencia recibida del usuario<sup>7</sup>  $j$ ,  $v_j$  es el factor de actividad del usuario  $j$ ,  $W$  es la tasa de chip,  $R_i$  es la tasa de datos del servicio  $i$ , e  $I_T$  es la potencia total recibida de banda ancha incluyendo la potencia de ruido térmico en la estación base. Resolviendo para  $P_j$  se obtiene:

$$P_j = \frac{1}{1 + \frac{(E_b/N_0)_j \cdot Vb_i \cdot v_j}{W}} I_T \quad (10)$$

de donde el factor de carga aportado por el usuario  $j$  se define como:

$$L_j = \frac{1}{1 + \frac{(E_b/N_0)_j \cdot Vb_i \cdot v_j}{W}} \quad (11)$$

por lo que para un número  $N$  de usuarios en la celda, el factor de carga total  $\eta_{UL}$  para el enlace ascendente se puede obtener simplemente como la sumatoria de los  $N$  factores de carga aportados por cada usuario:

$$\eta_{ULi} = \sum_{j=1}^N L_j \quad (12)$$

Adicionalmente al factor de carga, la interferencia de otras celdas debe tomarse en consideración mediante la relación de interferencia intracelda e intercelda  $\bar{f}$ , la cual para celdas con antenas omnidireccionales típicamente tiene un valor del 55% de interferencia, mientras que para antenas trisectoriales es del

---

<sup>7</sup> Los sistemas WCDMA poseen un control dinámico de potencia complejo en el enlace ascendente que permite suponer una potencia constante recibida para cada usuario (Gilhouse, Jacobs, Padovani, Viterbi, & Weaver, 1991).

65% (Holma & Toskala, 2004). Por lo tanto, el factor de carga para el enlace ascendente puede ser escrito como:

$$\eta_{ULi} = (1 + \bar{f}) \cdot \sum_{j=1}^N L_j = (1 + \bar{f}) \cdot \sum_{j=1}^N \frac{1}{1 + \frac{W}{(E_b/N_0)_j \cdot Vb_i \cdot v_j}} \quad (13)$$

El análisis para el enlace descendente del factor de carga es muy similar al ascendente, aunque debe tomar en consideración el factor de ortogonalidad de canal para el enlace descendente que permite, la diferenciación entre usuarios por los códigos cuasi-ortogonales utilizados.

$$\eta_{DLi} = \sum_{j=1}^N v_j \cdot \frac{(E_b/N_0)_j}{W/Vb_i} \cdot [(1 - \bar{\phi}) + \bar{f}] \quad (14)$$

Los enlaces ascendente y descendente presentan características similares en el sentido de que al aproximarse a la unidad el factor de carga de ambos, el sistema se vuelve inestable, y el margen de interferencia se va a infinito. Por lo tanto, es importante establecer una condición restrictiva para la sumatoria del factor de carga que nos permita mantener controlada la capacidad para cada enlace por debajo de margen de inestabilidad del sistema (Figura 5). Dicha restricción se establece como:

$$\eta_{DLi} = \sum_{j=1}^N L_j < 1 \quad (15)$$

Si consideramos un escenario de S servicios, la suma de factores de carga aportados por cada servicio a cada tipo de enlace se define como:

$$\begin{aligned}\eta_{DL} &= \sum_{i=1}^S \eta_{DLi} < 1 \\ \eta_{UL} &= \sum_{i=1}^S \eta_{ULi} < 1\end{aligned}\tag{16}$$

Sin embargo, el análisis de las condiciones de capacidad para la planificación de WCDMA, no terminan sino hasta un estudio que contenga las restricciones de probabilidad de bloqueo de llamadas que permitan determinar la máxima densidad de tráfico soportado por la celda. La unidad de tráfico Erlang ampliamente utilizada en los sistemas de segunda generación orientados a conexión, no puede ser utilizada en su modelo de capacidad Erlang B debido a ser un sistema limitado por interferencia, es decir, con bloqueo suave; por lo tanto, la fórmula de Erlang B daría resultados imprecisos al respecto.

Mientras menos interferencia exista de las celdas vecinas, más canales de comunicación estarán disponibles en la celda en cuestión. Para altas tasas de transmisión en tiempo real, la carga promedio debe ser baja para garantizar baja probabilidad de bloqueo, lo que también permite baja interferencia en las celdas vecinas aumentando la capacidad suavemente (capacidad suave o *soft capacity*).

La capacidad suave del enlace ascendente puede ser aproximada basada en la interferencia total en la estación base. Esta interferencia incluye la interferencia intercelda e intracelda, por lo que con este factor multiplicado a la fórmula de Erlang B permite estimar la capacidad suave. De esta forma, la función inversa de la fórmula de Erlang B considerando el factor de interferencia intercelda - intracelda de WCDMA, permite estimar la demanda de tráfico ofrecido (Jagerman, 1974).

$$\frac{A_i}{1+f} = \text{ErlangB}^{-1}\left(Pb_i, Nac_i \cdot (1+\bar{f})\right)\tag{17}$$

donde  $A_i$  consiste en la demanda de tráfico ofrecido en Erlangs para el servicio  $i$ , y los términos de entrada para el algoritmo son probabilidad de bloqueo del servicio  $Pb_i$  que expresa la calidad de servicio permitida por el mismo, número de conexiones activas  $Nac_{DLi}$  multiplicado también por la característica de bloqueo suave de WCDMA. El número de conexiones activas puede ser determinado a partir de la relación de carga total del servicio  $i$  entre el factor de carga aportado por usuario al servicio, debido a que consideramos a aquellas conexiones activas como las que aportan interferencia al sistema:

$$Nac_i = \frac{\eta_{DLi}}{L_j} \quad (18)$$

Conociendo la demanda de tráfico ofrecido, suponiendo una transmisión de paquetes en Erlangs (Rappaport, 2002) es posible determinar el número de usuarios en la celda para el servicio  $i$ , a partir de la definición de caudal eficaz normalizado

$$M_i^{users} = \frac{A_i}{\alpha_i \cdot ts_i} \quad (19)$$

donde  $\alpha_i$  es la tasa de conexión de servicio como factor de actividad del mismo, y  $ts_i$  el tiempo medio de servicio. Finalmente, el radio de la celda es posible calcularlo a partir de la densidad de usuarios  $\rho_i$  del servicio  $i$ , por el número de sectores  $N_{Sectores}$  según el tipo de antena que determinen a la celda, y el número total de usuarios de la celda para el servicio  $i$  considerando una capacidad de tráfico estimado en una aproximación de radio circular:



$$R_i^t = \sqrt{\frac{M_i^{users} \cdot N_{Sectores}}{\pi \cdot \rho_i}} \quad (20)$$

Igualmente que para el radio de celda calculado por propagación, con el modelo de capacidad y tráfico de WCDMA, el radio de la celda para cada servicio y tipo de enlace, permite obtener dos vectores de radio de celda calculados por modelo de capacidad y tráfico para un conjunto de  $S$  servicios:

$$\begin{aligned} R_{UL}^t &= [R_{ULi}^t; i=1, \dots, S] \\ R_{DL}^t &= [R_{DLi}^t; i=1, \dots, S] \end{aligned} \quad (21)$$

El radio de la celda resultará de la solución a las funciones de minimización para cada tipo de modelo que extraiga el radio menor de entre el conjunto obtenido de tal forma que sea el más restringido para todos los servicios. Además, de entre los dos radios de cada modelo, se emplea una función adicional de minimización con la misma restricción, por lo que el radio de celda final  $R_{cell}$  es:

$$\begin{aligned} R^t &= \min [R_{UL}^t, R_{DL}^t] \\ R^P &= \min [R_{UL}^P, R_{DL}^P] \\ R_{Cell} &= \min [R_T^P, R_T^t] \end{aligned} \quad (22)$$

### III.5. Esquema de solución al problema de optimización

El modelado del sistema ha presentado dos problemas en la determinación del radio de la celda: mantener el margen de interferencia adecuado para una planificación celular eficiente y una asignación adecuada de los factores de carga para cada uno de los servicios en cada tipo de enlace.

Una vez establecidos los parámetros iniciales del sistema, asignaremos una estimación inicial de factores de carga no óptimos al modelo de capacidad y tráfico mediante un vector de asignación, dada por:

$$\eta_{DL} = [\eta_{DL1}, \dots, \eta_{DLS}] \quad (23)$$

lo que nos permitirá obtener el radio de la celda para un servicio. La asignación debe ser tal que la diferencia entre los radios de celda obtenidos por el modelo de capacidad y tráfico debe estar por debajo de una restricción de diferencia mínima. Una vez logrado esto, se elige mediante una función de minimización el radio menor por ser el menos restrictivo para los servicios. Éste se compara con el radio de celda calculado por propagación para cada servicio, y el de menor valor es elegido debido a que cumple con las restricciones de todos los servicios. Una vez más, se debe mantener el radio de celda calculado por propagación y por capacidad y tráfico con una diferencia mínima. Al alcanzar este objetivo, se elige el menor de ambos (Figura 6).

Definimos nuestra función objetivo como la función que determina la calidad o aptitud de la solución de radios de celda para los  $S$  servicios generada por la heurística que encuentre el mejor valor del vector de factores de carga  $\eta$  (se verá con mayor detalle en el siguiente capítulo)

$$\begin{aligned} \min f_{aptitud}(\eta) \\ f_{aptitud} &\leq \varepsilon \\ \eta &= [\eta_{DL} < 1, \eta_{UL} < 1] \\ \eta &\in \Omega \in \mathbb{R} \end{aligned} \quad (24)$$

Donde  $\Omega$  corresponde al espacio de búsqueda generado por el modelo de propagación y por el modelo de capacidad, sujetos a nuestra variable de control

de factor de carga y parámetros de simulación;  $\varepsilon$  será nuestro valor máximo permitido a nuestra función objetivo o de calidad de la solución obtenida.

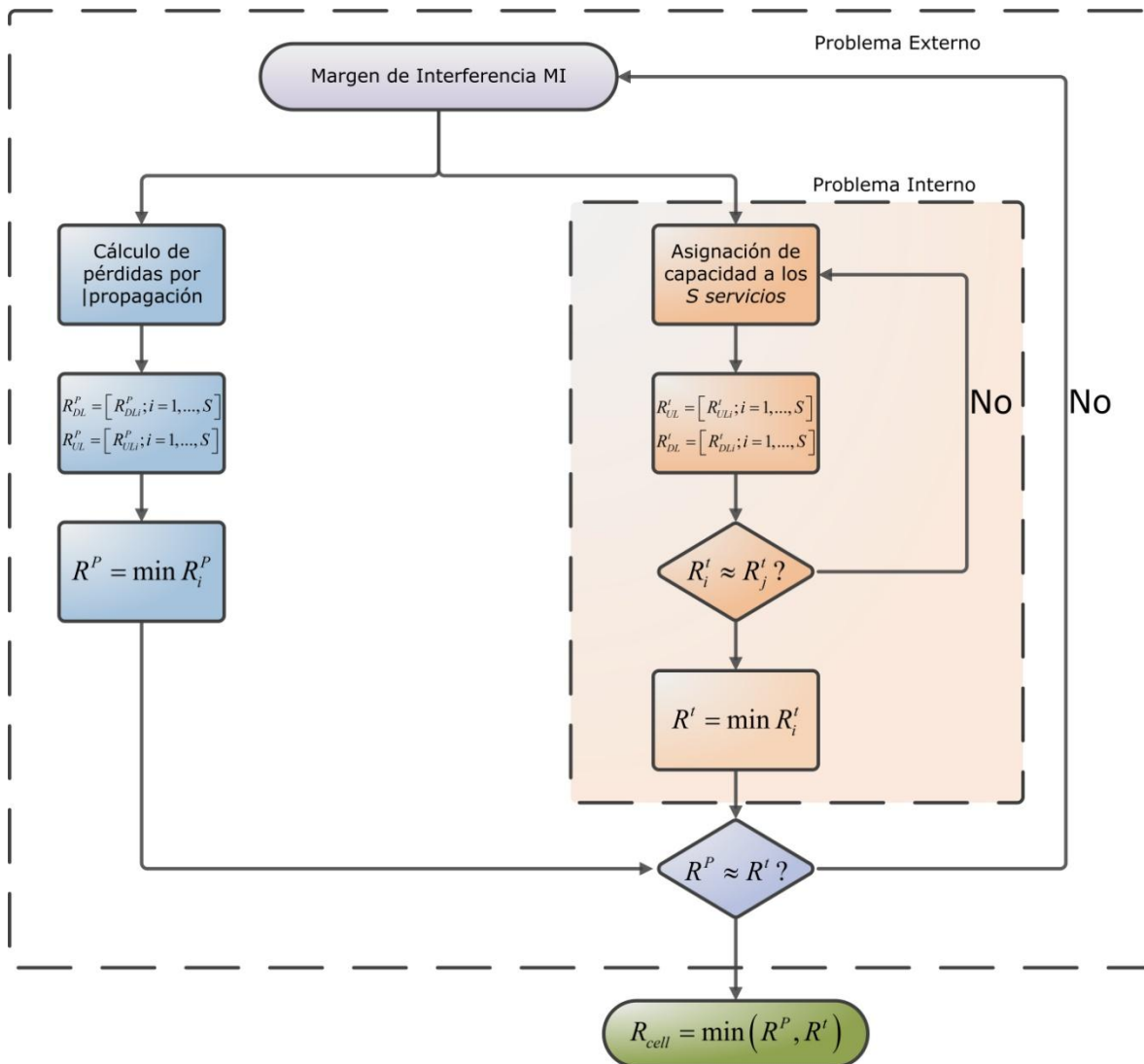


Figura 6. Algoritmo general de solución al problema de optimización del radio de la celda.

A diferencia del problema externo, cuya solución consiste en el balanceo del margen de interferencia que permita una solución al resto del modelo convirtiéndose al final de la optimización como un factor restrictor de interferencia para la celda en cuestión permitiendo desarrollar la planificación celular de forma

eficiente, el problema interno agrupa la principal problemática en la optimización del radio de la celda.

### **III.6. Conclusiones**

Mostramos en detalle las relaciones matemáticas necesarias para la obtención del radio de la celda bajo el lineamiento inicial de la planificación celular. Demostramos como las restricciones del mismo modelo nos llevaron a comprobar los compromisos y relaciones íntimas entre capacidad y cobertura, así como una serie de cambios en la formulación del tráfico y el número de usuarios en la celda con respecto a las tecnologías anteriores, que muestran no sólo la influencia directa de la interferencia en la capacidad, sino además de como la red completa logra afectarla.

Por lo tanto, nuestro siguiente paso es fijar los valores específicos de los parámetros de simulación más adecuados para caracterizar el modelo matemático del radio de la celda y generar un espacio de solución para el problema externo e interno que se pueda implementar sobre los algoritmos de optimización que trataremos en el capítulo V.

## Capítulo IV

---

### Optimización

---

#### IV.1. Objetivo del capítulo

En este capítulo describiremos los conceptos necesarios para comprender las técnicas de optimización seleccionadas en esta tesis de cara a enfrentar el problema del radio de la celda en WCDMA descrito en los capítulos anteriores, así como los algoritmos de optimización y cada una de sus fases de funcionamiento describiéndolas en detalle y explicando los criterios elegidos en su diseño.

#### IV.2. Optimización

Un problema de optimización consiste, básicamente, en maximizar o bien minimizar un valor de alguna función dentro de un conjunto finito o infinito de elementos, donde a su vez, esta variable se encuentra afectada por otras que, en ocasiones, presentan serios compromisos mutuos llevando el problema de encontrar dichos valores máximos y mínimos hacia un proceso de búsqueda exhaustivo y complejo (Sivanandam & Deepa, 2008).

Los problemas de optimización son problemas reales y comunes tanto en la vida práctica como académica, debido a que tienen la tarea de buscar una solución dentro de una serie de restricciones que nos dicen que no todas las

soluciones son factibles. Podemos mencionar como algunos ejemplos la optimización de producción cuyo fin es aumentar la producción al menor costo y tiempo posible bajo las restricciones de materia prima y recurso humano; la optimización de planificación de vuelos donde se busca la mejor ruta viajera para reducir tiempos y combustible utilizados a la vez que se abarcan los mayores destinos posibles; la optimización de software donde generalmente se busca hacer más eficiente los programas computacionales en términos de memoria, procesamiento y tiempo de ejecución, entre otros.

