

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“Diseño e implementación de un algoritmo para asignación de
HSN que minimice el nivel de interferencia de las redes GSM”

TESIS DE GRADO

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

Presentada por:

Xavier Rodolfo Franco Rodríguez

GUAYAQUIL – ECUADOR

2007

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la fuerza que me ha dado en todos estos años de estudio. Agradezco a mi madre por su constante e incondicional apoyo para lograr mis metas.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Holger Cevallos

SUB-DECANO DE LA FIEC

PRESIDENTE

Ing. Carlos Monsalve

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Rebeca Estrada

VOCAL

Ing. Germán Vargas

VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Xavier Franco

RESUMEN

El presente trabajo describe el diseño e implementación de un algoritmo para la asignación de HSN en una red celular GSM, siendo el principal objetivo la optimización del desempeño de la capa de saltos en la red mediante la reducción de la interferencia provocada por el reuso de frecuencias. Este proyecto propone desarrollar una herramienta que permita crear un plan de HSN para un conjunto de celdas dado, minimizando el número de colisiones co-canal, consiguiendo de esta manera ganancias en los indicadores de calidad con respecto a una red en la que no se ha optimizado la asignación de HSN.

La herramienta propuesta se fundamenta en los conceptos de los algoritmos genéricos de optimización, por lo que su funcionamiento radica en la minimización de una función de costos, cuyos factores representan información estadística de la propia red. El plan generado se evaluó mediante simulaciones dinámicas de una red real y se muestran las ganancias que se obtuvieron tanto en calidad como en capacidad con respecto a los indicadores de calidad que se logran con un plan de HSN generado mediante un algoritmo tradicional.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	V
ÍNDICE GENERAL	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
ABREVIATURAS	XIV
INTRODUCCIÓN.....	1
1. EL CONCEPTO DE SISTEMA CELULAR	4
1.1 El Sistema Celular y El Reuso de Frecuencias	5
1.2 Movilidad entre celdas.....	6
1.3 Interferencia	8
1.3.1 Interferencia Co-Canal.....	10
1.3.2 Interferencia por Canal Adyacente	11
1.4 Capacidad del Sistema.....	12
2. GENERALIDADES DEL SISTEMA GLOBAL DE COMUNICACIONES	
MÓVILES (GSM).....	17
2.1 Arquitectura del sistema GSM.....	18
2.1.1 La Estación Móvil (MS).....	19
2.1.2 El Subsistema de Estación Base (BSS).....	20
2.1.3 El Subsistema de Conmutación de Red (NSS).....	22
2.1.4 El Subsistema de Administración de la Red (NMS).....	24

2.2	Interfase de aire de GSM	25
2.2.1	Estructura de acceso múltiple	27
2.2.2	Configuración de canales	28
2.3	La capa BCCH y la capa de saltos	35
2.4	Saltos de frecuencia en GSM.....	37
2.4.1	Saltos de frecuencia en banda base.....	41
2.4.2	Saltos de frecuencia sintetizados	42
2.5	Indicadores de calidad	44
2.5.1	Tasa de llamadas caídas (DCR).....	44
2.5.2	Calidad de recepción (RX QUAL)	46
2.5.3	Tasa de error de trama (FER).....	47
2.6	Carga efectiva de frecuencia (EFL).....	49
2.7	Criterio para evaluar Indicadores de Calidad (KPI)	51
3.	OPTIMIZACIÓN DE LA CAPA DE SALTOS DE UNA RED GSM	54
3.1	Descripción del plan de frecuencias para la capa de saltos	55
3.2	¿Por qué optimizar la capa de saltos de una red?	59
3.3	Influencia del HSN en el desempeño de la capa de saltos.....	62
3.4	Planteamiento del problema de asignación de HSN	66
4.	ALGORITMO PROPUESTO PARA ASIGNACIÓN DE HSN	69
4.1	Información requerida y mediciones de campo realizadas.....	69
4.2	Bases para el desarrollo del algoritmo	78
4.3	Diagramas de flujo	82

4.4 Descripción funcional	89
4.5 Fortalezas y debilidades del algoritmo propuesto	96
5. DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR SMART	99
5.1 Generalidades del SMART	99
5.2 Funcionalidades de GSM modeladas.....	102
5.3 Descripción de los servicios simulados	107
5.3.1 Servicios de voz.....	107
5.3.2 Servicios de datos GPRS	108
5.3.3 Modo de transferencia dual (DTM)	109
5.3.4 Calidad de Servicio Mejorada (EQoS)	110
5.4 Simulación de una red real.....	110
5.4.1 Información requerida	111
5.4.2 Proceso para simular una red real.....	113
5.5 Estadísticas que ofrece el simulador SMART	116
6. EVALUACIÓN DE RESULTADOS	120
6.1 Descripción de la red evaluada	121
6.2 Simulaciones realizadas.....	122
6.3 Resultados de las simulaciones	124
6.3.1 Resultados en DCR	129
6.3.2 Resultados en RXQUAL	130
6.3.3 Resultados en FER.....	134
6.4 Conclusiones de las simulaciones.....	137

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	139
APÉNDICES.....	142
APÉNDICE A: ALGORITMO DE SALTO DE FRECUENCIAS DE GSM.	143
APÉNDICE B: LISTA DE PUBLICACIONES BASADAS EN SMART	145
BIBLIOGRAFÍA.....	150

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 : Reuso de frecuencias en una red celular.....	6
Figura 1.2 : Escenario de handover en el límite de celda.	8
Figura 1.3 : Celdas Co-canal.	11
Figura 1.4: Celdas adyacentes por canal.....	12
Figura 1.5: Radio de celda y distancia entre celdas co-canal.	14
Figura 2.1: Subsistemas e interfases de GSM (6).	19
Figura 2.2: La estación móvil.	20
Figura 2.3: Elementos del BSS (6).....	22
Figura 2.4: Elementos del NSS y sus funciones (6).....	22
Figura 2.5: Partes del NMS (6).	25
Figura 2.6: Enlace ascendente y descendente.	26
Figura 2.7: Estructura FDMA y TDMA (9).	28
Figura 2.8: Canales lógicos.	30
Figura 2.9: Estructura jerárquica de las tramas de GSM (6).....	34
Figura 2.10: Alineamiento aleatorio de tramas TDMA.	34
Figura 2.11: Alineamiento sincronizado de tramas TDMA.	35
Figura 2.12 : Salto de frecuencias	38
Figura 2.13: Algoritmo de Saltos de frecuencia en GSM.	41
Figura 2.14: Saltos de frecuencia en banda base (9).	42
Figura 2.15: Saltos de frecuencia sintetizados (9).	43

Figura 2.16: Saltos de frecuencia banda base y sintetizado (4).	43
Figura 2.17: Sistema con 6 portadoras y 5 ranuras de tiempo de tráfico.....	50
Figura 2.18: Evaluación de ganancias en calidad y capacidad.....	51
Figura 3.1 : UL FER para una red real (12).	60
Figura 3.2: DCR vs. EFL para una red.....	62
Figura 3.3: Colisiones co-canal entre dos sectores en función del HSN.....	64
Figura 3.4: Colisiones co-canal entre tres sectores.	65
Figura 3.5: Asignación de HSN por sector.....	66
Figura 3.6: Asignación de HSN por sitio.	67
Figura 4.1: El móvil reporta celdas interferentes.....	72
Figura 4.2: Flujo de las mediciones reportadas por el móvil.	73
Figura 4.3: Generación de la Matriz de Interferencia.	74
Figura 4.4: Ingreso de periodo de mediciones.....	75
Figura 4.5: Selección del tipo de matriz.	75
Figura 4.6 : Selección de BSC.....	76
Figura 4.7: Gráfico de Probabilidad de Interferencia para una celda.	78
Figura 4.8: Programa principal.....	83
Figura 4.9: Cálculo del costo parte 1.	84
Figura 4.10: Cálculo del costo parte 2.	85
Figura 4.11: Asignación de frecuencias.	86
Figura 4.12: Optimización de la función de costos.....	87
Figura 4.13: Selección del sector con mayor costo.....	88