Como podemos observar, es común encontrar problemas de optimización donde se cuentan con serios compromisos entre varios parámetros del sistema a tratar, por lo que hay que minimizar o maximizar ciertas funciones denominadas *función objetivo* dentro de un espacio combinatorio continuo de dimensión finita. Por lo tanto, podemos definir un problema de optimización de la siguiente forma matemática:

$$\begin{aligned} \min f_0(x) \\ f_i(x) \leq b_i, \quad i = 1, \dots, m \\ x \in \Omega \in \mathbb{R}^n \end{aligned} \quad (25)$$

Aquí, donde el vector  $x = (x_1, \dots, x_n)$  es la variable de optimización del problema que contiene el conjunto de espacio de solución,  $\Omega$  son los puntos o decisiones factibles dentro del conjunto de los reales, la función  $f_0: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  es la función objetivo que representa o mide la calidad de las decisiones en el conjunto de los reales, la función  $f_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $i = 1, \dots, m$  son las (inecuaciones) funciones de restricción, y las constantes  $b_1, \dots, b_m$  son los límites, o fronteras, para las restricciones. Las restricciones implican que no cualquier decisión es posible (Boyd, 2009). Por lo tanto, el problema de optimización consiste en encontrar un

valor de  $x$  que minimice<sup>8</sup> a  $f_0$  sobre todas las  $x$  tal que satisfacen las  $m$  condiciones  $f_i(x) \leq b_i, i = 1, \dots, m$  con las que cuenta el problema.

Se han desarrollado una amplia variedad de estudios sobre métodos que ataquen la optimización de funciones, los cuales van desde optimización convexa, programación estocástica, algoritmos metaheurísticos y otro gran número de campos y sub campos de técnicas de diseño en la optimización en contextos dinámicos. Nos enfocamos en la implementación de técnicas heurísticas debido a la naturaleza alternativa que presenta su solución que, a pesar de no asegurar un resultado óptimo, utiliza el proceso inductivo natural donde el ingenio del diseñador toma partido en su totalidad.

### IV.3. Técnicas heurísticas

Heurística o "ars inveniendi" (*El arte de la invención*) es el nombre que reciben los estudios relacionados con la lógica, la filosofía o la psicología, con el objetivo de estudiar los métodos y reglas del descubrimiento y la invención. (Polya, 1973). Las heurísticas proponen el uso de la experiencia, el sentido común, el ingenio y las habilidades de deducción e inducción de la mente para afrontar problemas con relativa complejidad mediante métodos alternativos a los modelos rigurosos y formales.

Debemos recordar que el objetivo de esta tesis es lograr la optimización del radio de la celda para un escenario multiservicio, por lo que la utilización de heurísticas en la metodología científica como estrategia de solución propone vías alternas a un problema complejo y un espacio de búsqueda extenso, es decir, al no contar con un procedimiento algorítmico viable, son las heurísticas quienes tomaran este papel de solución.

---

<sup>8</sup> De forma estandarizada, una función objetivo se formula para alcanzar su minimización, ya sea que en realidad sea este su objetivo o bien sea maximizar la función

Hemos decidido implementar tres algoritmos heurísticos diseñados para la optimización del radio de la celda y además una meta heurística como forma de validación a los algoritmos. Los algoritmos son los siguientes:

1. Heurística de redistribución iterativa del factor de carga (Portilla-Figueras *et al.* 2009).
2. Algoritmo reducido (Figueras & Saenz, 2006)(Lindberger, 1944).
3. Heurística combinada (Portilla-Figueras *et al.* 2009).
4. Algoritmo genético (Figueras & Saenz, 2006)(Sivanandam & Deepa, 2008).

### **IV.3.1. Heurística de redistribución iterativa del factor de carga**

Cuando pensamos obtener radios iguales o bien lo más homogéneos posibles para cada uno de los servicios de la red WCDMA, lo primero que viene a la mente es ¿por qué no simplemente igualarlos entre sí?. Bien, esta es la pregunta que inspira a esta heurística iterativa de reasignación de factor de carga.

Partiendo de una solución inicial de factor de carga aleatoria que cumpla con la restricción de carga de la celda  $\eta \leq 0.75$ , calculamos el radio de la celda para cada uno de los servicios mediante el modelo visto en el Capítulo II, luego forzamos todos los servicios del escenario  $R_T$  analizado que cuenten con el mismo radio de celda del servicio más restrictivo, es decir, con el radio mínimo del escenario  $R_{\min}$ :

$$R_{\min} = \min(R_T) \quad (26)$$



Por lo tanto, esta reducción de los demás servicios ocasionará a su vez una reducción del factor de carga asignado al servicio en cuestión y al factor de carga total de la celda. El valor de la carga sobrante con respecto a la inicial, que llamaremos factor de carga restante  $L_{rem}$ , es calculado como:

$$L_{rem} = \eta - \sum_i^n L_i \quad (27)$$

Donde  $\eta$  es el factor de carga restrictivo de la celda,  $L_i$  es el factor de carga reducido del servicio  $i$ . Este factor de carga sobrante, debe ser redistribuido sobre los demás servicios para no caer en una sub estimación de recursos al no maximizar la carga mientras igualamos los radios de la celda. Esta redistribución se realiza el número de iteraciones necesarias hasta alcanzar una homogeneidad entre los radios de tal forma que la diferencia entre radios contiguos sea de apenas 10 metros ( $\varepsilon = 0.01$ ) (Portilla-Figueras *et al.*, 2009), con excepción del algoritmo genético en donde el número de iteraciones es fijo.

La estrategia que se debe tomar para redistribuir el factor de carga sobrante puede ser muy variada. La más sencilla es hacer una redistribución balanceada sobre los servicios en el sistema; sin embargo, debido a la naturaleza aleatoria de la solución inicial, es fácil que el algoritmo obtenga soluciones sub óptimas, o bien, no alcance una solución adecuada debido que termina distribuyendo el factor sobrante sobre servicios sensibles a pequeños cambios de factor de carga, ocasionando oscilaciones e inestabilidades durante el balanceo. A pesar de esta desventaja del algoritmo, es conveniente dar un mayor peso al servicio más restrictivo para "levantarlo" de su valor no adecuado, es decir, a la vez que se busca una mínima diferencia entre los radios de celda del sistema y maximizar la carga, se busca maximizar el radio lo más posible hasta lograr una solución por debajo del margen mínimo de optimalidad de  $\varepsilon = 0.01$ , que evaluaremos mediante una función de aptitud  $f_{aptitud}$  la cual, además de proporcionarnos información

sobre la calidad o aptitud de las soluciones y considerarse como la función objetivo en nuestros algoritmos de optimización, obtiene el promedio aritmético de la diferencia entre radios de celda contiguos, definida de la siguiente forma:

$$f_{aptitud} = \sum_{i=1}^{S-1} \frac{|R_{i+1} - R_i|}{S-1} \leq \varepsilon \quad (28)$$

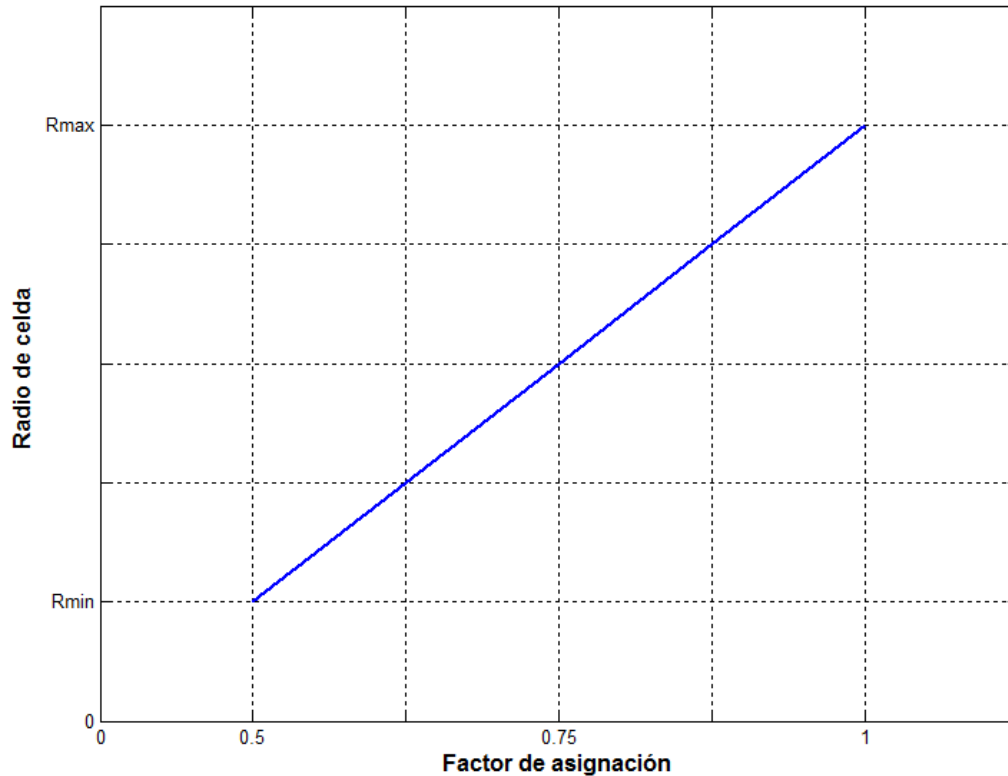
Una redistribución más adecuada consiste en, como lo mencionamos, otorgar una porción mayor de factor de carga al servicio más restrictivo y el sobrante hacerlo de forma balanceada sobre el resto del sistema. Denominamos *factor de prioridad* ( $f_{assing}$ ) a la variable de asignación de peso de factor de carga sobrante cuyo valor hemos definido como la diferencia normalizada entre el radio máximo y el radio mínimo del escenario en cuestión, donde si dicha diferencia es grande, haremos que  $f_{assing} = 1$  para permitir la mayor distribución de factor de carga sobre el servicio con el radio más pequeño. Por otro lado, si dicha diferencia no es sustancial, basta con realizar una interpolación lineal del factor de asignación entre los límites  $0.5 < f_{assin} < 1$  relacionada con la diferencia de los radios máximos y mínimos, donde el radio máximo lo obtenemos del vector  $R_T$ :

$$R_{\max} = \max(R_T) \quad (29)$$

Así, establecemos la condición del valor del factor de asignación como:

$$f_{assin} = \begin{cases} 1 & \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\min}} \geq 1 \\ \frac{R_{\max} - R_{\min}}{2} + 0.5 & \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\min}} < 1 \end{cases} \quad (30)$$

Donde  $R_T$  es el vector de radios de celda del escenario. El comportamiento establecido a  $f_{assin}$  lo mostramos en la Figura 7.



**Figura 7. Distribución de valores al factor de asignación utilizando interpolación lineal.**

Por lo tanto si deseamos obtener un punto intermedio  $P(f_{assin}, R'_{max})$  obtenido mediante la ecuación simple de interpolación, estableciendo un punto máximo arbitrario relacionado con nuestra función restrictiva, decimos que:

$$R_{max} = 2R_{min} \quad (31)$$

El permitir una relación de apenas el doble del radio mínimo, permite que diferencias elevadas entre los radios extremos sean detectadas instantáneamente

y reducidas rápidamente, sin caer en sobre variaciones por diferencias mínimas. Es ahí donde hacemos uso de la forma general de la interpolación lineal (32) para encontrar el valor del factor de asignación para cualquier caso en función del radio máximo y radio mínimo, expresada como:

$$y = y_1 + \left( \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \cdot (x - x_1) \quad (32)$$

$$f_{assin} = 0.5 + \left( \frac{1 - 0.5}{2R_{\min} - R_{\min}} \right) \cdot (R_{\max} - R_{\min}) \quad (33)$$

El factor de carga reasignado para el servicio  $j$  con radio menor queda, por lo tanto, en función de  $f_{assing}$  y  $L_{rem}$  de la siguiente forma:

$$L_{as\_j} = L_j - f_{assin} \cdot L_{rem} \quad (34)$$

Donde  $L_j$  corresponde al factor de carga reducido del servicio  $j$  y  $L_{as\_j}$  al nuevo factor de carga asignado. Mientras que para el resto de los  $S$  servicios, la nueva asignación para un servicio  $i$  distinto de  $j$ , corresponderá:

$$L_{as\_i} = L_i - \frac{(1 - f_{assin})}{S - 1} \cdot L_{rem}, \quad i \neq j \quad (35)$$

Para mantener la distribución restrictiva, se debe cumplir con (36):

$$f_{assin} > \frac{1 - f_{assin}}{S - 1} \quad (36)$$

La principal desventaja de este algoritmo iterativo recae en la solución aleatoria inicial que puede enviar el resultado hacia un valor sub óptimo o dentro de un ciclo de inestabilidad, debido a la alta sensibilidad a variaciones de factores de carga que pueden presentar servicios menos restrictivos; o bien, simplemente no alcance una convergencia en un número de iteraciones adecuado. Por otra parte, aquí presentamos una distribución de factor de asignación por interpolación, que a pesar de ser sencilla y rápida, puede ser imprecisa y con bajo nivel de afinación por iteración lo que inclina más al algoritmo hacia la probabilidad de soluciones sub óptimas.

Para describir el funcionamiento del algoritmo, lo hemos dividido en 10 fases (Figura 8) descritas a continuación:

1. A partir de un candidato a solución bajo la restricción de margen de interferencia de  $6.02dB$ , se genera un vector multi servicio  $L_T$  de factores de carga  $L_i$  aleatorio, con el que calculamos a partir de (13) a (20) un vector  $R_T$  de radios de celda  $R_i$ .
2. Mediante (26) y (29) obtenemos el radio mínimo  $R_j = R_{\min}$  y el radio máximo  $R_{\max}$  del vector  $R_T$ .
3. Igualamos los demás servicios con radio  $R_i$  al del servicio  $R_j$ .
4. Recalculamos los factores de carga del nuevo vector  $L_T$ , utilizando de forma inversa el modelo de (20) a (13).
5. Obtenemos el factor de carga sobrante con (27).
6. Antes de distribuir linealmente el factor de carga sobrante, debemos medir la diferencia entre  $R_{\max}$  y  $R_{\min}$ . Por lo tanto, para obtener el valor de  $f_{assin}$  utilizamos la función de decisión (30).

7. Con el factor de asignación, obtenemos los nuevos factores de carga para el servicio más restrictivo  $L_{as\_j}$  y para los demás servicios  $L_{as\_i}$  mediante (34) y (35).
8. Con la nueva asignación de factores de carga, obtenemos un nuevo vector  $R_{nuevo\_T}$  de radios de celda.
9. Evaluamos la aptitud de la solución mediante (28), esperando un valor menor a  $\varepsilon = 0.01$ , si no es el caso, el vector  $R_{nuevo\_T}$  ocupa el lugar de la solución inicial para una nueva iteración.
10. El algoritmo finalizará hasta que dicha condición se cumpla. o bien, complete un total de 20 iteraciones. El radio de la celda corresponderá al valor mínimo del vector  $R_{nuevo\_T}$ .

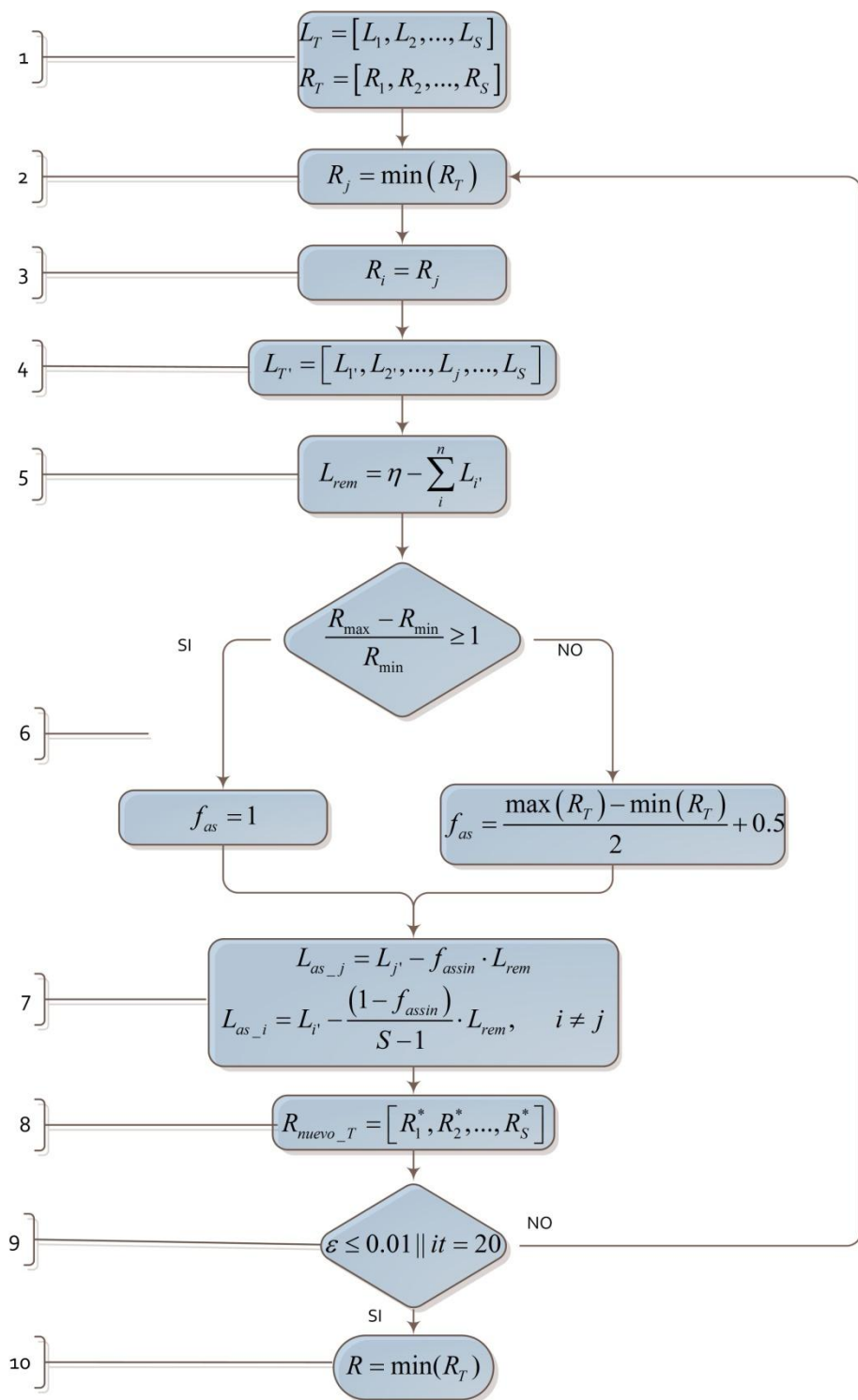


Figura 8. Fases de funcionamiento del algoritmo de la heurística de redistribución iterativa del factor de carga.