Figura 4.14: Diagrama de bloques del proceso inicial del algoritmo.....	90
Figura 4.15: Diagrama de bloques de la etapa de optimización.	93
Figura 4.16: Costo total en función del intento de optimización.....	95
Figura 5.1: Propagación de una red real en <i>NuSpede</i>	102
Figura 5.2: Procedimiento para cada paso de simulación.	103
Figura 5.3: Proceso para simular una red real.....	114
Figura 6.1: Área en la que se evaluaron los resultados.	122
Figura 6.2: DCR vs. EFL.....	130
Figura 6.3: UL RXQUAL vs. EFL.	132
Figura 6.4: DL RXQUAL vs. EFL.	133
Figura 6.5: UL FER vs. EFL.....	135
Figura 6.6: DL FER vs. EFL.....	137

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I: Bandas de frecuencias de GSM (6).	26
Tabla II: Clases de RX QUAL (5).	46
Tabla III: Parámetros de la capa de saltos para el sector ESPOLX.	57
Tabla IV: Frecuencias usadas por los transceptores del sector ESPOLX. ...	57
Tabla V: Configuración de la capa de saltos de los sectores.	70
Tabla VI: Ejemplo de matriz de interferencia	77
Tabla VII: Formato en el que se generaron resultados.	124
Tabla VIII: Planes de HSN simulados.	127
Tabla IX: Resultados de las simulaciones.	128
Tabla X: Resumen de ganancias obtenidas.	138

ABREVIATURAS

3GPP	Third Generation Partnership Project
AC	Authentication Center
ADJ	Adjacent
AGCH	Access Grant Channel
AMR FR	Adaptive Multi-Rate Full Rate
AMR HR	Adaptive Multi-Rate Half Rate
AP	Application Part
BCCH	Broadcast Control Channel
BCF	Base Control Function
BCH	Broadcast Channel
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station Subsystem
BTS	Base Transceiver Station
CA	Cell Allocation
CCCH	Common Control Channel
CCH	Control Channel
CP	Communication Part

DCCH	Dedicated Control Channel
DCS	Digital Cellular System
EFL	Effective Frequency Load
EIR	Equipment Identity Register
FACCH	Fast Associated Control Channel
FCCH	Frequency Correction Channel
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FHS	Frequency Hopping System
FN	Frame Number
GSM	Global system for mobile communications
HLR	Home Location Register
HSN	Hopping Sequence Number
KPI	Key Performance Indicator
MA	Mobile Allocation
MAIO	Mobile Allocation Index Offset
ME	Mobile Equipment
MS	Mobile Station
MSC	Mobile Services Switching Centre

NMS	Network Management Subsystem
NSS	Network Subsystem
O&M	Operation and Maintenance
PCH	Paging Channel
PSTN	Public Switched Telephone Network
RACH	Random Access Channel
RF	Radio Frequency
RFN	Reduced Frame Number
RLT	Radio Link Timeout
RTSL	Radio Timeslot
RX	Receiver
SACCH	Slow Associated Control Channel
SCH	Synchronization Channel
SDCCH	Stand Alone Dedicated Control Channel
SFH	Slow Frequency Hopping
SIM	Subscriber Identity Module
TC	Transcoder
TCH	Traffic Channel

TCH/FR	Traffic Channel / Full Rate
TCH/HR	Traffic Channel / Half Rate
TCH/EFR	Traffic Channel / Extended Full Rate
TDMA	Time Division Multiple Access
TN	Timeslot Number
TRX	Transceiver of BTS
TSL	Time Slot
TX	Transceiver
VLR	Visitor Location Register
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access

INTRODUCCIÓN

Desde su aparición, el principal enemigo del crecimiento de los sistemas de comunicaciones por radio frecuencia ha sido la interferencia. Los primeros sistemas de comunicaciones inalámbricos se basaron en un transmisor de gran potencia que cubría un área geográfica muy extensa, imposibilitando así que se tenga otro transmisor usando la misma frecuencia, ya que se interferirían entre si.

El concepto de sistema celular nace precisamente como solución a este problema, en lugar de tener áreas geográficas grandes cubiertas por un solo transmisor, se tiene pequeñas áreas, permitiendo de esta manera que una misma frecuencia se pueda reutilizar en transmisores distantes geográficamente, teniendo lo que se denomina reuso de frecuencias.

Este concepto fue empleado por los sistemas celulares analógicos de primera generación, luego los sistemas digitales de comunicación de segunda generación como GSM añadieron técnicas de espectro ensanchado como los saltos de frecuencia para reducir la interferencia y el desvanecimiento que sufre una señal. Pero con el crecimiento acelerado que ha tenido la demanda por servicios móviles, a los operadores ya no les basta

con usar solamente los saltos de frecuencia para aprovechar mejor el espectro y contrarrestar la interferencia. Más aún, si consideramos que hoy en día están desplegando UMTS como tecnología de tercera generación en sus redes, se ven en la obligación de buscar mecanismos que les permita aumentar la capacidad de sus redes mejorando o conservando la calidad de las mismas. Por lo que constantemente buscan alternativas para disminuir la interferencia que crece a la par con el aumento de usuarios. Una opción muy efectiva para tener un control total sobre la interferencia es contar con una red sincronizada, ya que así se puede conocer las frecuencias empleadas por cada celda en todo momento (1). Desde luego, esto conlleva a crear planes de frecuencia para la capa de saltos bajo condiciones diferentes a las que se emplean en redes no sincronizadas, puesto que con una adecuada asignación de los parámetros se pueden conseguir redes con muy baja cantidad de colisiones.

De todos los parámetros del plan de frecuencias para la capa de saltos, el Número de Secuencia de Saltos (HSN) es el que mayor controversia genera en su asignación, ya que es una entrada a un algoritmo pseudo aleatorio y hasta la actualidad no se ha podido unificar un criterio para la asignación del mismo (2). El presente trabajo analiza el impacto que tiene este parámetro en el desempeño de una red celular y propone un algoritmo para la

asignación de HSN en una red sincronizada en la que se conocen todos los demás parámetros que conforman el plan de frecuencias.

El contenido de este trabajo se ha dividido en seis capítulos: El Capítulo 1 brinda una introducción al concepto celular, resaltando la influencia que tiene la interferencia en la capacidad del sistema. El Capítulo 2 se enfoca en una descripción general de GSM y en la definición de ciertos conceptos indispensables para entender el resto de la tesis. En el Capítulo 3 se plantea la necesidad que se tiene de optimizar el funcionamiento de la capa de saltos de una red, resaltando el impacto que tiene el HSN en el desempeño de la misma. En el Capítulo 4 se describe el algoritmo propuesto, se describen las bases para el desarrollo del mismo, se muestra al lector diagramas de flujo y además se analizan las fortalezas y debilidades que tiene el algoritmo. En el Capítulo 5 se presenta una descripción general del simulador SMART, empleado para evaluar los resultados que se obtienen con el algoritmo. Finalmente en el Capítulo 6 se evalúan los resultados obtenidos comparándolos contra el plan que tiene el operador cuya red fue evaluada.

CAPÍTULO 1

1. EL CONCEPTO DE SISTEMA CELULAR

El objetivo de diseño de los primeros sistemas móviles de radio era conseguir un área de cobertura extensa usando solamente un transmisor de alta potencia montado sobre una torre. Si bien por un lado esto aseguraba una gran cobertura, también significaba que era imposible reusar la misma frecuencia en otra parte del sistema, ya que si otro transmisor la usaba, esto resultaba en interferencia. Considerando este problema, más el hecho de que las agencias gubernamentales no pueden hacer asignaciones de espectro proporcionales al incremento de la demanda por servicios móviles, surgió el concepto de sistema celular que se basa en el reuso de frecuencias. El presente capítulo pretende ser una introducción al concepto celular, explicando en que consiste el reuso de frecuencias, la interferencia y como esta afecta a la capacidad del sistema.

1.1 El Sistema Celular y El Reuso de Frecuencias

Los sistemas de radio celular se basan en el reuso de canales a lo largo de toda un área de cobertura. A cada área geográfica pequeña, denominada celda, se le asigna un grupo de radio canales para ser usados. A las estaciones base en celdas adyacentes se les asigna grupos de canales completamente diferentes. Las antenas de las estaciones base se diseñan para lograr una cobertura deseada dentro de una celda particular. Limitando esta área de cobertura dentro de los límites de una celda, el mismo grupo de canales puede ser usado para cubrir diferentes celdas que están separadas por distancias lo suficientemente grandes como para mantener los niveles de interferencia dentro de los límites tolerables. El proceso de diseño de selección y asignación de canales para todas las estaciones base dentro de un sistema se denomina *planeamiento de frecuencias* o *reuso de frecuencias* (3).

La Figura 1.1 ilustra el concepto de reuso de frecuencias celulares, donde las celdas con la misma letra usan el mismo canal. La forma hexagonal de las celdas es conceptual y es un modelo simple de cobertura, pero ha sido adoptado universalmente a partir de que el hexágono permite un análisis sencillo de un sistema celular. La

cobertura real de una celda es determinada a partir de mediciones de campo o modelos de propagación.

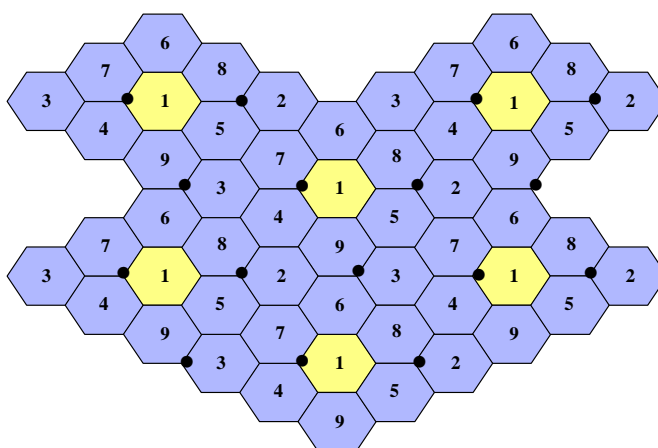


Figura 1.1 : Reuso de frecuencias en una red celular.

El reuso de frecuencias es caracterizado por el *factor de reuso* que indica el tamaño del grupo de celdas en el que cada frecuencia es usada una vez (4). Típicamente este factor es denotado por x/y , donde x es el número de sitios, e y el número de frecuencias que se usan cada x sitios; por lo que un factor de reuso de $3/9$ corresponde a una red con 9 diferentes grupos de frecuencias que son usadas cada tres sitios.

1.2 Movilidad entre celdas

Cuando un móvil se mueve hacia una celda diferente mientras una conversación está en progreso, el sistema automáticamente transfiere la

llamada a un nuevo canal perteneciente a la nueva estación base. Esta operación de transferencia conocida como *handover*, no solo involucra el hecho de identificar una nueva estación base, sino que también requiere que las señales de voz y de control sean asignadas a canales asociados con la nueva estación base (3).

El procesamiento de handovers es una tarea importante en cualquier sistema de radio celular. Las estrategias de handover tienen prioridad sobre los requerimientos de iniciación de llamada al momento de asignar canales no usados en una celda. Los handovers deben ser realizados exitosamente en cualquier momento y deben ser imperceptibles a los usuarios. Para cumplir con este requerimiento se debe especificar un nivel de señal óptimo al cual iniciar al handover; es decir, se debe especificar un valor como el nivel de señal mínimo usable para tener una aceptable calidad de voz. En la práctica se emplea un nivel un poco más fuerte que este mínimo como umbral para realizar un handover. La Figura 1.2 ilustra este procedimiento.

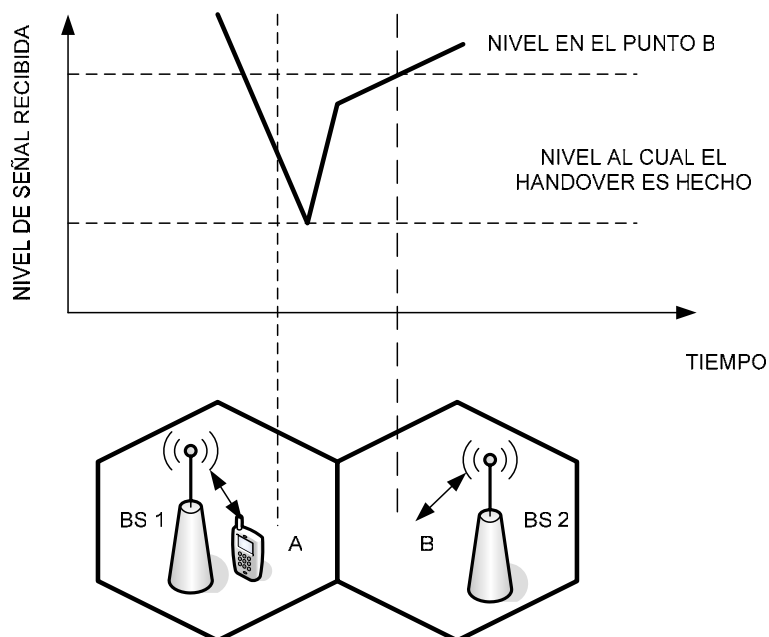


Figura 1.2 : Escenario de handover en el límite de celda.

1.3 Interferencia

La interferencia constituye el mayor factor limitante en el desempeño de los sistemas de radio celular. Entre las fuentes de interferencia tenemos: otros móviles en la misma celda, una llamada en progreso en una celda vecina, otras celdas operando en el mismo canal o cualquier sistema no celular con repentinos crecimientos de energía en la banda de frecuencia celular. En los canales de control, la interferencia puede provocar llamadas perdidas o bloqueadas debido a errores en la señalización.

La interferencia es más severa en las áreas urbanas debido a que se tiene un mayor número de estaciones base y móviles. La interferencia ha sido catalogada como el mayor cuello de botella en el crecimiento de la capacidad (4).

Una medida de la interferencia usada ampliamente en los sistemas celulares es la relación Portadora a Interferencia, CIR, la cual se evalúa para cada enlace activo. En este trabajo emplearemos la ecuación 1.1 para evaluar la relación C/I (5).

$$CIR_{f_N} = \frac{C_{f_N}}{\sum_k I_{f_N} + ACP1 \times \sum_l (I_{f_{N-1}} + I_{f_{N+1}}) + N_0} \quad (1.1)$$

Donde:

CIR_{f_N} = Relación Portadora a Interferencia para la frecuencia de portadora f_N .

C_{f_N} = Nivel de señal de la frecuencia portadora f_N .

$\sum_k I_{f_N}$ = Suma de las k señales interferentes a la frecuencia f_N .

$ACP1$ = Protección de canal adyacente sobre la primera portadora adyacente.

N_0 = Piso para ruido en el receptor.

Normalmente la interferencia se evalúa de acuerdo al canal que usan las celdas en cuestión, por lo que se distinguen dos tipos: *Interferencia Co-canal* e *Interferencia por Canal adyacente*.

1.3.1 Interferencia Co-Canal

Cuando dos celdas usan la misma frecuencia al mismo tiempo tenemos dos *celdas co-canal* (Ver Figura 1.3) y la interferencia entre las señales de estas celdas se denomina *interferencia co-canal*. Diferente al ruido térmico que puede ser minimizado incrementando la relación señal a ruido (SNR), la interferencia co-canal no puede ser combatida simplemente incrementando la potencia de portadora de un transmisor, ya que un incremento en la potencia de portadora de transmisión incrementa la interferencia a las celdas vecinas. Para reducir la interferencia co-canal, las celdas deben estar separadas físicamente por una distancia mínima que les provee aislamiento suficiente debido a la propagación.