Cabe mencionar que el proceso inverso de implementación del modelo matemático del cálculo del radio de la celda para determinar el factor de carga a partir de un radio dado, es utilizado no sólo para este algoritmo, sino para todas las heurísticas que se hacen uso en esta tesis.

El proceso da inicio con un radio obtenido con el que se calcula el número de usuarios para el servicio o servicios en cuestión por sector con (20) y a su vez con los parámetros específicos del servicio, se determina tráfico total ofrecido en Erlangs con (19) para hacer uso del modelo de tráfico de Erlang B bajo la condición de probabilidades bloqueo y determinar el número de conexiones activas. Finalmente, el valor del factor de carga es obtenido mediante (18) conservando la condición de interferencia permitida de factor de carga total de la celda.

### **IV.3.2. Algoritmo reducido**

El segundo algoritmo que utilizamos en la determinación del radio de la celda, consiste en un modelo matemático que proporciona una solución certera y precisa para cualquier escenario multi servicio WCDMA, en términos de los parámetros de servicio y factor de carga.

El algoritmo consiste en una propuesta matemática por K. Lindenberg (Lindberger, 1944) y aplicada a las redes ATM<sup>9</sup>, denominado *Algoritmo Reducido* debido a que reduce todo el conjunto de servicios en un escenario celular a un servicio artificial único y equivalente con sus propias características de tasa de transmisión y calidad de servicio, esto con el objetivo de determinar un radio de la celda aproximado. La principal ventaja del algoritmo reducido es que provee un método robusto de resolver el problema de determinar el radio de la celda,

---

<sup>9</sup> ATM o Modo de Transferencia Asíncrona (*Asynchronous Transfer Mode* por sus siglas en inglés). Técnica de conmutación diseñada para unificar las telecomunicaciones y las redes computacionales.



ofreciendo una solución de buena calidad y de fácil implementación adaptable al caso de los sistemas WCDMA. Las expresiones que lo forman son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 Vb_{eq} &= \frac{\sum_{i=1}^S A_i \cdot Vb_i^2}{\sum_{i=1}^S A_i \cdot Vb_i} \\
 Pb_{eq} &= \frac{\sum_{i=1}^S Pb_i \cdot A_i \cdot Vb_i^2}{\sum_{i=1}^S A_i \cdot Vb_i} \\
 \alpha_{eq} &= \frac{\sum_{i=1}^S \alpha_i \cdot A_i \cdot Vb_i^2}{\sum_{i=1}^S A_i \cdot Vb_i} \\
 ts_{eq} &= \frac{\sum_{i=1}^S ts_i \cdot A_i \cdot Vb_i^2}{\sum_{i=1}^S A_i \cdot Vb_i} \\
 \rho_{eq} &= \frac{\sum_{i=1}^S \rho_i \cdot A_i \cdot Vb_i^2}{\sum_{i=1}^S A_i \cdot Vb_i} \\
 \sigma_{eq} &= \frac{\sum_{i=1}^S \sigma_i \cdot A_i \cdot Vb_i^2}{\sum_{i=1}^S A_i \cdot Vb_i} \\
 \left( \frac{Eb}{No} \right)_{eq} &= \frac{\sum_{i=1}^S (Eb/No)_i \cdot A_i \cdot Vb_i^2}{\sum_{i=1}^S A_i \cdot Vb_i}
 \end{aligned} \tag{37}$$

Donde las expresiones determinan los valores de los parámetros equivalentes de tasa de datos  $Vb_{eq}$ , probabilidad de bloqueo  $Pb_{eq}$ , tasa media de arribo de llamada

$\alpha_{eq}$ , tasa media de servicio  $ts_{eq}$ , densidad de usuarios  $\rho_{eq}$ , factor de actividad  $\sigma_{eq}$  y relación Energía de bit - Interferencia  $\left(\frac{Eb}{No}\right)_{eq}$ . El método, extendido obviamente

hacia las singularidades del diseño de las redes WCDMA, comienza a partir de la consideración de un radio único arbitrario, típicamente de 1 km (Figueras & Saenz, 2006). De esta forma, el modelo calcula la demanda de tráfico total ofrecido  $A_i$  para cada servicio haciendo uso de la densidad de usuarios de cada servicio, la tasa de transmisión, la tasa media de arribo y la duración media de llamada.

Considerando el nuevo servicio artificial, el método calcula el valor correspondiente del radio de la celda  $R_{reducido}$  al que se le asigna todo el factor de carga  $\eta$ . Del radio de celda obtenido, se calcula el factor de carga correspondiente  $L_{reducido\_i}$  para cada servicio  $i$ , invirtiendo el modelo del proceso de cálculo de radio de celda visto en el Capítulo III.

El factor de carga real individual para cada servicio  $i$  es finalmente obtenido mediante:

$$L_i = \frac{L_{reducido\_i}}{\sum_{i=1}^s L_{reducido\_i}} \cdot \eta \quad (38)$$

Así, determinamos el nuevo vector de factores de carga  $L_T$  con el que, de forma usual, calculamos el vector de radios de celda como solución final del algoritmo.

El algoritmo reducido no presenta iteraciones y entrega una solución única a cada escenario, por lo que su grado calidad de solución (dada por (39)) también es única y no optimizable mediante el mismo algoritmo. Sin embargo, este mismo valor un grado de calidad o aptitud bastante alto (como podremos observar en la sección de resultados del capítulo V), por lo que proponerlo como solución inicial a

la heurística de redistribución iterativa de factor de carga resultó una propuesta prometedora.

Para dejar claro su funcionamiento, a continuación describimos el algoritmo en nueve fases que lo constituyen. El diagrama de flujo puede apreciarse en la Figura 9.

1. Comenzamos con una propuesta arbitraria de radio de celda único. Típicamente de 1km.
2. Utilizando las ecuaciones (19) y (20), obtenemos la expresión:

$$A_i = \frac{\pi \cdot \rho_i \cdot \alpha_i \cdot ts_i \cdot R^2}{N_{sectores}} \quad (40)$$

con la que determinamos el tráfico total ofrecido  $A_i$  para un escenario con tráfico balanceado o no balanceado además de hacer uso de los demás parámetros comunes de servicio, como son densidad de usuarios  $\rho_i$ , tasa media de conexión  $\alpha_i$ , tiempo medio de servicio  $ts_i$  y el número de sectores de la celda  $N_{sectores}$ .

3. Implementando el modelo de Lindgerber (Lindberger, 1944) en las ecuaciones de (37), determinamos el nuevo servicio artificial equivalente del escenario estudiado y con las ecuaciones del Capítulo III obtenemos el radio reducido  $R_{reducido}$ .
4. Hacemos que el  $R_{reducido}$  sea equivalente para todos los servicios de la celda, para forzar los servicios a presentar radios homogéneos.
5. Determinamos a su vez el factor de carga reducido  $L_{reducido_i}$  de cada servicio mediante el modelo inverso de cálculo haciendo uso de los parámetros individuales correspondientes.

6. Sin embargo, para obtener el factor de carga real de cada servicio, es necesario utilizar la ecuación (38).
7. Finalmente, con el nuevo vector de factores de carga  $L_T = [L_1, L_2, \dots, L_S]$ , determinamos el vector de radios de celda  $R_T$ .
8. Debido a que la solución es única, la aptitud de la solución y calidad de la misma será única e inmejorable dentro de las funciones del algoritmo. Igualmente, el radio menor corresponderá a la solución final.

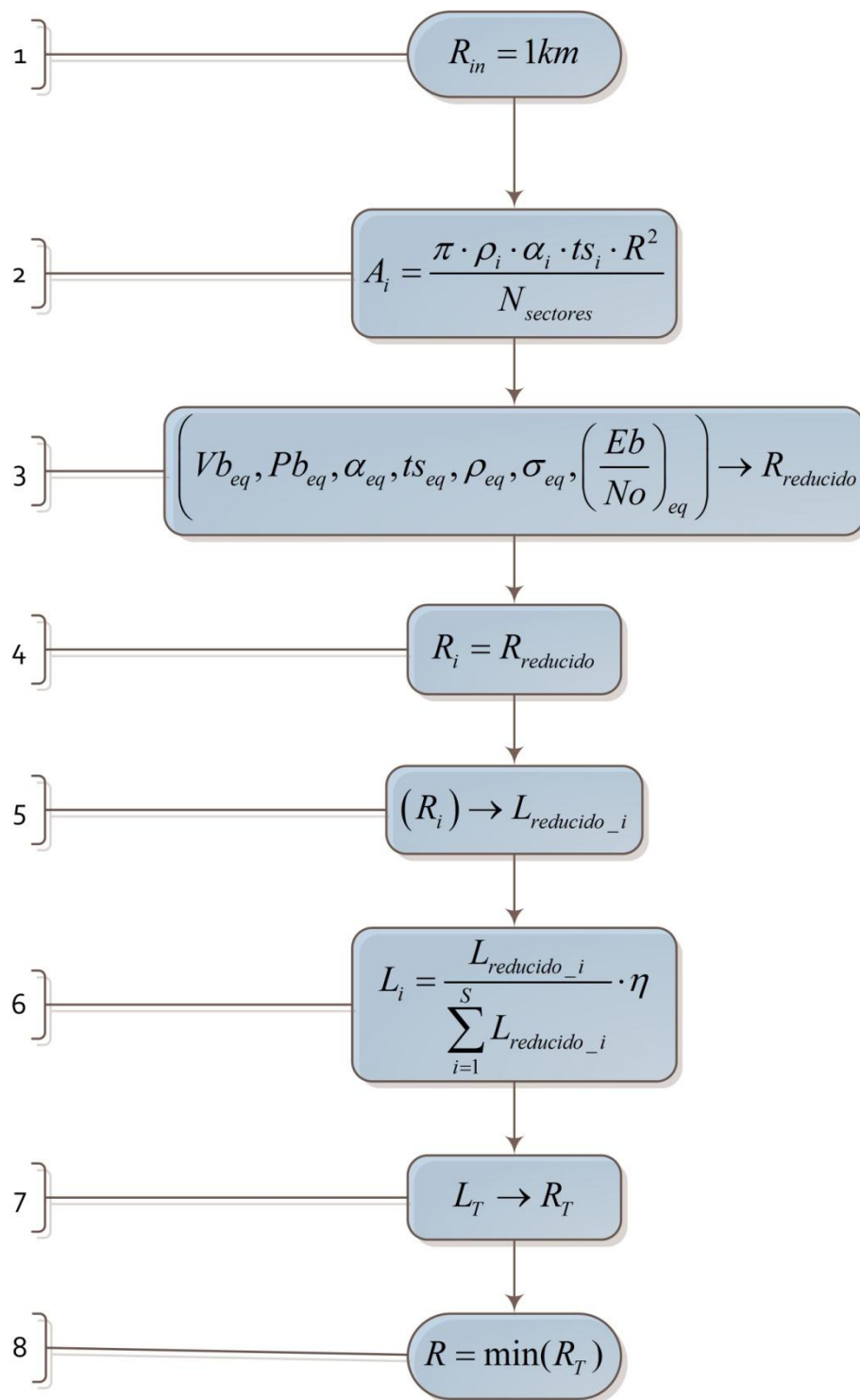


Figura 9. Fases de funcionamiento del algoritmo reducido.

### **IV.3.3. Heurística combinada**

Buscando mejorar los resultados entregados por la heurística de redistribución iterativa del factor de carga y de las ya buenas soluciones del algoritmo reducido, combinamos ambos algoritmos con la hipótesis de obtener aun mejores resultados en términos de aptitud y de iteraciones .

Como mencionamos en el apartado anterior, debido a que la heurística de redistribución iterativa hace uso de una solución aleatoria, esto se presta a que presente irregularidades en su proceso de búsqueda generando la probabilidad de no presentar convergencia de solución o bien no obtenerla. Por lo tanto, proporcionar una solución inicial más adecuada, de cierta forma ayuda al algoritmo a lograr una estabilidad con un menor número de iteraciones y encontrar, ya no sólo una solución más adecuada, sino inclusive, con un incremento en su grado de aptitud y homogeneidad entre los radios de celda. Así, esperaríamos un mejor desempeño de la heurística.

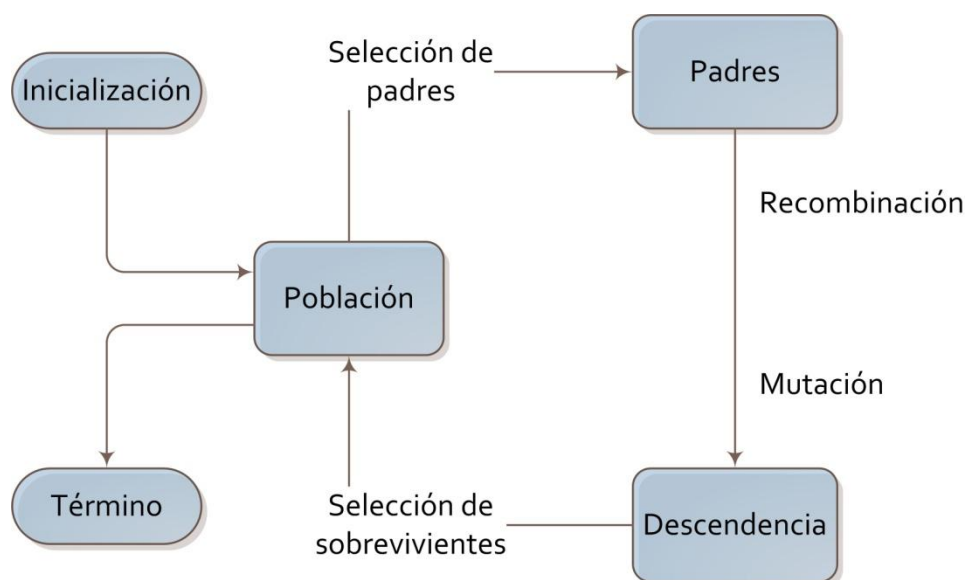
El funcionamiento del algoritmo es relativamente el mismo que el algoritmo heurístico de redistribución iterativa del factor de carga, con la única diferencia en la propuesta de solución inicial.

### **IV.3.4. Algoritmo genético**

Los algoritmos genéticos consisten en métodos de optimización de funciones inspirados en la evolución biológica, selección natural y en su base genética y molecular. Fue John Henry Holland, en 1970 el primero en concebirlos como medio de estudio de comportamientos adaptativos, como sugiere el título de su libro señalando sus primeras investigaciones *Adaptation in natural and artificial systems* (Eiben & Smith, 2007). Simulando un entorno sujeto a parámetros específicos, el algoritmo hace uso de una población de individuos permitiéndolos evolucionar al someterlos a acciones aleatorias semejantes a las de la evolución

biológica (selección, cruzamiento, mutación) generando poblaciones descendientes o "hijos" debido a los patrones reproductivos que establece el algoritmo y sometiéndolos a pruebas de aptitud al entorno de simulación permitiendo, si el algoritmo lo establece, condiciones de sobrevivencia de la descendencia.

La nueva población generada por cada iteración, por lo tanto, deberá contar con características probabilísticamente superiores, es decir, conforme aumente el número de iteraciones, la descendencia irá "evolucionando" sus patrones de adaptación, lo que se verá reflejado en los genes y cromosomas de cada individuo. Debido a que cada individuo es una posible solución, sus cromosomas corresponden a las características específicas de la solución en sí.



**Figura 10. Diagrama de flujo del diseño general de un algoritmo genético.**

Para poder implementar un algoritmo genético es importante codificar el espacio de búsqueda en una forma tal que se pueda representar cualquier solución posible dentro del cromosoma de un individuo. Por lo tanto el problema debe parametrizarse adecuadamente en una serie de variables que correspondan

a los operadores genéticos utilizados sobre el cromosoma. Finalmente, la tarea del algoritmo recae en tratar de hallar un óptimo global al problema y no óptimos locales que corresponden a soluciones sub óptimas o dentro de conjuntos menores de solución.

Basándonos en (Eiben & Smith, 2007) y en (Soto Olivares, 2010), los algoritmos genéticos poseen los siguientes componentes importantes relacionados con los algoritmos evolutivos, las cuales describiremos brevemente a continuación.

#### **IV.3.4.1. Representación (Definición de individuos)**

El primer paso consiste en definir los objetos que permitirán resolver el problema, esto creando con ellos una conexión entre el espacio de solución y el contexto real. Es en este punto donde creamos la población de individuos del algoritmo, donde su contextualización con el problema original es denominada *fenotipo* y su codificación *genotipo*.

La representación más adecuada del cromosoma correspondiente a cada individuo dentro de la población de nuestro algoritmo genético adaptado al problema del radio de la celda, consiste en un vector lineal de tamaño  $S$  igual al número de servicios correspondientes al escenario a analizar, donde cada *gen*  $L_i$  del vector, corresponde a una asignación aleatoria de factor de carga al servicio y posición  $i$  en el vector. Sin embargo, dicho vector es generado bajo la condición (15) de restricción de interferencia, como podemos observar en la muestra ejemplificada de la Figura 11 de un individuo  $n$  perteneciente a una población de tamaño  $\mu$ .



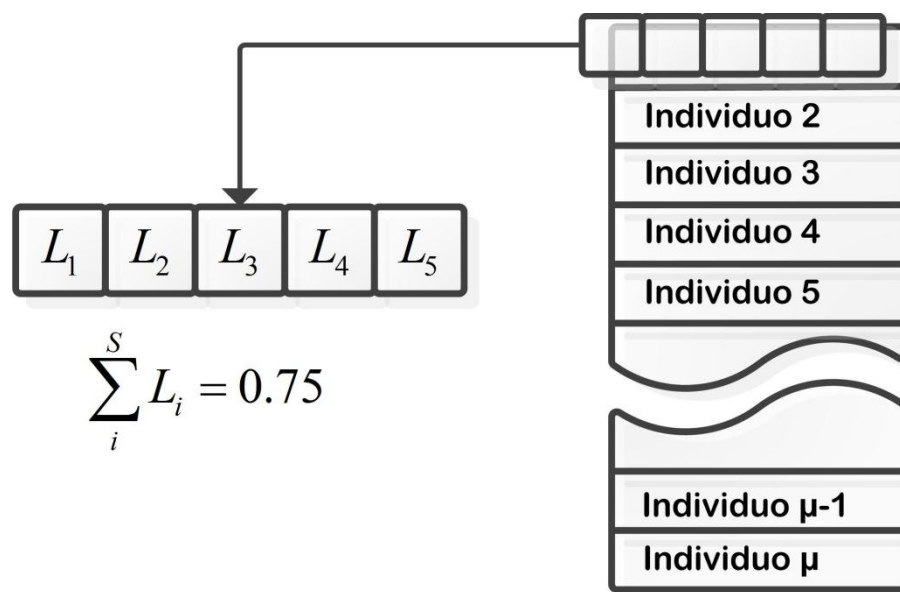


Figura 11. Representación de la codificación del cromosoma de un individuo y el conjunto completo de población.

#### IV.3.4.2. Población

El juego que lleva a cabo la población es contener el conjunto de posibles soluciones, es decir, la población es un multi conjunto<sup>10</sup> de genotipos (Eiben & Smith, 2007), individuos, que serán probados durante la búsqueda de solución. Debido a esta razón es que la representación del genotipo y fenotipo de cada individuo es tan importante. Sin embargo, el tamaño de la población, así como la cantidad de cromosomas utilizados para la representación del individuo dependerá de la complejidad del problema (Sivanandam & Deepa, 2008). Por lo tanto, la decisión del tamaño de la población toma un papel importante en el diseño del algoritmo, debido a que además de prestar las ventajas de la diversidad y facilidad de exploración, las limitantes computacionales se ven reflejadas inclusive en costo, memoria y tiempo.

<sup>10</sup> Un multiconjunto es un conjunto donde múltiples copias de un elemento son posibles.

#### **IV.3.4.3. Evaluación de función (función de aptitud)**

La teoría de la selección natural menciona que los individuos más adaptados al entorno cuentan con mayores posibilidades de sobrevivencia y además de generar descendencia, es decir, aquellos individuos más "aptos" son lo que permanecerán y se reproducirán. Los algoritmos genéticos, siguiendo con su inspiración en la evolución biológica, cuentan con una función de evaluación de aptitud que probará a los individuos de la población y determinará que tan buena es su propuesta de solución.

Típicamente, la función de aptitud se define de tal forma que las soluciones de mejor calidad presenten una mejor aptitud, mientras que las de baja calidad sean para valores menores de la misma (Eiben & Smith, 2007).

Manteniendo una relación directa con el resto de las heurísticas implementadas, nuestra función de aptitud queda definida como en (28).

#### **IV.3.4.4. Mecanismo de selección de padres**

La selección de padres es el proceso de elección de los individuos pertenecientes a la población candidatos a procrear descendencia. El objetivo es realizar una selección tal que dichos individuos posean una alta probabilidad de generar hijos con una mejor aptitud, es decir, una mejor propuesta de solución. Así, se estará presionando hacia una convergencia iterativa del algoritmo por un valor óptimo, por lo que si la presión de selección es baja, esto se verá reflejado en una tasa de convergencia lenta llevando al algoritmo hacia tiempos mayores de búsqueda de una solución óptima que los normalmente necesarios. Sin embargo, con una presión de selección relativamente alta, es posible obtener una convergencia prematura lo que se presta a llevar al algoritmo hacia una solución sub óptima, o bien, no factible, por lo que es importante mantener diversidad en la población.

Habiendo una variedad de métodos de selección, implementamos el método de selección por torneo que consiste en una variación de selección por ruleta, los individuos son puestos a prueba al competir mientras se comparan sus aptitudes al ser seleccionados aleatoriamente por sobre toda la población. La competencia genera dos miembros ganadores por su mejor aptitud que serán los padres de la nueva generación.

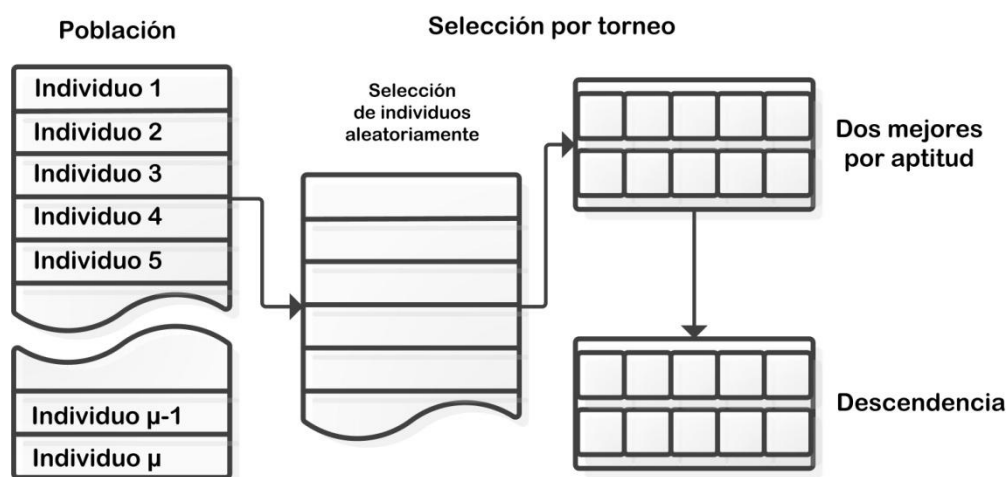


Figura 12. Esquema del operador de selección por torneo.

#### IV.3.4.5. Variación de operadores, recombinación y mutación

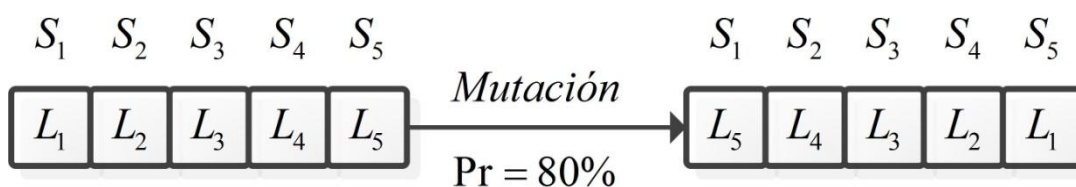
Consiste en crear nuevos individuos a partir de los anteriores, permitiendo generar nuevos candidatos a solución combinando sus genotipos correspondientes bajo la promesa probabilística de que presenten ventajas adaptativas por sobre los padres. Básicamente es un método de transferencia de genes o características de los padres a los hijos por medio de operadores de cruzamiento relacionados con la codificación de los individuos, los cuales pueden

ser muy variados y han sido extensamente estudiados (Sivanandam & Deepa, 2008).

Además de los operadores de recombinación que permiten variaciones en la población y siguiendo con la línea de inspiración biológico-evolutiva que presentan los algoritmos genéticos, existen los operadores de mutación como pequeñas modificaciones aleatorias en el cromosoma de un individuo permitiendo explorar variaciones de las soluciones existentes y así todo el potencial de la representación genética pueda ser alcanzado.

Las mutaciones terminan convirtiéndose en los "empujones" aleatorios hacia una mejor solución y escapar de los óptimos locales a los cuales el algoritmo puede caer inmerso durante sus proceso iterativo de búsqueda y, de alguna forma, recuperar el material genético perdido por las perturbaciones aleatorias.

Para la implementación del algoritmo, elegimos el método de recombinación de cromosomas por punto aleatorio de cruce con el que se realiza un intercambio de genes teniendo una posición común en el cromosoma, generando así dos nuevos hijos tal como lo muestra la Figura 14. Por otra parte, el operador de mutación elegido consiste simplemente en una probabilidad que ejecuta la función de inversión de componentes del vector recombinado, es decir, invierte su orden de factores carga correspondientes a cada servicio.



**Figura 13. Ejemplo de inversión de componentes de vector por operador de mutación.**

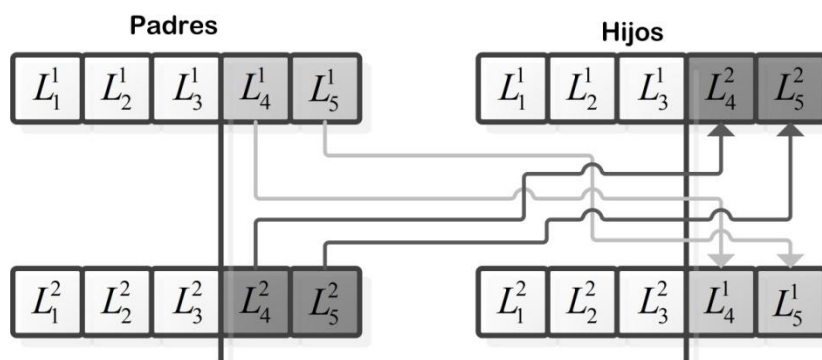


Figura 14. Representación de recombinación de cromosomas por punto aleatorio de cruce elegida para algoritmo genético implementado.

#### IV.3.4.6. Mecanismo de selección de sobrevivientes (reemplazo)

Debe de existir una forma de distinguir entre los individuos basándose en su calidad de aporte de solución, similar a la selección de padres, pero en una fase distinta del ciclo evolutivo. Los mecanismos de selección de sobrevivientes son utilizados tanto para mantener un número de población constante como para favorecer las mejoras en las generaciones siguientes. Dichos mecanismos usualmente son implementados bajo criterios que dependen de la aptitud. De forma opuesta a la selección de padres, la cual es típicamente estocástica, la selección de sobrevivientes es comúnmente determinista (Sivanandam & Deepa, 2008).

También denominada *estrategia de reemplazo*, consiste básicamente en utilizar criterios de sustitución para la eliminación de soluciones de baja calidad dentro de la población y, además, mantener constante el número de individuos.

Básicamente existen dos métodos de reemplazo poblacional: actualización generacional y actualización de estado estacionario. El esquema de actualización de estado generacional consiste en producir N descendientes de una población de N individuos los cuales formaran la siguiente población en la iteración posterior, es

decir, los individuos son reemplazados completamente por la descendencia. En el esquema de actualización de estado estacionario, los nuevos individuos son insertados en la población tan pronto como son generados, es decir, el mismo número de descendientes reemplazan al mismo número de individuos en la población para formar parte de la siguiente generación. Generalmente, los individuos eliminados son los "peores" o los de aptitud deficiente. Es este último esquema el que decidimos implementar en nuestro algoritmo genético (Sivanandam & Deepa, 2008).

#### **IV.3.4.7. Criterio de convergencia**

Finalmente, es importante mencionar los criterios y condición de paro del algoritmo genético, debido a que aunque es posible mantener de forma indefinida su ejecución aumentando la probabilidad de encontrar una solución global al problema al incrementar sus iteraciones operacionales, esto puede resultar no viable e impráctico. Por lo que es típico determinar un número de generaciones como límite, lo que garantiza un tiempo de ejecución finito y arbitrariamente adecuado.

#### **IV.3.4.8. Funcionamiento de algoritmo implementado**

A continuación describiremos las fases de funcionamiento del algoritmo genético implementado y adecuado al problema del radio de la celda:

1. Generamos una población de 1000 individuos que permitan tener una amplia diversidad de espacio de búsqueda bajo las condiciones de vector de factor de carga que hemos establecido comúnmente en las demás heurísticas. Dichos individuos son creados aleatoriamente bajo las

condiciones de escenario de simulación multi servicio WCDMA establecido previamente.

2. Evaluamos la aptitud del cromosoma de radios de celda  $R_T$  de cada individuo.
3. Seleccionamos aleatoriamente 5 individuos de la población y elegimos los 2 con mejor aptitud para procrear la siguiente generación como padres.
4. Los padres son sometidos a los operadores de recombinación aleatoria por punto de cruce descritos anteriormente, y generan así dos hijos como descendencia.
5. Bajo una probabilidad de mutación de  $P_M = 80\%$ , invertimos los genes de los cromosomas de los hijos.
6. Remplazamos con la nueva descendencia generada a los individuos con peor aptitud de la población general.
7. Reevaluamos la aptitud de todos los individuos, incluyendo la nueva generación y aplicamos la condición de paro de número de iteraciones o bien de aptitud de encontrar al menos una solución menor a  $\varepsilon = 0.01$ .

## IV.4. Conclusiones

En este capítulo presentamos una descripción de los aspectos más importantes de las técnicas heurísticas que utilizamos para la optimización del radio de la celda como herramienta principal de búsqueda de esta tesis. Mostrando cada una de las fases con las que cuentan los algoritmos, fue posible encontrar semejanzas de diseño y por lo tanto plantear codificación similar para cada uno de ellos. Fue posible implementar adecuadamente el modelo matemático visto en el Capítulo III a cada una de las heurísticas y así, como se verá en el siguiente capítulo, obtener los resultados más representativos de este trabajo.

## Capítulo V

---

### Escenario de simulación y análisis numérico del modelo

---

#### V.1. Objetivo del capítulo

En este capítulo definiremos los parámetros que utilizaremos en el escenario de simulación del modelo matemático propuesto en el Capítulo III y en la implementación de las heurísticas del Capítulo IV. Además, presentaremos los resultados de los modelos de propagación y de tráfico utilizados, así como el análisis numérico de los mismos. Finalmente, mostraremos los resultados de optimización por las cuatro heurísticas y las comparaciones entre sus valores de radios de celda.

#### V.2. Parámetros de simulación

Antes de comenzar con la implementación de los algoritmos heurísticos, es conveniente realizar el análisis numérico completo de la caracterización del modelo que determina el radio de la celda en WCDMA por propagación y tráfico. Para ello, debemos definir los parámetros que utilizaremos en la formulación de las expresiones matemáticas y las consideraciones de la planificación celular.