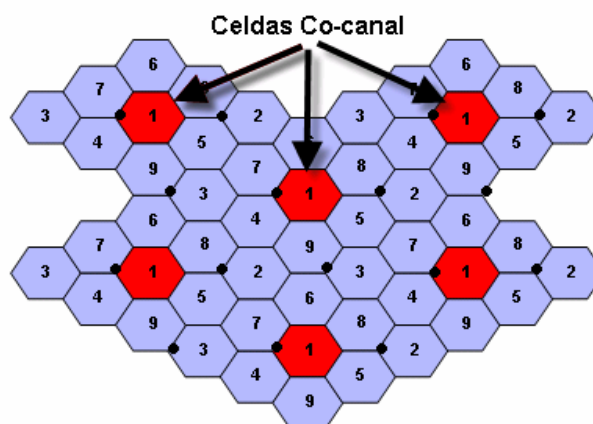


Figura 1.3 : Celdas Co-canal.

1.3.2 Interferencia por Canal Adyacente

La interferencia resultante de señales que son adyacentes en frecuencia a la señal deseada se denomina interferencia por canal adyacente (Ver Figura 1.4). Esta interferencia resulta de la imperfección de los filtros receptores que permiten señales de frecuencias cercanas, ya sea superiores o inferiores, por lo que esta interferencia puede ser minimizada mediante una cuidadosa asignación de canales. Puesto que a cada celda se le asigna una parte de todos los canales disponibles, se debe procurar asignar canales que no sean adyacentes en frecuencia. Manteniendo una separación de frecuencias tan grande como sea posible entre cada canal de una celda, la interferencia por canal adyacente puede ser reducida considerablemente. Por esta razón, en lugar de asignar canales de una banda continua de frecuencias dentro

de una celda en particular, los canales se deben asignar de una manera tal que la separación de frecuencias entre canales en una misma celda se maximice.

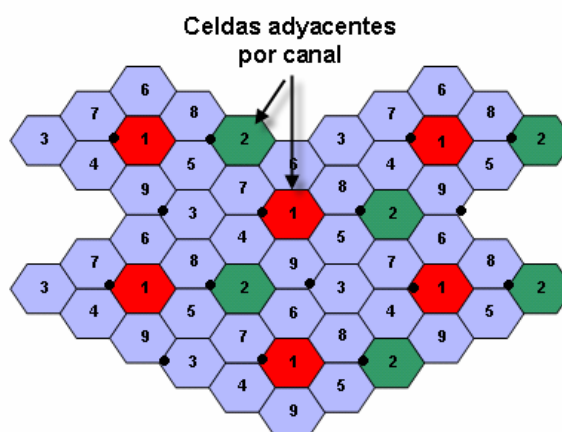


Figura 1.4: Celdas adyacentes por canal

Para el desarrollo del algoritmo propuesto en el presente trabajo nos enfocamos en la reducción de la interferencia co-canal, ya que es la más perjudicial para la calidad de la red (2).

1.4 Capacidad del Sistema

El mayor cuello de botella para los sistemas celulares desde su aparición ha sido la interferencia. En esta sección se realiza un análisis matemático de la dependencia que tiene la capacidad de un sistema celular en la interferencia que hay en el mismo, para lo cual empezamos por definir la capacidad de un sistema celular. Consideremos una red

que tiene S canales disponibles que se han dividido entre N celdas; el conjunto de estas celdas que colectivamente usa todas las frecuencias disponibles se denomina *cluster* (4). Si a cada una de estas celdas se le ha asignado k canales, entonces:

$$S = kN \quad (1.2)$$

Si un cluster se repite M veces dentro de un sistema, el número total de canales, Cap , puede ser usado como una medida de la capacidad y está dado por la ecuación 1.3:

$$Cap = MkN = MS \quad (1.3)$$

Consideremos un sistema en el que el tamaño de cada celda es aproximadamente el mismo, la interferencia co-canal es independiente de la potencia transmitida, siendo más bien una función del radio de celda (R), y la distancia al centro de la celda co-canal más cercana (D), ver Figura 1.5. Incrementando el factor (D/R) aumenta también la separación espacial entre las celdas co-canal relativa a la distancia de cobertura de una celda, por lo que la interferencia es reducida al incrementar el aislamiento de energía RF de la celda co-canal. El

parámetro Q , que se conoce como la tasa de reuso co-canal se relaciona con el tamaño del cluster, por medio de la ecuación:

$$Q = \frac{D}{R} = \sqrt{3N} \quad (1.4)$$

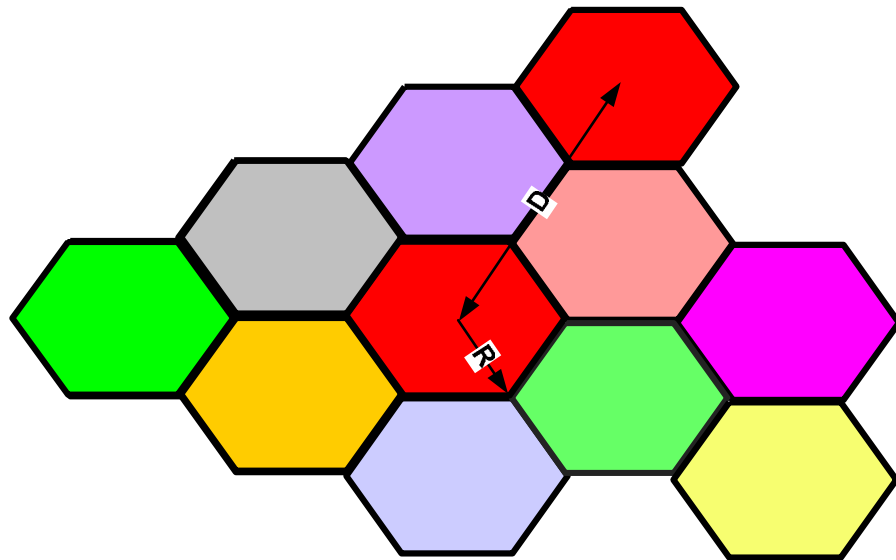


Figura 1.5: Radio de celda y distancia entre celdas co-canal.

Sea i_0 el número de celdas co-canal interferentes, entonces la relación portadora a interferencia (C/I) para un móvil que monitorea todas estas celdas puede ser expresada como:

$$\frac{C}{I} = \frac{C}{\sum_{i=1}^{i_0} I_i} \quad (1.5)$$

Donde C es la potencia de portadora de la estación base servidora, mientras que I_i es la potencia de la i -ésima celda co-canal interferente, por lo que si los niveles de señal de todas las celdas son conocidos, es posible encontrar la relación C/I empleando la ecuación.

Ahora, si consideramos D_i como la distancia entre el móvil y el i -ésimo interferente, la potencia recibida en este móvil será proporcional a $(D_i)^{-n}$. El exponente n se encuentra típicamente en un rango de 2 a 4 para sistemas celulares urbanos.

Cuando la potencia transmitida por cada estación base es igual y el exponente para la pérdida por recorrido es el mismo en toda el área de cobertura. La relación C/I para un móvil puede ser expresada como:

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-n}}{\sum_{i=1}^{i_0} (D_i)^{-n}} \quad (1.6)$$

Considerando solamente la primera capa de celdas interferentes, y que todas estas sean equidistantes de la celda servidora por una distancia D , la ecuación 1.6 se simplifica a:

$$\frac{C}{I} = \frac{(D/R)^n}{i_o} = \frac{(\sqrt{3N})^n}{i_o} \quad (1.7)$$

Como vemos el C/I se relaciona con el tamaño del cluster N , el mismo que determina la capacidad total del sistema como lo indica la ecuación 1.3.