Clasificamos los parámetros por propagación radio y por aquellos específicos de cada servicio (tasa de transmisión, probabilidad de bloqueo, calidad de servicio, etc.). La elección de los parámetros se adecua a un escenario típico



macro celular urbano WCDMA multi servicio considerando las recomendaciones de la literatura.

En la siguiente tabla, mostramos los parámetros de propagación radio considerados, los cuales satisfacen adecuadamente el modelo empírico Okumura-Hata (3) dentro de sus fronteras de implementación definidas anteriormente. Además, los valores de potencia de transmisión de la estación base y del receptor son valores típicos de modelo, retomados para realizar comparaciones de resultados con la literatura durante el progreso de la caracterización (Figueras & Saenz, 2006) (Soto Olivares, 2010) (Holma & Toskala, 2004) (Portilla-Figueras *et al.*, 2009)

**Tabla II. Valor de los parámetros utilizados en modelo de cobertura.**

<b>Parámetros de estación base</b>		<b>Parámetros del terminal móvil</b>	
Altura [m]	32	Altura [m]	1.5
Potencia [W]	10	Potencia [W]	0.25
Ganancia de antena [dB]	10	Ganancia de antena [dB]	0
Pérdida por cables [dB]	3	Pérdidas superficiales [dB]	3
Figura de ruido [dB]	5	Figura de ruido [dB]	7
Frecuencia [MHz]	1950	Frecuencia [MHz]	2140

Además de los parámetros correspondientes de la estación base y del terminal móvil, están los términos comunes de propagación considerados en el presupuesto de enlace extraídos de las mismas referencias, como se muestra en la Tabla III:

**Tabla III. Parámetros generales de en el modelo de propagación.**

Margen de desvanecimiento log normal [dB]	7.3	Margen de desvanecimiento rápido [dB]	2
Tasa de interferencia intracelda	0.88	Ganancia de <i>soft handover</i> [dB]	3
Sectores	1	Margen de interferencia [dB]	6.02

Nuestro estudio lo restringimos al caso de una estación base con un sólo sector con la máxima carga de la celda permitida bajo la condición de margen de interferencia. Por otra parte, la tasa de interferencia intracelda se toma del estudio de d'Ávila y Yocoub (d'Ávila & Yacoub, 1998) sobre la interferencia en la celda en una red CDMA en función de la densidad, distribución y descomposición del tráfico, obteniendo curvas de comportamiento parcial.

Las características de los servicios dentro de la celda WCDMA se muestran en la Tabla IV, los cuáles los dividimos en 2 tipos distintos al conjunto de 6 servicios: dos servicios de voz y 4 de datos, donde. además, definimos cada servicio en términos de tasa de datos en kbps  $V_b$ , relación energía de bit - interferencia  $\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{DL}$ , factor de ortogonalidad típico de los códigos pseudoaleatorios  $\bar{\phi}$ , probabilidad de bloqueo  $P_b$  donde mantenemos un valor bajo para los servicios de voz y mayor tolerancia en los de datos; y por último, un factor de actividad del servicio.

**Tabla IV. Parámetros de servicios.**

Parámetro	S1	S2	S3	S4	S5	S6
	Voz			Datos		
$V_b$	12.2	12.2	64	64	144	384
$\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{DL}$	4.4	7.0	2.5	5.3	2.3	2.4
$\bar{\phi}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$P_b$	0.01	0.01	0.05	0.05	0.05	0.05
$\sigma$	0.67	1	1	1	1	1

Finalmente, dividimos el conjunto completo de servicios en dos condiciones de tráfico diferentes: balanceado y no balanceado; esto para realizar una simulación más completa del radio de la celda en WCDMA; y las comparaciones entre distintos escenarios de optimización al combinar servicios y figuras de tráfico.

El escenario con tráfico balanceado asigna un peso equilibrado del caudal eficaz entre los servicios de tal forma que no exista ningún servicio dominante, mientras que el escenario con tráfico no balanceado asigna un mayor peso hacia los servicios de voz, aproximadamente un 90% de la carga de tráfico total.

**Tabla V. Figuras de tráfico para escenarios de simulación.**

<b>Tráfico balanceado</b>						
<b>Parámetro</b>	S1	S2	S3	S4	S5	S6
$\alpha$	1	1	1	1	1	1
$ts$	180	180	240	240	360	500
$\rho$	300	84	147	45	90	46
<b>Tráfico no balanceado</b>						
<b>Parámetro</b>	S1	S2	S3	S4	S5	S6
$\alpha$	1	1	1	1	1	1
$ts$	162	162	23.4	23.4	7.92	7.92
$\rho$	1008	335	80	26	70	35

A continuación, asignamos los parámetros a los modelos de propagación y tráfico para caracterizarlos y obtener el espacio de búsqueda total de solución de cara a implementar las heurísticas.

### V.3. Caracterización del modelo de propagación

Si recordamos el modelo de propagación visto en el Capítulo III, primero determinamos las pérdidas calculadas por el modelo Okumura-Hata y las igualamos al presupuesto de enlace para satisfacer las restricciones de la sensibilidad del receptor y cumplir con las mínimas pérdidas que soporta el enlace de comunicaciones, quedando así restringidos a los valores de radios que genera el modelo de pérdidas. Sin embargo, dentro de los factores de estudio, es el margen de interferencia el que nos permite una flexibilidad de análisis debido a su relación con el factor de carga de la celda; por lo que, finalmente podemos determinar nuestras fronteras de solución al establecer un valor máximo y mínimo de interferencia y un espacio de valores permitidos de carga, es decir, entre 3dB y 6.02dB.

En la Figura 15, mostramos el comportamiento de todos los posibles radios de celda obtenidos por el modelo de pérdidas (6) para los seis servicios WCDMA contemplados en el escenario de simulación. Cada curva entrega el comportamiento del radio de la celda generado para cada uno de los servicios mientras variamos la carga de la celda total, es decir, el margen de interferencia. Por lo que, podemos observar como los servicios de mayor tasa de transmisión de datos presentan una mayor restricción de radio de celda, esto debido a que la sensibilidad del receptor requiere una mayor ganancia de procesado para discriminar parcialmente a las señales indeseadas de los códigos pseudoaleatorios. Además, la restricción de energía de bit - interferencia necesaria genera un factor de proporcionalidad tal que si dicho valor aumenta, también lo hará la sensibilidad del receptor, lo suficiente como para reducir considerablemente la máxima distancia de cobertura del servicio dentro de la celda. El modelo de propagación del radio de la celda presenta, por lo tanto, varios compromisos restrictivos para la cobertura, siendo, además de las características de cada servicio, el margen de interferencia soportado de la celda el principal parámetro que compromete la cobertura.

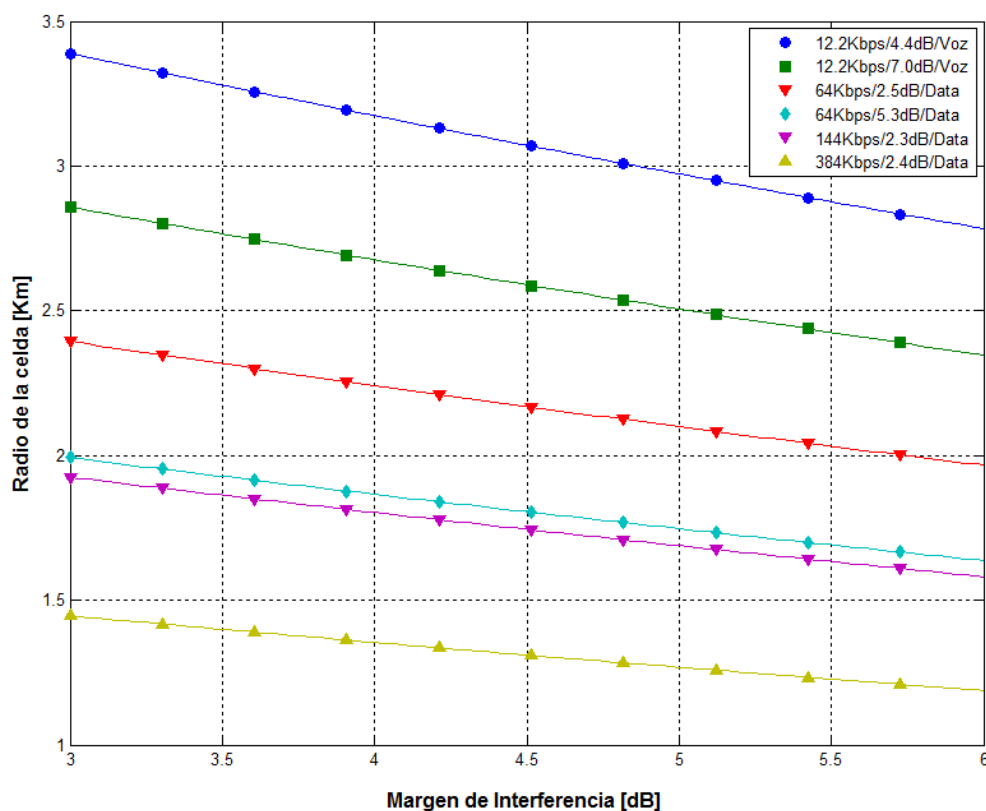


Figura 15. Radios de celda obtenidos por modelo de propagación para cada uno de los servicios estudiados bajo el comportamiento del margen de interferencia.

De la Figura 15 podemos extraer la siguiente información de radios máximos de celda para cada servicio con un margen de interferencia máximo de 6.02dB:

Tabla VI. Radios máximos de celda por modelo de propagación para cada servicio.

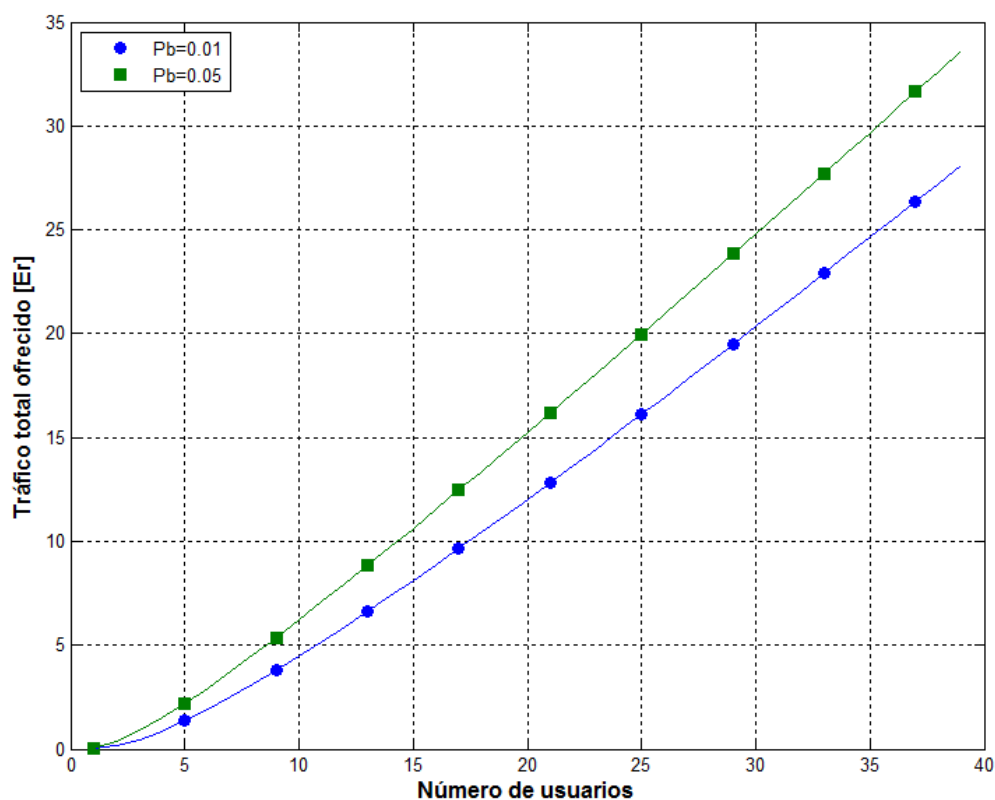
Servicio	Radio de la celda [km]
S1	2.7837
S2	2.3471
S3	1.9663
S4	1.6362
S5	1.5812
S6	1.1878

El modelo de propagación nos entrega la máxima cobertura permitida para los servicios, es decir, el alcance máximo de la señal dentro de la celda. Cabe mencionar, que la propagación de cada uno de los servicios es con respecto al margen de interferencia total de la celda y como termina así afectando a cada servicio individualmente mas no la carga individual asignada (ver Figura 6). Sin embargo, para completar el modelo debemos realizar la principal restricción de WCDMA, que es el modelo de capacidad y tráfico.

#### **V.4. Caracterización del modelo de capacidad**

La formulación vista de (9) a (16), demuestran el grado de influencia del factor de carga y, a su vez, del comportamiento del tráfico de la celda. Es en esta parte del modelo, donde hacemos las consideraciones de probabilidad de bloqueo y calidad de servicio requeridas por el operador (definidas en Tabla IV)

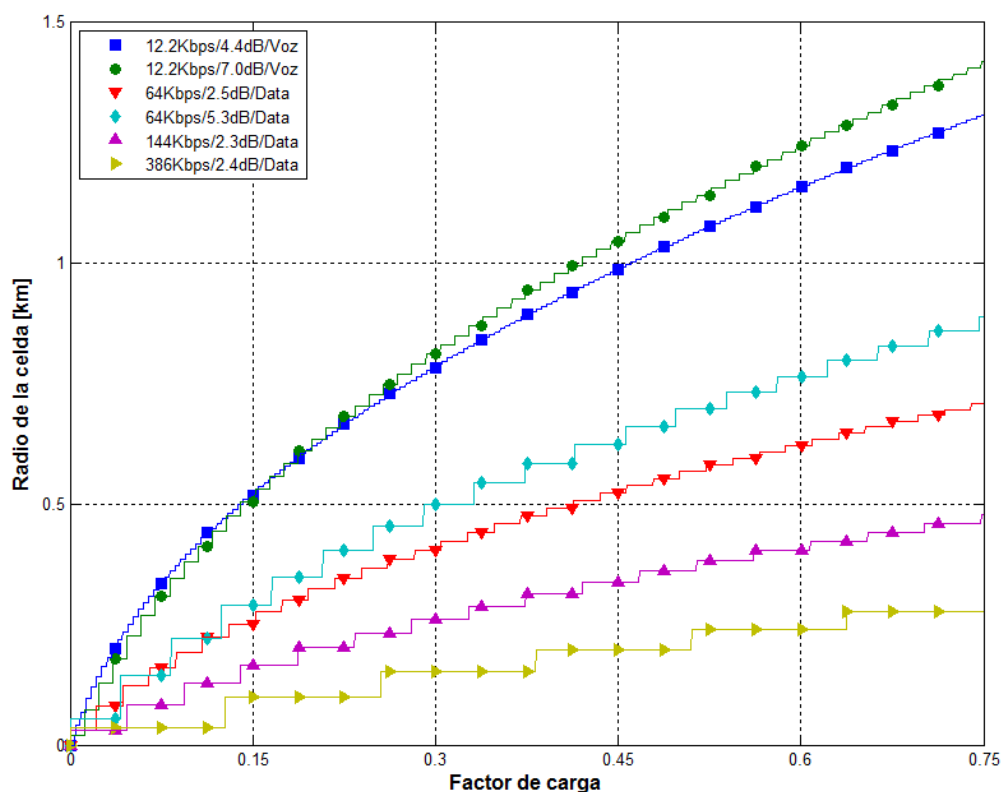
Al satisfacer las expresiones (13) y (14), podemos calcular el número de conexiones activas dentro del sistema con (18), y al considerar el factor de *soft blocking*, aplicamos el modelo de tráfico Erlang B de forma inversa para determinar el número de usuarios que satisfacen la restricción de probabilidad de bloqueo del servicio. El comportamiento de la función Erlang B se aplica para los dos casos de probabilidad que consideramos de 1% para los servicios de voz y de 5% para los de datos, la curva característica de su forma inversa de tráfico total ofrecido versus conexiones activas es la siguiente:



**Figura 16. Caracterización de la inversión de la función de tráfico Erlgan B.**

De la Figura 15, se observa que el comportamiento esperado para probabilidades menores es tal que la restricción reduce el tráfico para satisfacer dicha limitante. Esto quiere decir que al demandar mayor calidad de servicio, reduciremos el número de usuarios finales. Por lo tanto, debido a nuestra función final de radio de celda (20) basada principalmente en la densidad de usuarios, el radio se ve disminuido al disminuir la carga de usuarios finales.

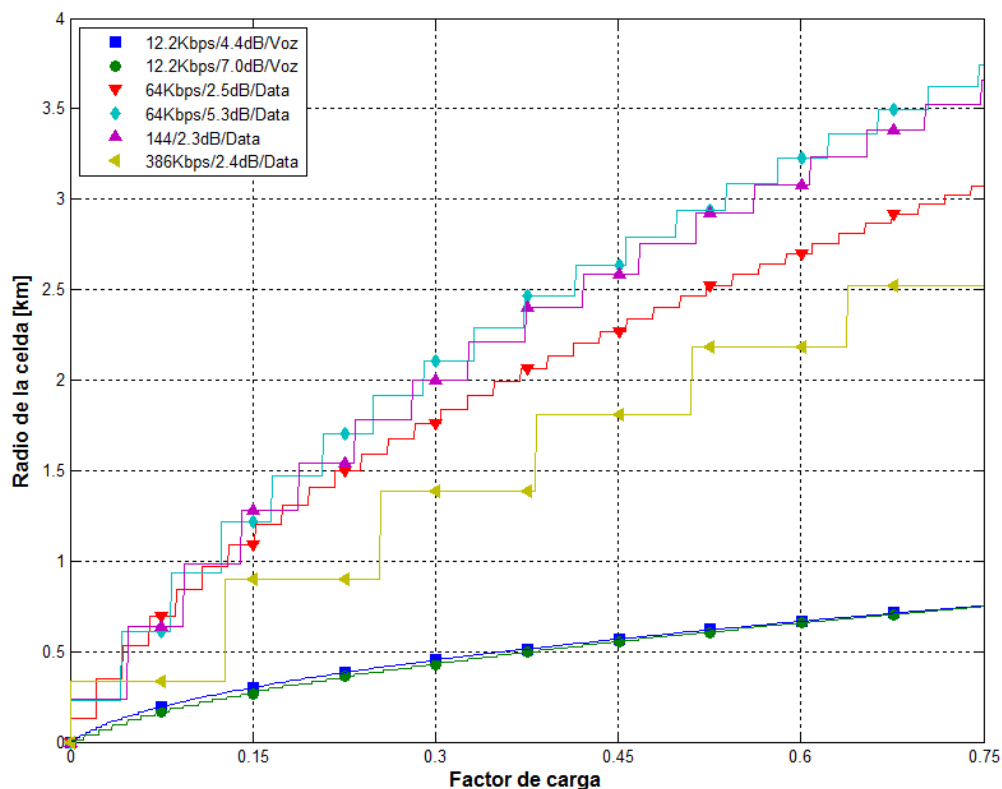
La caracterización final del modelo de capacidad de WCDMA, lo hacemos considerando las figuras de tráfico balanceado y no balanceado de la Tabla V Por lo tanto, obtenemos dos gráficas (Figura 17 y Figura 18) con las curvas del espacio de solución de todos los radios de celda para todos los servicios por cada valor de factor de carga individual que les asignemos:



**Figura 17** Radios de celda obtenidos por modelo de capacidad con tráfico balanceado para cada uno de los servicios estudiados bajo el comportamiento del factor de carga individual.

Debido a que todos los servicios presentan un peso equilibrado del caudal eficaz, son los servicios con mayor tasa de transmisión de datos y restricción de calidad de servicio los que reducen la cobertura. La cuantización de los resultados es debido a la necesidad de la función de Erlang B inversa de requerir valores enteros de conexiones activas por definición, lo que implica un redondeo del valor multiplicado por el efecto del *soft handover* (véase (17) en Capítulo III). Eso provoca una insensibilidad a los cambios de valor en factor de carga a mayor tasa de transmisión. Para el caso no balanceado, se presenta una cuantización similar, como podemos ver en la siguiente figura:





**Figura 18. Radios de celda obtenidos por modelo de capacidad con tráfico no balanceado para cada uno de los servicios estudiados bajo el comportamiento del factor de carga individual.**

Ya que los servicios de voz cuentan con un tráfico mucho mayor, la carga asignada a los mismos disminuye considerablemente la cobertura que pueden alcanzar, mientras que los servicios de tasas mayores acrecientan el radio de la celda al disminuir la interferencia que generan entre sí por tráfico menor.

Sin embargo, como observamos en la Figura 17 y en la Figura 18, existe un grado de cuantización en el modelo de capacidad y tráfico de los radios de celda, cuyo caso se presenta más fuertemente en los servicios de mayor tasa de transmisión (S5 y S6). Esto puede ocasionar que si dentro del proceso de optimización de alguna de las heurísticas se llegase a obtener un valor de factor de carga dentro de un intervalo de cuantización con el objetivo de ajustar el radio

de la celda, esto no ocasionaría ningún cambio en la optimización debido a los dos casos que pueden ocurrir:

1. La variación del factor de carga sea tal que no cause efecto alguno en el radio de la celda debido a que el cambio permanece dentro de un nivel de cuantización.
2. La variación del factor de carga es tal que el cambio en el valor del radio de la celda debido a los niveles de cuantización resulta muy brusco y sobreestimado.

Ambas situaciones provocan una insensibilidad en los valores de factor de carga que se pueden obtener por las heurísticas, es decir, encontrar una solución óptima en el espacio de búsqueda. Implementar directamente con este comportamiento del modelo, provocaría soluciones subóptimas o inestabilidad del algoritmo, debido a las fuertes variaciones que pueden provocarse por la baja sensibilidad del modelo a pequeños ajustes del factor de carga.

Así, es necesario implementar algún método de ajuste de curvas al modelo que disminuya la cuantización y reduzca el error provocado en el proceso de búsqueda de las heurísticas por una solución óptima.

Se optó por utilizar la técnica de *spline* por sobre otros modelos debido principalmente a sus prestaciones y mejoras en aspectos de desviación estándar de error mínimo entre los niveles de cuantización, además de ser un método popular entre el análisis en telecomunicaciones.

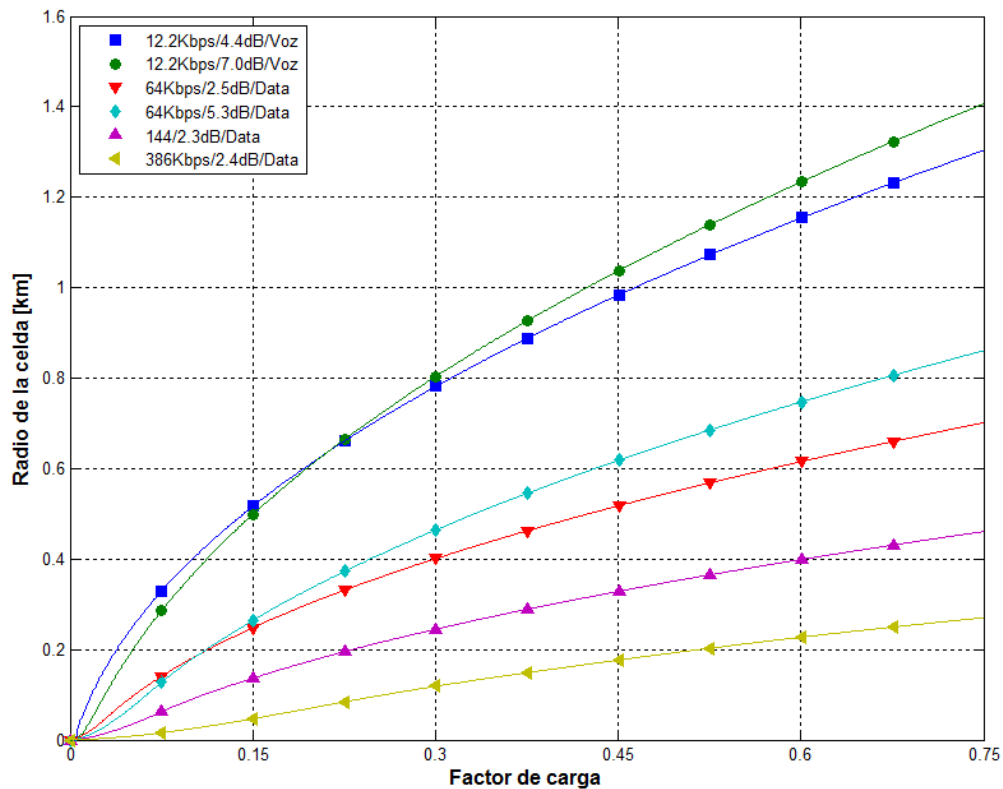
*Spline* es una función polinómica suficientemente suave que está definida por tramos, y posee un alto grado de suavidad en los lugares donde las piezas polinómicas se conectan, llamados *knots*. Consideremos la secuencia finita de puntos (*knots*)  $t_1, \dots, t_J$ , una función spline de orden  $p$  es una función  $(p-1)$  continuamente diferenciable tal que su restricción para cada uno de los intervalos  $(-\infty, t_1], [t_1, t_2], \dots, [t_{J-1}, t_J], [t_J, +\infty)$  es una función polinómica de orden  $p$ . Cualquier

función spline  $s(x)$  de orden  $p$  con *knots*  $t_1, \dots, t_J$  puede representarse como (Fan & Yao, 2005):

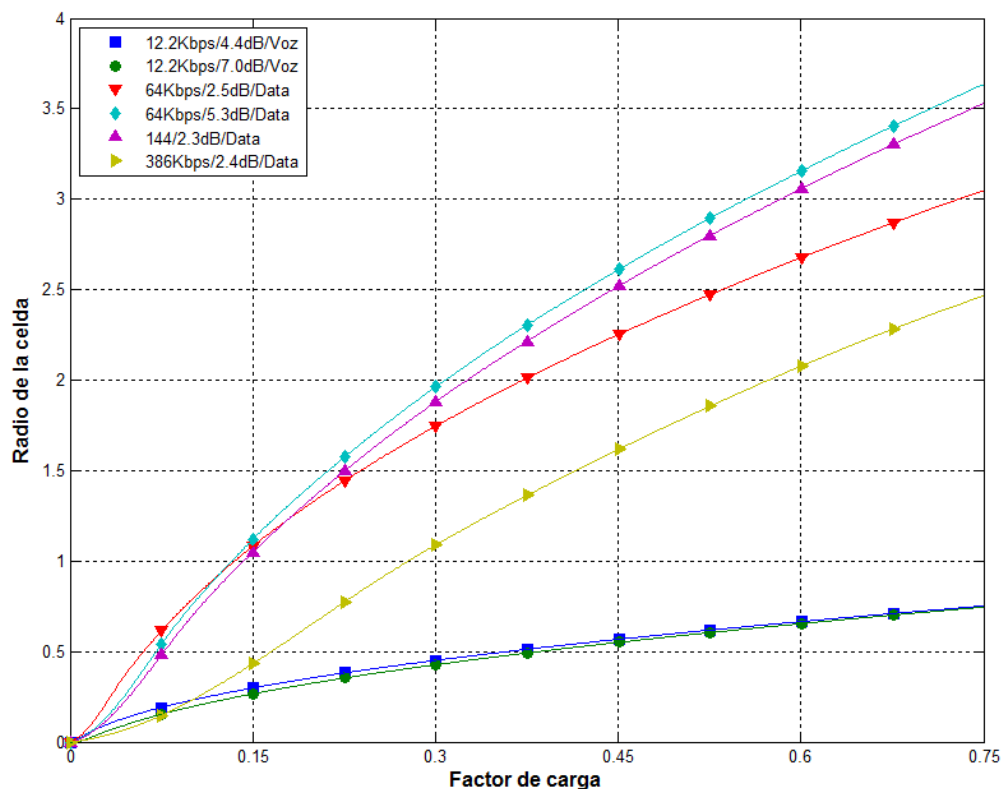
$$s(x) = \sum_{j=1}^{J+p+1} \beta_j S_j(x) \quad (41)$$

$$\begin{cases} S_j(x) = (x - t_j)^p, & j = 1, \dots, J \\ S_{J+j}(x) = x^{j-1}, & j = 1, \dots, p+1 \end{cases} \quad (42)$$

La caracterización final del modelo del radio de la celda por capacidad utilizando el método de ajuste de curvas spline cúbico para las dos figuras de tráfico, se muestra en la Figura 19 y Figura 20:



**Figura 19. Radios de celda obtenidos por modelo de capacidad con tráfico balanceado para cada uno de los servicios estudiados bajo el comportamiento del factor de carga individual utilizando el ajuste de curvas spline cúbico.**



**Figura 20. Radios de celda obtenidos por modelo de capacidad con tráfico no balanceado para cada uno de los servicios estudiados bajo el comportamiento del factor de carga individual utilizando el ajuste de curvas spline cúbico.(Fuente: diseño autor)**

Una vez finalizado el proceso de caracterización y estudio del modelado puntualmente, implementamos las cuatro técnicas heurísticas descritas en el Capítulo IV.

## V.5. Resultados de optimización por técnicas heurísticas

Para poner a prueba el comportamiento de nuestras heurísticas, construimos ocho escenarios de simulación con combinaciones de servicios y figuras de tráfico distintas. Definimos mezclas de dos, tres y cuatro servicios

donde cada mezcla cuenta con una prueba de tráfico balanceado y no balanceado.

**Tabla VII. Escenarios de simulación con mezcla de servicios y tipo de tráfico.**

<b>Escenario</b>	<b>Servicios</b>	<b>Tipo de tráfico</b>
<b>1</b>	$S_1, S_3$	Balanceado
<b>2</b>	$S_1, S_3$	No balanceado
<b>3</b>	$S_1, S_3, S_5$	Balanceado
<b>4</b>	$S_1, S_3, S_5$	No balanceado
<b>5</b>	$S_1, S_2, S_3, S_4$	Balanceado
<b>6</b>	$S_1, S_2, S_3, S_4$	No balanceado
<b>7</b>	$S_1, S_3, S_5, S_6$	Balanceado
<b>8</b>	$S_1, S_3, S_5, S_6$	No balanceado

Los escenarios de simulación consisten en la puesta en marcha de los algoritmos definidos en el Capítulo IV, respondiendo al comportamiento del modelado matemático. Las simulaciones consisten en una muestra instantánea del estado de un escenario macro celular urbano definido con los parámetros descritos en el punto anterior; por lo que, cualquier variación de ellos, debe responderse con una simulación y optimización completa.

Los resultados de implementación de los radios de la celda para las cuatro heurísticas sobre los escenarios anteriores se muestran en la Tabla VIII y Figura 21. Cabe mencionar que el valor mostrado corresponde al radio menor obtenido por cada una de las heurísticas sobre la mezcla de servicios, correspondiendo así, al radio de la celda. Además, todas las heurísticas satisfacen la restricción del radio máximo de cobertura del modelo de propagación, sosteniendo la condición de máxima capacidad al 75% ó 6.02dB de interferencia.

Tabla VIII. Resultados de optimización del radio de la celda mínimo en Km por las cuatro heurísticas para los ocho escenarios.

	Esc.1	Esc.2	Esc.3	Esc.4	Esc.5	Esc.6	Esc.7	Esc.8
<b>Heurística Iterativa</b>	0.6040	0.7157	0.3505	0.6872	0.4252	0.4816	0.2088	0.6510
<b>Algoritmo Reducido</b>	0.6021	0.7156	0.3465	0.6861	0.4037	0.4641	0.2052	0.5769
<b>Heurística Combinada</b>	0.6040	0.7158	0.3505	0.6872	0.4252	0.4816	0.2088	0.6510
<b>Algoritmo Genético</b>	0.6038	0.6971	0.3319	0.6214	0.4153	0.3679	0.1891	0.5166

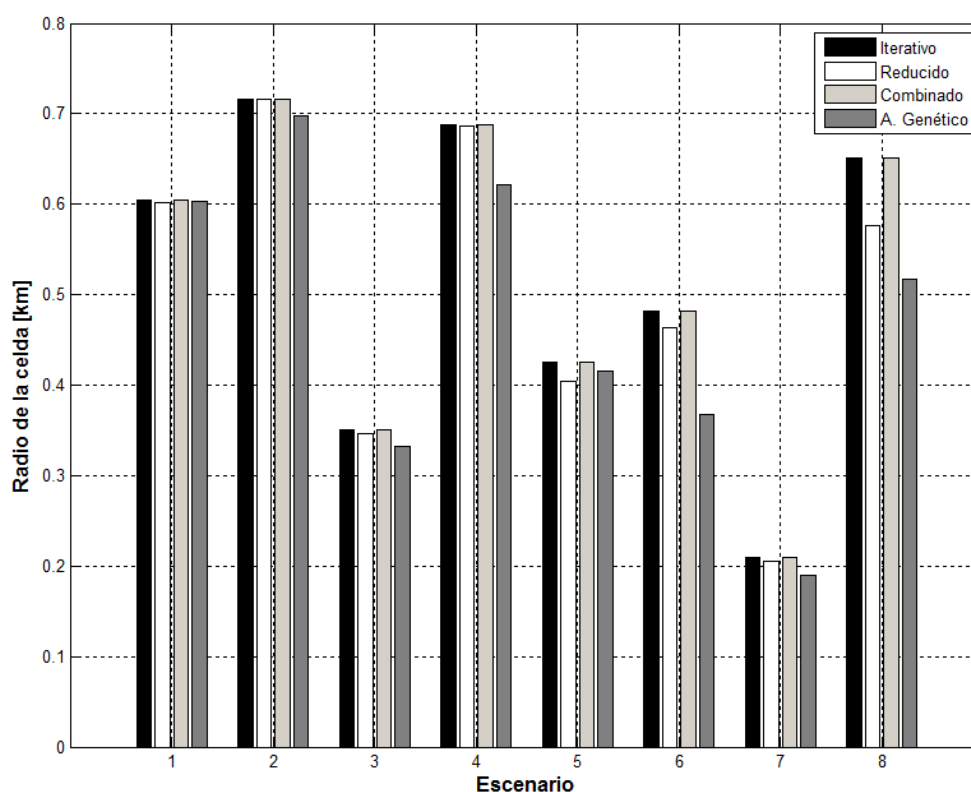


Figura 21. Optimización del radio de la celda para cada uno de los escenario de simulación y tipos de tráfico.