Con este análisis hemos demostrado que la capacidad de un sistema celular se ve afectada directamente por el nivel de interferencia co-canal que hay en el mismo. Precisamente el objetivo de esta tesis consiste en disminuir esta interferencia co-canal para así mejorar el desempeño de la red. Con esto concluimos el presente capítulo en el que hemos presentado una introducción al concepto celular enfocándonos en la interferencia que es el tema central del presente trabajo.

CAPÍTULO 2

2. GENERALIDADES DEL SISTEMA GLOBAL DE COMUNICACIONES MÓVILES (GSM)

GSM es un sistema celular de segunda generación que fue desarrollado para resolver los problemas de incompatibilidad de los primeros sistemas celulares en Europa (6). GSM fue el primer sistema celular del mundo en especificar modulación digital y arquitecturas de nivel de red y servicios. De igual manera que todos los sistemas de telefonía celular, GSM es una red de radio dividida geográficamente en pequeños espacios llamados celdas. Un usuario móvil es capaz de moverse dentro y hacia las celdas adyacentes sin interrumpir su llamada. La red en si misma es transparente a los usuarios de manera tal que este no conoce la celda que le está sirviendo. En este capítulo el sistema GSM es descrito de manera general, siendo el objetivo familiarizar al lector con términos que se emplearán en capítulos posteriores.

2.1 Arquitectura del sistema GSM

Los principios básicos detrás de la especificación de GSM son las interfaces abiertas y la descentralización de inteligencia, los mismos que dividen el sistema GSM en tres entidades separadas: Subsistema de conmutación de red (NSS), Subsistema de estación base (BSS) y el Subsistema de administración de la red (NMS). Además de estas entidades de red es necesaria una interfase de usuario, el móvil, denominado estación móvil (MS). Todas estas entidades, incluyendo la estación móvil, son llamadas subsistemas.

Las interfaces separan los subsistemas. Debido a que las interfaces son abiertas, el operador de la red puede obtener diferentes partes de la red de diferentes proveedores. Actualmente las especificaciones de GSM contemplan dos interfaces completamente abiertas: Interfase de Aire y la interfase A. La interfase de Operación y Mantenimiento no es abierta ya que se debe tener un solo proveedor. La Figura 2.1 ilustra los subsistemas y las interfaces del sistema GSM.

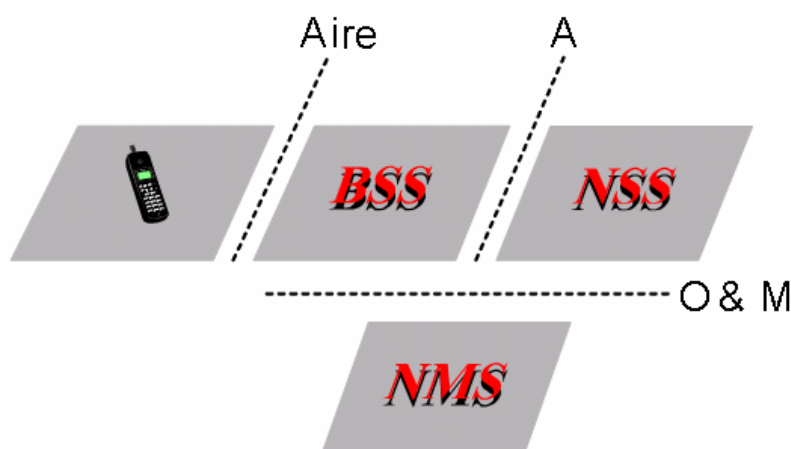


Figura 2.1: Subsistemas e interfaces de GSM (6).

2.1.1 La Estación Móvil (MS)

La estación móvil es una combinación de dos partes individuales: el equipo móvil (ME) y el módulo de identidad del suscriptor (SIM), ambos son inútiles sin el otro (Ver Figura 2.2). El equipo móvil es una pieza de hardware que puede ser usado por cualquier suscriptor con su propio módulo de identidad de suscriptor y que ofrece la interfase de suscriptor al usuario. El SIM es un medio de almacenamiento de la información del suscriptor. Esto incluye conocimiento de los números ISDN del suscriptor móvil (MSISDN), identidad internacional de suscriptor móvil (IMSI), lista de servicios, lista de redes y algoritmos de autenticación. Toda esta información es necesaria para identificar al

subscriber y establecer una comunicación segura en la interfase de radio.

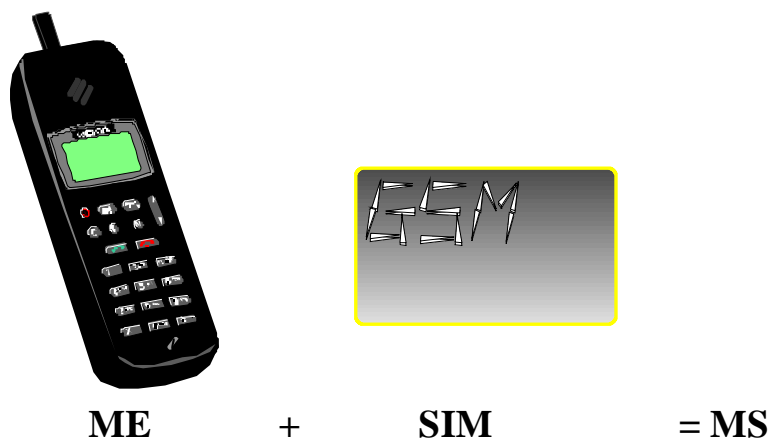


Figura 2.2: La estación móvil.

2.1.2 El Subsistema de Estación Base (BSS)

El BSS provee y controla los caminos de transmisión de radio entre las estaciones móviles (MS) y el subsistema de conmutación de red (NSS), también controla la interfase de radio entre el MS y todos los demás subsistemas de GSM. Las tareas del BSS son: La señalización de las interfases A y de Aire, establecimiento de la conexión entre MS y NSS, control de movilidad, codificación y transmisión de la voz, procesamiento y colección de estadísticas. Como todas las entidades del sistema GSM, el BSS está basado en elementos de red, cada uno de los cuales mantiene una tarea especial en la operación de la red.

Estos elementos son: Transmisor-codificador (TC), la estación base transmisora-receptora (BTS) y el controlador de estación base (BSC). La Figura 2.3 muestra los elementos del BSS.

El Transmisor-codificador (TC) es el elemento de BSS que se ocupa de la transmisión y codificación de la voz; este es capaz de convertir voz de un formato de codificación digital a otro y viceversa.

La estación base transreptora (BTS) se preocupa de la señalización en la interfase de aire, procesamiento de voz; es decir, de todos los métodos utilizados para garantizar una conexión libre de errores con el móvil. En GSM, el término BTS no se refiere a una sola unidad transreptora, sino que dentro de una misma BTS se tienen varias unidades transreptoras, más comúnmente conocidas como TRX.

El controlador de estación base (BSC) es el elemento central del BSS; y controla todo lo concerniente a la red de radio. Las tareas del BSC son: Establecimiento de conexión entre MS y NSS, control de movilidad, colección de datos estadísticos y soporte en la señalización de las interfases A y de Aire.

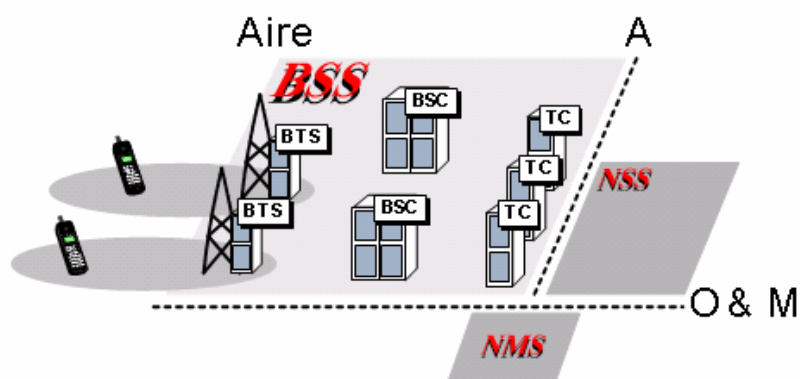


Figura 2.3: Elementos del BSS (6).

2.1.3 El Subsistema de Conmutación de Red (NSS)

La principal tarea del NSS es el control de las llamadas. Esto también incluye las bases de datos necesarias para la información del suscriptor y el control de la movilidad. La Figura 2.4 muestra los componentes del NSS.

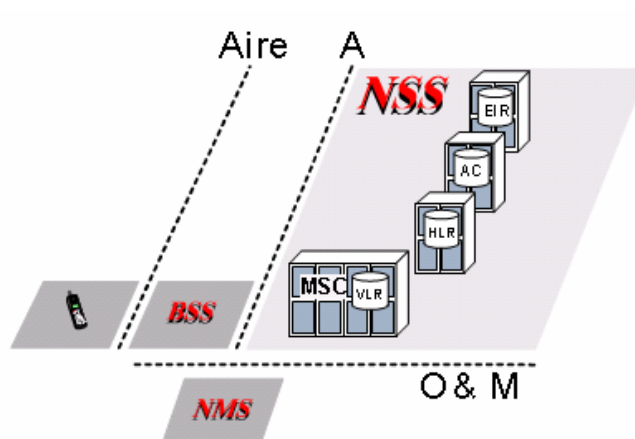


Figura 2.4: Elementos del NSS y sus funciones (6).

El centro de conmutación de servicios móviles (MSC) es el elemento principal del NSS desde el punto de vista de control de llamada. El MSC es responsable del control de llamadas, funciones de control del BSC, carga de valores por servicios, estadísticas y señalización hacia las interfases A y la red telefónica pública conmutada (PSTN).

El registro de ubicación inicial (HLR) es el lugar donde la información del suscriptor es almacenada permanentemente. El HLR también provee una ubicación conocida y fija para la información variable de enrutamiento. Las principales funciones del HLR son la manipulación de servicios e información de suscriptores, control de estadísticas y movilidad.

El registro de ubicación de visitante (VLR) provee un almacenamiento local para todas las variables y funciones necesarias para el manejo de las llamadas hacia y desde suscriptores móviles en el área relacionada al VLR. La información relativa a un suscriptor permanece en el VLR el mismo tiempo que el suscriptor visita el área. Las principales funciones del VLR son: manejo de servicios e información del suscriptor, control de movilidad y seguridad. Una solución típica es integrar el VLR junto con el MSC, en cuyo caso el área de MSC es la misma que el área de VLR, lo cual facilita el direccionamiento del suscriptor.

El centro de autenticación (AC) y el registro de identidad de equipo (EIR) son elementos de red de NSS encargados de la seguridad. El AC mantiene la información relativa a la identidad del suscriptor junta con el VLR, mientras que el EIR mantiene la información relativa a la seguridad del equipo móvil (ME) junta con el VLR.

2.1.4 El Subsistema de Administración de la Red (NMS)

Las principales funciones del subsistema de administración de la red son las siguientes: Mantenimiento y operación centralizada (O&M), cambios en la configuración de la red, observación de la calidad de la red.

El NMS consiste de cuatro partes: La parte de comunicación (CP), la parte de base de datos (DP), la parte de aplicaciones (AP) y la interfase de usuario (UI). Todas estas partes se muestran en la Figura 2.5. La parte de operación y mantenimiento establece conexiones a los elementos de red (NE) ubicados en el BSS y NSS. La parte de base de datos almacena el modelo de la red, esto es, todos los parámetros e información de configuración de los elementos de red. La parte de aplicaciones mantiene las conexiones a las estaciones de trabajo. La

interfase de usuario prácticamente está en las estaciones de trabajo, las cuales son empleadas por el operador para controlar toda la red.

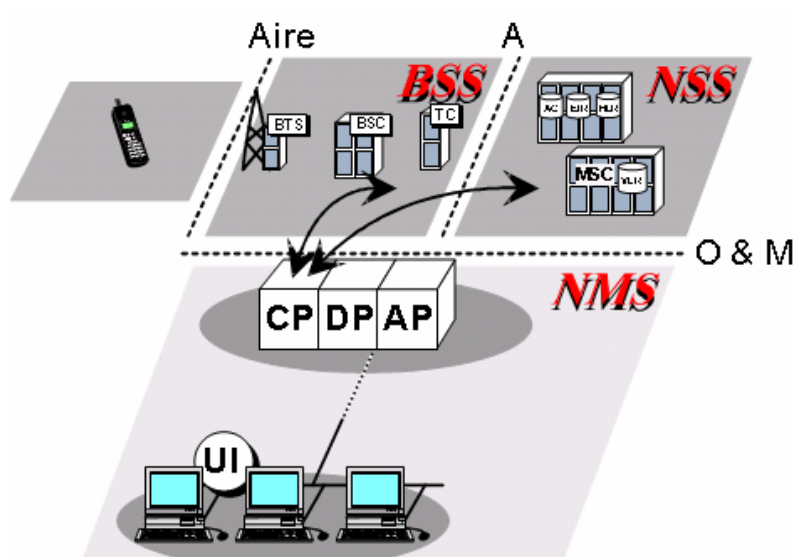


Figura 2.5: Partes del NMS (6).

2.2 Interfase de aire de GSM

La primera especificación de GSM utilizaba inicialmente dos bandas de 25 MHz. La banda de 890-915 MHz, usada para el enlace ascendente, esto es comunicación desde el MS hacia la BTS; mientras que la banda de 935-960 MHz empleada para enlace descendente, es decir transmisión desde la BTS hacia el MS.

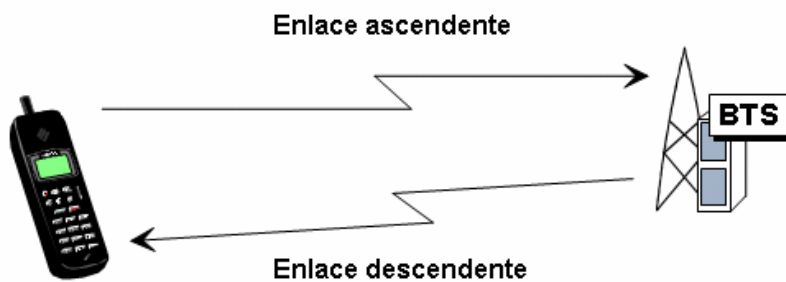


Figura 2.6: Enlace ascendente y descendente.

Después de la primera especificación se han hecho muchas extensiones a estas bandas, teniendo actualmente las que se muestran en la Tabla I.

	Enlace ascendente	Enlace descendente
GSM 450	450,4 - 457,6 MHz	460,4 - 467,6 MHz
GSM 480	478,8 - 486 MHz	488,8 - 496 MHz
GSM 850	824 - 849 MHz	869 - 894 MHz
GSM 900 Primario	890 - 915 MHz	935 - 960 MHz
GSM 900 Extendido	880 - 915 MHz	925 - 960 MHz
GSM 900 Railways	876 - 915 MHz	921 - 960 MHz
DCS 1800	1710 - 1785 MHz	1805 - 1880 MHz
PCS 1900	1850 - 1910 MHz	1930 - 1990 MHz

Tabla I: Bandas de frecuencias de GSM (7).

2.2.1 Estructura de acceso múltiple

En la estructura de acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA), el espectro de radio frecuencia es dividido en frecuencias de portadora que son posicionadas cada 200 KHZ. Dicha separación provee 124 canales de radio para la interfase de aire en ambas direcciones: ascendente y descendente para la banda de 900 MHz.

El acceso múltiple por división de tiempo establece un escenario donde muchos móviles pueden usar la misma frecuencia física para tráfico y señalización. En los sistemas análogos una frecuencia física es un canal de tráfico y señalización al mismo tiempo. TDMA permite ocho canales de tráfico y señalización en la misma frecuencia física. Estos ocho canales son llamados canales físicos. En la especificación de GSM estos canales físicos se denominan ranuras de tiempo (TSL), cada TSL tiene una duración de 576.92 μ s y contiene 156.25 bits, de los cuales 8.25 bits son de seguridad y 6 bits de inicio y parada que son empleados para prevenir traslape con ranuras de tiempo adyacentes (8). Los ocho canales físicos juntos constituyen una trama TDMA con una duración de 4.615 ms. La estructura de acceso múltiple se muestra en la Figura 2.7. La siguiente sección describe la división de los canales en GSM.