El grado de optimización lo medimos, como lo mencionamos antes, con el valor de la función objetivo o de aptitud (28). Además de mencionar el número de iteraciones que requirió cada uno de los algoritmos, con excepción del algoritmo

reducido que no es iterativo, y el algoritmo genético que lo ejecutamos dentro de un máximo de 5000 iteraciones para todos los escenarios. Mostramos los mejores valores obtenidos en las simulaciones, principalmente debido a las soluciones inestables o subóptimas que el algoritmo iterativo llega a obtener al depender de una solución inicial completamente aleatoria. Además, el algoritmo genético depende sumamente de los valores aleatorios generados en la población inicial, por lo que únicamente logrará la mejor combinación de factores de carga sin corrección de los mismos.

**Tabla IX. Valor de la función objetivo de la solución para cada uno de los escenarios de simulación.**

	Esc.1	Esc.2	Esc.3	Esc.4	Esc.5	Esc.6	Esc.7	Esc.8
<b>Heurística Iterativa</b>	4.89E-06	0.0006	9.92E-06	4.93E-05	3.70E-05	0.0002	2.78E-05	0.0003
<b>Algoritmo Reducido</b>	0.0024	0.0023	0.0027	0.0091	0.0236	0.0147	0.0018	0.0529
<b>Heurística Combinada</b>	4.76E-06	6.10E-06	1.96E-06	4.92E-05	3.63E-05	6.07E-05	3.62E-05	0.0003
<b>Algoritmo Genético</b>	8.55E-06	0.2260	0.0227	0.2120	0.0028	0.1942	0.0724	0.1719

**Tabla X. Número de iteraciones necesarias por cada heurística para alcanzar su mejor solución.**

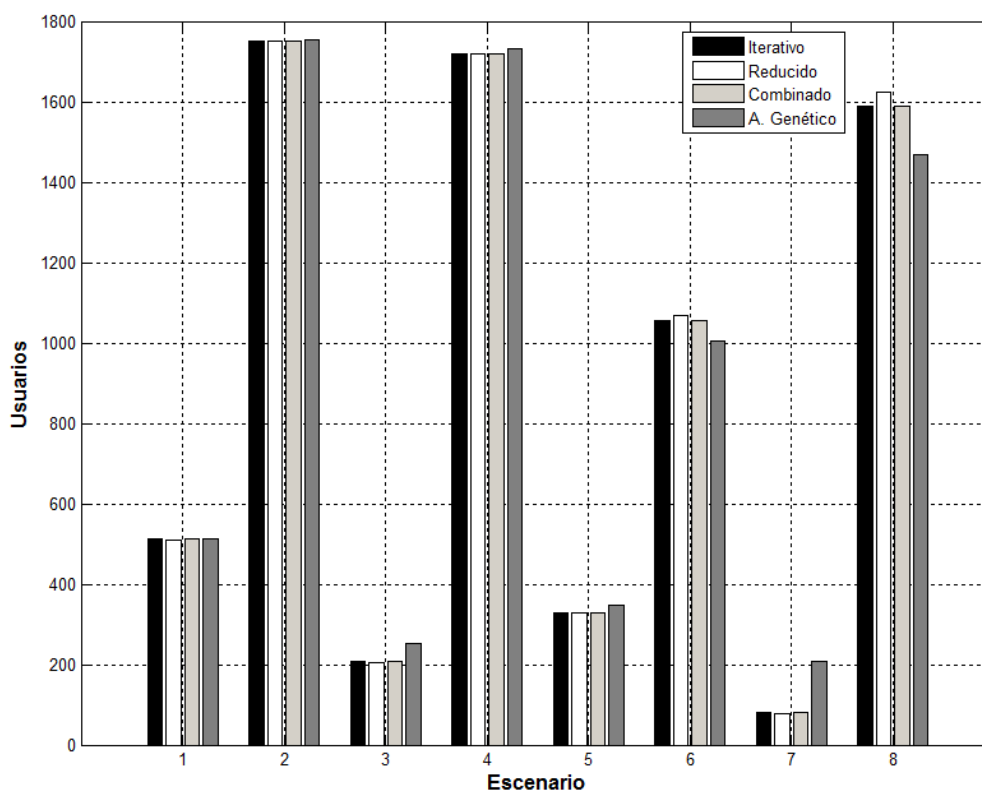
	Esc.1	Esc.2	Esc.3	Esc.4	Esc.5	Esc.6	Esc.7	Esc.8
<b>Heurística Iterativa</b>	4	17	6	11	5	11	7	10
<b>Heurística Combinada</b>	1	1	1	1	2	3	2	3

En las dos tablas anteriores podemos observar cómo el entregar una solución inicial a la heurística iterativa a partir del algoritmo reducido, base del funcionamiento de la heurística combinada, demuestra como la convergencia a una mejor solución es clara, además de mejorar considerablemente la aptitud de los resultados, aunque para los escenarios con servicios más restrictivos, el resultado fue invariante, o bien, con una mínima mejora.

La calidad de las soluciones, como podemos apreciar, está muy por debajo del valor mínimo esperado de 0.01, que se ve reflejado en los resultado de los radios de celda cuyas diferencias de radios contiguos es de apenas unos cuantos metros. Por otra parte, los mejores resultados se obtuvieron por la heurística combinada, muy similares a los alcanzados por la heurística iterativa y con una fuerte mejora por sobre el algoritmo reducido, mientras que el algoritmo genético logró resultados similares en todos los casos asegurando una validez de las heurísticas al demostrar que nos encontrábamos dentro de la región de solución. Para los casos de escenarios 4, 6 y 8 sus resultados contaban con una ligera pero notable diferencia con las demás heurísticas, esto debido a que la descendencia generada no cuenta con reajuste de factor de carga, pero cumple con su función de validación de solución.

También es conveniente mostrar el comportamiento del número de usuarios dentro de la optimización del radio de la celda, la cual es la siguiente:

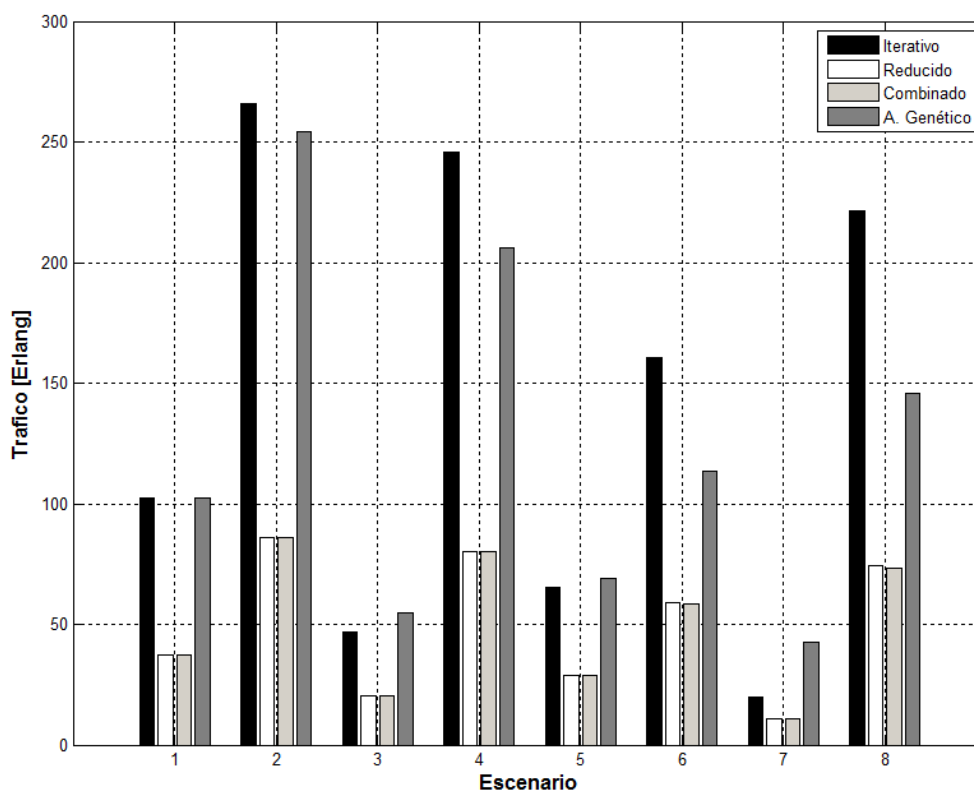




**Figura 22. Número de usuarios atendidos con todos los servicios dentro de la celda con radio optimizado por cada heurística para cada escenario de simulación.**

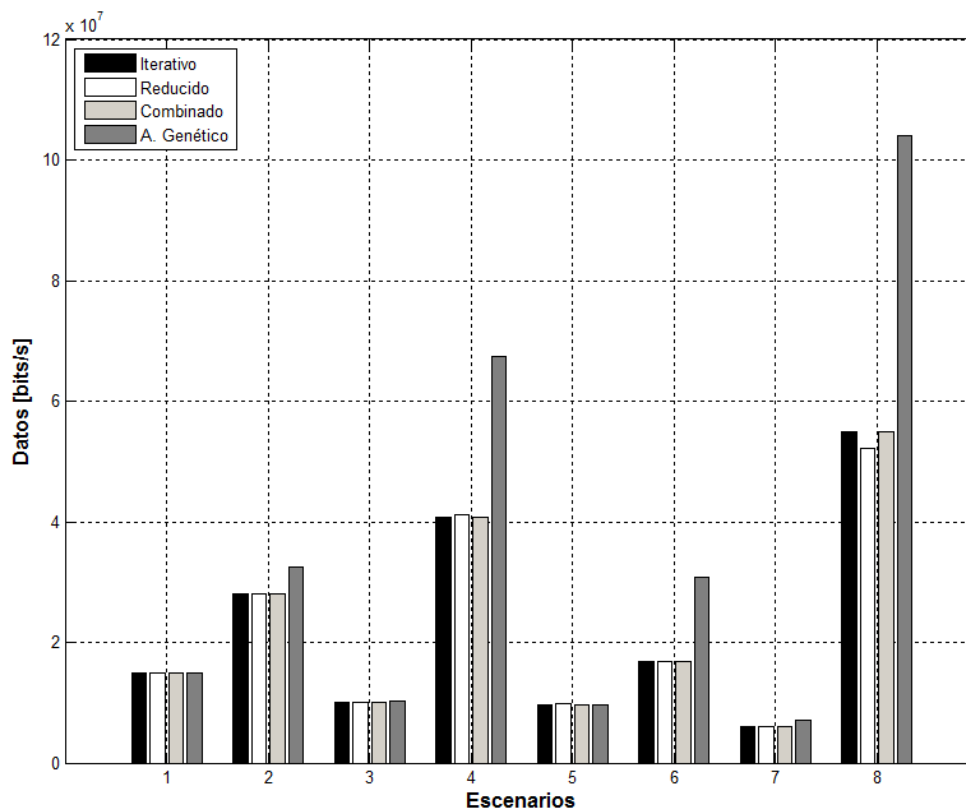
En la Figura 22, podemos apreciar cómo en los servicios con tráfico no balanceado, el número de usuarios es considerablemente superior a los casos con tráfico balanceado. Esto se debe a que son los servicios de voz los dominantes del tráfico de la celda, siendo estos los que cuentan con menor restricción de capacidad y, por lo tanto, satisfacen en mayor medida la demanda de tráfico; sin embargo, el radio de celda dominante no es gracias a los servicios de voz, sino a los de tasas de transmisión superiores debido a que el nivel de interferencia para ellos es mucho menor en comparación con los de voz (véase modelo de capacidad Figura 20).

El tráfico total ofrecido por la celda obtenido por cada una de las optimizaciones correspondiente a los escenarios de simulación, se muestra en la Figura 23.



**Figura 23. Tráfico total ofrecido con radio de la celda optimizado para cada uno de los escenarios de simulación y heurísticas.**

A pesar de que los mejores valores de optimización de radios de celda fueron obtenidos por las heurísticas combinada y reducida, son la heurística iterativa y el algoritmo genético quienes obtuvieron las mejores condiciones de tráfico. Sin embargo, en términos de caudal eficaz ofrecido en tasa de datos, se debe considerar el tipo de servicio y sus características de caudal eficaz individual (véase Tabla V), con lo que se observa que el resultado del tráfico obtenido entre las heurísticas es muy similar, confirmando nuevamente una vecindad de solución entre los algoritmos.



**Figura 24. Caudal eficaz total ofrecido para el radio de la celda optimizado por escenario de simulación y heurística.**

Además, podemos concluir que la diferencia entre los valores generados está relacionada con la calidad de la solución obtenida. En el caso del algoritmo genético, los escenarios cuatro, seis y ocho generaron un valor de la función objetivo baja (véase Tabla IX), reflejado en una discrepancia notable de valores para estos escenarios.

## V.6. Conclusiones

En este capítulo definimos nuestro escenario de simulación bajo los parámetros restrictores y las características de cada uno de los servicios que detallarán nuestra celda WCDMA. Propusimos validar el comportamiento de

nuestras 4 heurísticas con 8 escenarios consistentes de mezclas de servicios y tipo de tráfico. Demostramos cómo todos los algoritmos alcanzaron un grado de optimización elevado para cada uno de los escenarios, con excepción del algoritmo genético cuyas soluciones resultaron subóptimas, pero confirmaron la vecindad de solución al obtener valores de radios de celda comparables con las demás heurísticas. Además, mostramos el número de usuarios a los que se les prestará servicio para la optimización encontrando que para el caso no balanceado, se obtienen los mejores valores tanto de usuarios como de radio de celda; sin embargo, bajo el compromiso de que sean los servicios de voz los que cuenten con el mayor peso del tráfico total ofrecido. Así, los escenarios balanceados son capaces de prestar servicios con mayores tasas de transmisión pero reduciendo la cobertura y el caudal eficaz total de la celda.

En el siguiente y último capítulo de esta tesis, tendremos una discusión más profunda de los resultados obtenidos y las conclusiones de este trabajo de tesis, además de comparaciones de los resultados obtenidos con los reportados en la literatura.

## Capítulo VI

---

### Discusión, conclusiones y trabajo a futuro

---

#### VI.1. Objetivo del capítulo

En este capítulo final, presentamos las principales conclusiones generados en este trabajo de investigación, así como los objetivos alcanzados y aquellos que se replantean para un trabajo posterior a esta tesis. Las conclusiones engloban el logro de alcanzar el principal objetivo de esta tesis que consiste en la optimización del radio de la celda en una red celular basada en WCDMA, cuyo análisis de solución lo hicimos mediante la implementación de técnicas heurísticas adaptadas al escenario de tercera generación mostrando métricas de desempeño de las mismas con respecto a la solución del radio de la celda en un ambiente multiservicio. Agregamos un análisis numérico relacionado con el número de usuarios a los que se les presta servicio dentro de la cobertura de la estación base, métricas del tráfico ofrecido y de caudal eficaz total, con lo que se extienden los objetivos del estudio original mostrando resultados no reportados en la literatura de conocimiento del autor. Y por último, los resultados muestran la capacidad de expandir este trabajo de investigación hacia líneas de investigación adicionales que otorguen herramientas de solución a los problemas generados dentro de la complejidad de la planificación celular.