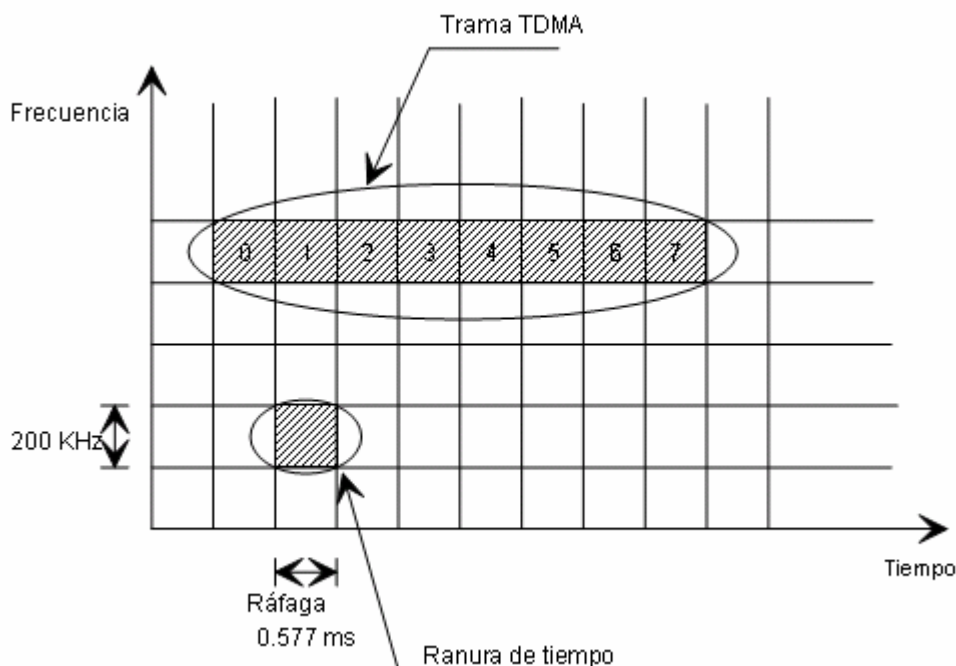


Figura 2.7: Estructura FDMA y TDMA (9).

2.2.2 Configuración de canales

En el sistema GSM hay dos tipos de canales: físicos y lógicos. Un canal físico es la combinación de una ranura de tiempo y una frecuencia específica, por lo que se dispone de ocho canales físicos por frecuencia, o por trama TDMA. La información contenida en un canal físico se denomina ráfaga. Un canal lógico es contenido dentro de una ráfaga y transmite información de un tipo particular. La manera en la cual estos canales son organizados parcialmente depende de la aplicación, pero también depende de si la información es ascendente o

descendente (2). Los canales lógicos de GSM se muestran en la Figura 2.8.

Hay 12 canales lógicos que son mapeados en los canales físicos, la mayoría de ellos manejan información de señalización. Los canales lógicos se dividen en canales comunes y dedicados. Los canales comunes son usados para difundir información a las estaciones móviles y establecer canales de señalización entre el MSC/VLR y la estación móvil.

En el enlace de radio diferentes tipos de canales de señalización son usados para facilitar la comunicación entre el MS y la BTS, BSC y MSC/VLR. Todos estos canales de señalización son llamados canales dedicados de control.

Los canales de tráfico son también canales dedicados, ya que cada canal es dedicado para un usuario solamente.

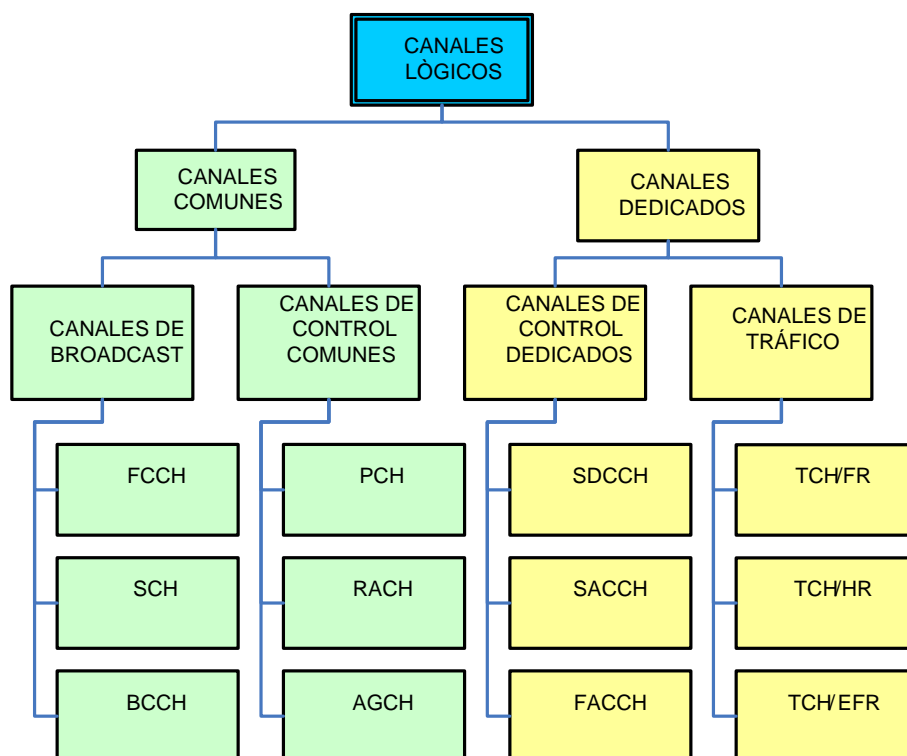


Figura 2.8: Canales lógicos.

Existen tres tipos de canales de tráfico (TCH) que son utilizados para portar ya sea voz o datos, por lo que son bidireccionales.

- El canal de tráfico de tasa completa (TCH/FR) permite transmisiones de voz de 13 Kbps o de datos a 12.6 o 3.6 Kbps.
- El canal de tráfico de tasa media (TCH/HR) permite transmitir voz codificada a una tasa de 6.5 Kbps y datos a una tasa de 6 o 3.6 Kbps.

- El canal de tráfico de tasa completa mejorado (TCH/EFR) permite la transmisión de voz a 13 Kbps pero el mecanismo de codificación es diferente, brindando mejor calidad de voz para la misma tasa de bit que TCH/FR.

Los canales de control dedicados son de tres tipos:

- El canal de control dedicado aislado (SDCCH) es bidireccional y es usado para el procedimiento de establecimiento de llamada y autenticación. Este canal es usado para asignar un TCH en particular al móvil.
- El canal de control de asociamiento lento (SACCH) es asociado con cada SDCCH y también con cada TCH. Por medio de este canal el móvil reporta sus mediciones a la BTS. También es usado para regular la potencia del MS y para mantener un alineamiento de tiempo correcto de un móvil desplazándose en una celda.
- El canal de control de asociamiento rápido (FACCH) es usado en lugar del SACCH para intercambiar información en una escala de tiempo mucho más rápida que usando SACCH. Generalmente

este canal se usa para transmitir señalización requerida para transferir una llamada de una celda a otra.