## VI.2. Sobre la planificación celular en WCDMA

En el principio de esta tesis, se describió en detalle las fases del proceso de planificación celular para la implementación de una red móvil. Encontramos como cada uno de los puntos que debe cubrir sumados a la cantidad de información que debe recabar para dar satisfacción a cada una de las demandas del proceso e, inclusive, del operado celular, convierten la planificación celular en un proyecto complejo y exhaustivo, demandándole optimización de tiempo y costos tanto en su ejecución como en el de sus resultados. Además, debe considerar la asignación de frecuencias y los detalles del tipo de tecnología que ha de utilizar para el acceso al canal radio y poder satisfacer las necesidades de calidad de servicio que define el operado celular.

Observamos como la misma planificación nos exigió tener una clara definición de los conceptos de cobertura y capacidad, que nos lleva a considerar los parámetros de tráfico, características del escenario de implementación como es densidad de usuarios, tipo de modelo de propagación más adecuado, potencias de transmisión, etc.; además de las características propias de cada una de las estaciones base que tendrán un gran impacto final en la calidad de servicio prestado y la cantidad de tráfico soportado por la red. Llevándonos así, a exigir una concepción clara de la tecnología Wideband Code Division Multiple Access

Podemos puntualizar las siguientes conclusiones:

- Conforme los sistemas de telecomunicaciones fueron demandando mayor capacidad, las tecnologías evolucionaron de tal forma que se pudiera satisfacer la demanda de servicio por los usuarios mientras se satisfacen los indicadores de calidad y demanda de parámetros de cobertura, costos y tiempos de implementación del operador celular.
- Esto llevo a que el desarrollo de las tecnologías generaran un compromiso y una fuerte influencia entre cobertura y capacidad dentro de las redes celulares. WCDMA demostró contar con compromisos entre los niveles de

interferencia generados por los usuarios de tal forma que es necesario adaptar los modelos de planificación para mantener el grado de confiabilidad del sistema y calidad de servicio, mientras se maximiza la cobertura y la capacidad del mismo.

- Conocer las fases de la planificación celular y el proceso extenso que, aplicado al escenario WCDMA, clarifica no sólo el potencial de la optimización de la cobertura y capacidad y sus compromisos, sino el impacto que tendría en la implementación completa de la red, ya que el control directo del número de estaciones base instaladas, así como la instrumentación y equipos necesarios para su funcionamiento y mantenimiento, se ven reflejado en los costos de la puesta en marcha de la red e inclusive en la calidad del servicio prestado; justificando así, no sólo la importancia de generar una herramienta eficiente de apoyo a la planificación celular, sino lo crucial de optimizar los compromisos que se encuentran dentro de los parámetros de los sistemas de tercera generación.

### **VI.3. Sobre el modelado matemático en el cálculo del radio celular**

En el Capítulo III, abordamos la metodología matemática necesaria para enfrentar el problema de la optimización del radio de la celda. De forma lógica y secuencialmente, corroboramos la influencia de los usuarios dentro de la celda con el nivel de interferencia total, influenciando considerablemente la cobertura debido a la relación con las expresiones de margen de interferencia y factor de carga.

De forma más precisa, concluimos de esta sección lo siguiente:

- El modelo empírico de pérdidas por propagación COST-231 Okumura-Hata en conjunto con el presupuesto de enlace establecen el comportamiento principal de las restricciones de transmisión de señal en el canal de comunicaciones, es decir, mientras se establecían las características mínimas para la propagación de la señal, se establecía el máximo alcance posible de la estación base, es decir, el radio de la celda por propagación.
- Encontramos como es el margen de interferencia el parámetro principal relacionado con el modelo de capacidad al establecerse la expresión que define el comportamiento del factor de carga en función del margen de interferencia, es decir, de las conexiones activas que aportan tráfico a la red.
- Pudimos ver cómo es que la necesidad de un modelo de tráfico que haga consideración de la probabilidad de bloqueo de llamadas con un cierto número de conexiones activas, determina el tráfico total ofrecido a su vez que el número de usuarios, que inherentemente es determinado por el factor de carga.
- Concluimos como el radio por capacidad restringe considerablemente la cobertura al buscar satisfacer el modelo de tráfico y las condiciones de densidad de usuarios de la celda en cuestión, siendo este un parámetro final sumamente influyente en el resultado final del modelo.
- Finalmente, siendo el factor de carga el principal parámetro de enlace entre los dos modelos que nos estableció nuestro espacio de búsqueda de solución, logramos concentrar nuestro problema de optimización en dos problemas que analizaremos con nuestra caracterización de modelo y con heurísticas, es decir, un problema interno de balanceo de factores de carga individuales asignados a cada uno de los servicios de la estación base definida, y un problema externo que en dado caso de no contar con una solución adecuada dentro del problema interno (ya sea en términos de factibilidad de solución o resultados fuera de la cobertura posible por propagación) ajustamos nuestro margen de interferencia.



## **VI.4. Sobre técnicas heurísticas aplicadas a la optimización del radio celular**

Una vez definido el modelado matemático que caracterizará nuestro espacio de búsqueda de solución para la optimización del radio de la celda, el siguiente paso fue definir las técnicas heurísticas que implementaríamos. Inclusive, no sólo definir las sino también agregar las expresiones que adecuaban su comportamiento a un escenario WCDMA. Las conclusiones que generamos de este capítulo son las siguientes:

- Establecer un parámetro de medida de la aptitud o calidad de la solución, establece un criterio de convergencia adaptable a todas las heurísticas sin necesidad de un ajuste adicional de adaptabilidad. Además, que un criterio de convergencia de un valor mínimo de optimización esperado, asegura que el comportamiento de las heurísticas fuera tal que no finalizaría hasta encontrar un resultado apropiado.
- Para acelerar el funcionamiento y definición de los algoritmos, fue necesario establecer el modelo matemático eficientemente, de tal forma que este mismo nos exigió determinar vectores de factores de carga por servicio del escenario en cuestión. Inclusive, el concepto fue lo suficientemente práctico que se adecuó a todas las heurísticas implementadas sin problema.
- La heurística combinada constituyó básicamente una fusión de la heurística iterativa de redistribución del factor de carga y del algoritmo reducido, por lo que era de esperarse un mejor desempeño de antemano.
- El algoritmo genético implementado fue principalmente con fines de demostrar que los resultados se encontraban dentro del espacio de solución adecuado, es decir, aproximadamente iguales a un método validado por la literatura. Sin embargo, no se deja a un lado la importancia de la codificación de los operadores genéticos básicos necesarios.

## VI.5. Sobre el escenario de simulación y discusión de resultados

En el Capítulo V mostramos los resultados más importantes de este trabajo de investigación. Inicialmente caracterizamos el modelo matemático que nos permitió así realizar la codificación adecuada en la definición de los operadores utilizados en las heurísticas de optimización. Mostramos las comparativas entre los resultados arrojados por cada uno de los algoritmos corroborando de esta forma que el objetivo principal de la tesis se ha alcanzado. Además, mostramos las principales aportaciones con respecto al reporte del comportamiento de el número de usuarios a los que se les presta servicio, el tráfico total ofrecido y el caudal eficaz dentro de la celda, constituyendo así comparaciones de métricas no reportadas en conjunto en la literatura de conocimiento del autor.

Concluimos para este capítulo finalmente:

- Debido a que el modelo de tráfico por definición debe contar con valores enteros de número de usuarios, éste mostró un comportamiento cuantizado en el tráfico total ofrecido, y por consiguiente, en el número de usuarios y en el radio de la celda, lo que ocasionó un inconveniente en la búsqueda de solución para todos los algoritmos. Es por esta razón que fue necesario atacar este problema con un método de aproximación por ajuste de curvas que nos permitiría agregar los valores faltantes al espacio de búsqueda de factores de carga. Esta sección de simulación consistió en una búsqueda de un método adecuado de ajuste de curvas, en la que finalmente se implementó que el método *spline*.
- Un modelo cuantizado genera resultados no óptimos en las heurísticas de optimización, presentado conflictos en el caso de los escenarios más restrictivos debido a que los escalones cuantizados son más extensos, lo que ocasionaba que los algoritmos no convergieran adecuadamente a un

valor estable, o bien, un valor óptimo mostrando oscilaciones constantes y sin convergencia.

- La caracterización del escenario demostró que en los escenarios con tráfico no balanceado (donde los servicios de voz cuentan con mayor carga de tráfico), el radio de la celda se ve considerablemente reducido en los servicios de voz debido al aumento considerable de interferencia dentro de ellos. Por lo que, son los servicios de mayor tasa de transmisión los que tienden hacia valores superiores de radio de celda.
- Todas las heurísticas alcanzaron un grado de optimización evaluado con la función objetivo, por debajo del criterio de convergencia inicialmente sugerido de 0.01, alcanzando así resultados considerablemente adecuados debido a la homogeneidad de los radios generados para cada uno de los servicios.
- El algoritmo genético demostró durante el proceso de simulación cómo los resultados obtenidos coincidían con los generados por esta heurística.
- La heurística combinada generó resultados muy similares de radio mínimo en sus mejores soluciones comparados con las demás heurísticas, pero con una aptitud superior confirmando que el aportar una solución inicial al algoritmo genera radios de celda más homogéneos.
- Por otra parte, los escenarios de tráfico no balanceado presentaron los valores más bajos tanto en radios de celda, como en tráfico y en número de usuarios. Esto muestra un compromiso entre el número de usuarios y las altas tasas de transmisión, es decir, no balancear las cargas de tráfico entre los servicios, reduce considerablemente el número de usuarios asignados a los servicios de altas tasas de transmisión mientras se da un peso mayor de carga hacia los servicios de voz, aumentando además el radio de la celda debido a que la restricción de radio mínimo se aminora. Por lo tanto, los servicios balanceados cuentan con una asignación mayor de usuarios a cada uno de los servicios; sin embargo, la interferencia generada por los usuarios de los servicios con mayor tasa de transmisión es tal que el radio

del servicio se ve dañado en su magnitud, reduciendo considerablemente el radio total de la celda por radio mínimo.

- Finalmente, logramos el objetivo principal de la tesis de optimizar el radio de la celda utilizando herramientas heurísticas en un proceso de simulación detallado bajo la definición de distintos escenarios de tráfico que buscan abarcar una variedad de mezclas de servicios en una estación base. Además, hicimos un análisis de los resultados y compromisos generados por los algoritmos, demostrando cómo reportamos información obtenida más allá de la esperada.

## **VI.6. Trabajo a futuro**

El trabajo de investigación entra en un área sumamente extensa y compleja que es la planificación celular, por lo que la posibilidad de adecuar las técnicas de optimización a un escenario más real o ajustes a los parámetros y métodos implementados, dan lugar a nuevas líneas de investigación que bien resultan complemento para esta tesis.

Entre ellas podemos mencionar las siguientes:

- El análisis del modelo de propagación permite la elección y estudio de modelos empíricos distintos a los utilizados en este trabajo. Esto permite que se analicen las prestaciones de la investigación hacia escenarios con características urbanas distintas a las estudiadas, además que de esta forma también se compara el comportamiento de las heurísticas.
- La utilización de heurísticas distintas a las implementadas corresponde a una expansión de este trabajo de optimización del radio de la celda, a pesar de que solamente se utilizaron heurísticas, siempre queda abierta la puerta hacia el estudio de las prestaciones que otorgarían algoritmos metaheurísticas más especializados y adecuados al modelo matemático

utilizado. Sería sumamente interesante realizar un análisis adicional con un modelo de tráfico distinto, tal como el modelo de Engset (Rappaport, 2002), principalmente debido a la naturaleza del modelo de Erlang, que aunque lleva el comportamiento de tráfico hacia valores sobreestimados, es decir, el peor de los escenarios, considerar un modelo más preciso, debería mostrar comportamientos sino mejores en términos de radio de celda, mejores en lo posible en términos de número de usuarios y tráfico total ofrecido.

- En este trabajo se toman consideraciones arbitrarias de ajuste de curvas, por lo que aunque sólo se hizo uso de dichos modelos como meras herramientas de simulación que adecuaron el modelo utilizado, realizar un análisis más profundo en este aspecto adicionando métodos de redistribución al factor de carga en la primera heurística, llevaría este trabajo hacia un análisis más profundo precisando en soluciones más confiables.

Finalmente, debido a la relación de esta tesis con el proceso de planificación celular y con trabajos de investigación anteriores, desarrollar una herramienta de simulación tal que permita desarrollar un análisis de la implementación de una red celular, ya no sólo para tecnologías de tercera generación sino ir más allá, resultaría en un proyecto que abarque tanto la optimización del radio de la celda como del emplazamiento de estaciones base sobre un área geográfica establecida generando un análisis de las prestaciones principales de la red en un proceso de simulación preciso y completo. Esto resultaría en una herramienta poderosa y práctica en una línea de investigación en constante flujo y demanda por parte de los operadores celulares.

## Referencias

---

Andrade Reatiga, A. G. (2005). *Metodología para la evaluación técnica y económica de sistemas móviles celulares de tercera generación (Tesis de Doctorado)*. CICESE, Ensenada, Baja California, México.

Boyd, S. P. (2009). *Convex optimization* (7° ed.). Cambridge University Press.

Burley, S. (2001). Downlink capacity estimation in a WCDMA. *Proceedings of the 12th IEEE International*, vol. 1, pp. A26–A30.

Cátedra, M. F., & Pérez-Arriaga, J. (1999). *Cell planning for wireless communications*. Artech House.

ChetanSharman. (2011). State of the global mobile industry. *Half Yarly Assessment* (pág. 56). Seattle, E.E. U.U.: Chetan Sharma Consulting.

d'Avila, C., & Yacoub, M. (1998). Reuse efficiency for non-uniform traffic distributions in CDMA systems. *IEE Electronics Letters*, 34 (12), 1293-1294.

Dihan, E., Kurochin, A., & Kettani, S. (2002). UMTS radio interface system planning and optimiztion. *Bechtel Telecommunications Technical Journal*, 1 (1), 1-10.

Eiben, A., & Smith, J. (2007). *Introduction to evolutionary computing*. Springer.

Fan, J., & Yao, Q. (2005). *Nonlinear time series: nonparametric and parametric methods*. Springer.

Figueras, A. P., & Saenz, S. S. (2006). Cell size determination in WCDMA systems using an evolutionary programming approach. *Elvesier Preprint*, 35 (12).

Gilhouse, K., Jacobs, I., Padovani, R., Viterbi, A., & Weaver, L. (1991). On the capacity of a cellular CDMA system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 40 (2), pp. 303-312.

Hamad-Ameen, J. J. (2008). Cell planning in GSM mobile. *WSEAS TRANSACTIONS on COMMUNICATIONS*, 7 (5), 393-398.

Hanus, S., & Ruzicka, Z. (2005). Radio network dimensioning in UMTS network planning process. In proceedings of the IEEE 18th International Conference on Applied Electromagnetics and Commnications (ICECom'05).

Holma, H., & Toskala, A. (2004). *WCDMA for UMTS. Radio acces for third generetion mobile communications* (4° ed.). Wiley.

Jagerman, D. L. (1974). Some properties of the erlang loss function. *The Bell System Technical Journal* , 53 (3), 525-551.

Laiho, J., Wacker, A., & Novosad, T. (2002). *Radio network planning and optimisation for UMTS* (2° ed.). England: Wiley.

Lin, H.-P., Juang, R.-T., Lin, D.-B., Ke, C.-Y., & Wang, Y. (2004). Cell planning scheme for WCDMA systems using genetic algorithm and measured background noise floor. *IEE Proceedings Communications* , Vol. 151, sec. 6. 595-600.

Lindberger, K. (1944). Dimensioning and design methods for integrated (ITC '94), vol. 14,. *Proceedings of the International* , pp. 897–906.

Mishra, A. R. (2007). *Advance cellular network planning and optimisation. 2G/2.5G/3G... Evolution to 4G*. Wiley.

Niemelä, J. (2006). *Aspects of radio network topology planning in cellular WCDMA (Tesis de doctorado)*. Tempere University of Technology, Tampere, Finlandia.

Polya, G. (1973). *How To Solve It. A new aspect of mathematical methot* (2° ed.). Princeton University Press.

Portilla-Figueras, A., Salcedo-Sanz, S., Hackbarth, K. D., López-Ferreras, F., & Esteve-Asenslo, G. (2009). Novel heuristics for cell radius determinations in WCDMA systems and their applications to strategic planning studies. *EURASIP Journal onWireless Communications and Networking* , 2009 (32), 1-14.

Rappaport, T. S. (2002). *Wireless comunications principles and practice*. Prentice Hall, Inc.

Sivanandam, S. N., & Deepa, S. N. (2008). *Introduction to genetic algorithms*. Berlin: Springer.

Soto Olivares, C. Y. (2010). *Optimizaci3n estoc3stica aplicada al emplazamiento de estaciones base en comunicaciones m3viles celulares (Tesis de maestría)*. CICESE, Baja California, M3xico.