Los canales de difusión (BCH) son utilizados para transmitir información de enlace descendente, esto es una celda envía información general acerca de ella a todos los móviles. Dentro de los canales de difusión hay tres tipos de canales lógicos:

- El Canal de Corrección de Frecuencia (FCCH) porta información necesaria para que el móvil sintonice la frecuencia usada por la BTS. El FCCH es una onda sinusoidal pura que el móvil busca luego de ser encendido.
- El Canal de Sincronización (SCH) contiene información más detallada para continuar con los procesos de señalización. La información de difusión incluye el código de identidad de estación base (BSIC) de la BTS que transmite y el número de trama TDMA actual que el móvil necesita.
- El canal de control de difusión (BCCH) contiene más información requerida por el móvil, como la frecuencia usada, la secuencia de

salto de frecuencia, los grupos de paging, la combinación de canales e información de las celdas vecinas.

Los canales de control común (CCCH) también contienen tres tipos de canales lógicos que son usados para acceder la BTS y el MS.

- El canal de paging (PCH) es usado por la BTS para intentar acceder a un móvil si hay una llamada entrante para este. Este es un canal de enlace descendente.

- El canal de acceso aleatorio (RACH) es usado por el móvil para solicitar un SDCCH con el objetivo de establecer una llamada o responder a un paging.

- El canal de garantía de acceso (AGCH) es usado para asignar un SDCCH a un móvil para proceder con la llamada. Este es una transmisión de BTS a MS.

Las especificaciones de GSM describen que canal físico usar para cada canal lógico. La trama GSM completa y la estructura de ráfagas es mostrada en la Figura 2.9.

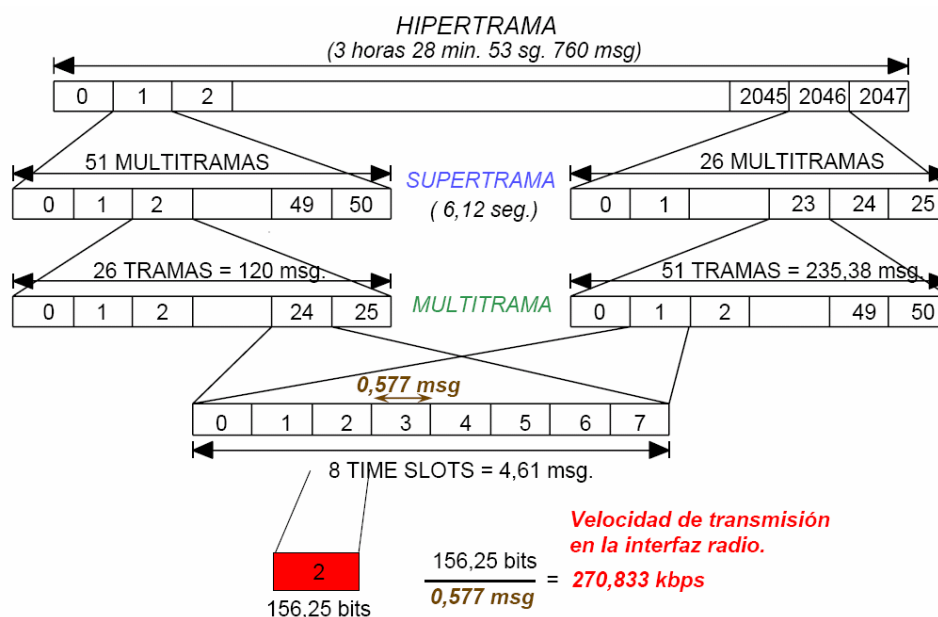


Figura 2.9: Estructura jerárquica de las tramas de GSM (6).

La unidad básica de tiempo en GSM es la trama TDMA compuesta por 8 ranuras de tiempo, por lo que cuando hablamos de una red no sincronizada nos referimos a una red en la que los sectores tienen relojes independientes y por lo tanto existe una diferencia aleatoria entre las tramas y ranuras de tiempo como lo podemos ver en la Figura 2.10.

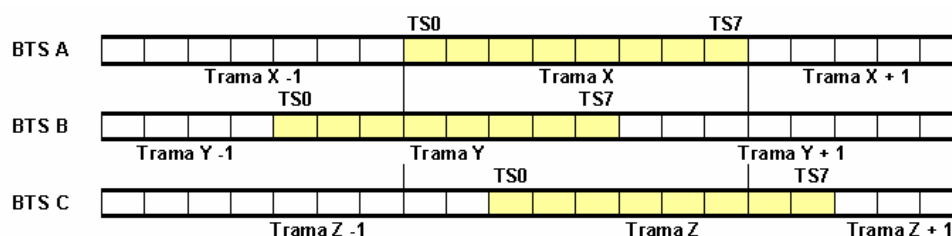


Figura 2.10: Alineamiento aleatorio de tramas TDMA.

Mientras que al hablar de redes sincronizadas nos referimos a redes en las que todos los sectores tienen un reloj maestro, permitiendo de esta manera tener un alineamiento tanto de tramas como de ranuras de tiempo, como se muestra en la Figura 2.11. Normalmente la sincronización se consigue con la señal de reloj disponible para los Sistemas de Posicionamiento Global GPS (4).

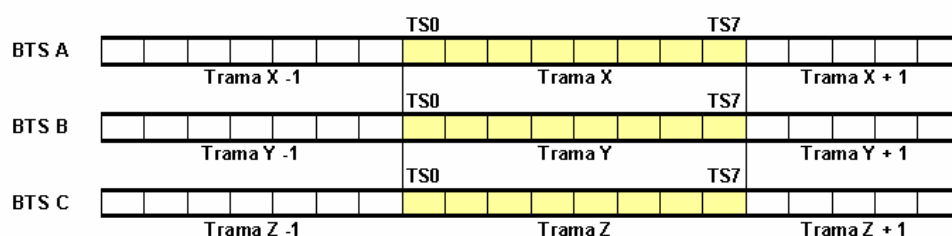


Figura 2.11: Alineamiento sincronizado de tramas TDMA.

2.3 La capa BCCH y la capa de saltos

En la sección anterior se describieron los diferentes canales lógicos que se especifican para GSM. Si bien es cierto que todos son importantes, resaltan dos por la utilidad que prestan al momento de establecer un enlace y mientras dura el mismo, estos son: El canal de control de difusión BCCH y los canales de tráfico TCH.

Ya en la arquitectura de GSM, y en particular en la de la BTS, estos canales ocupan transceptores con características muy bien diferenciadas. Por un lado, siempre se tiene un transceptor exclusivo para el canal de BCCH y los canales de señalización como SDCCH, el mismo que opera con una frecuencia fija; esto es, no varía en el tiempo. Esto se debe a que el móvil determina el nivel de señal de la celda servidora y de las celdas vecinas midiendo la potencia recibida de las frecuencias de BCCH de cada una. Además durante una llamada el móvil mide los niveles en enlace descendente de las celdas vecinas usando las frecuencias de BCCH. Para poder determinar el nivel de señal correcto, la potencia de transmisión de las frecuencias de BCCH debe permanecer constante y continua; es decir, no se puede emplear control de potencia ni transmisión discontinua en el TRX de BCCH.

Por otro lado, los canales de TCH; es decir, los canales exclusivos para voz y datos, emplean transceptores cuyas frecuencias varían seudo aleatoriamente en el tiempo. Estos transceptores emplean lo que se conoce como saltos de frecuencia.

Considerando esta gran diferencia entre los transceptores de BCCH y de TCH se definen dos capas en la interfase de aire de una red GSM. Por un lado tenemos la capa de BCCH compuesta por todos los

transceptores que emplean frecuencias fijas y por otro tenemos la capa de saltos, que la componen los transceptores que utilizan los saltos de frecuencia. El planeamiento de frecuencia es muy diferente entre una capa y otra. La capa de BCCH emplea frecuencias fijas, por lo que la creación de un plan de frecuencias de BCCH no es otra cosa que la asignación de un canal constante a cada celda. Recordemos que cada celda contiene un transceptor de BCCH, mientras que el diseño de planes de frecuencia para la capa de saltos involucra la asignación de una serie de parámetros que sirven como entrada a un algoritmo pseudo aleatorio que es el que finalmente se encarga de asignar la frecuencia a utilizar por un TRX durante un tiempo determinado.

Es preciso resaltar que el presente trabajo se concentra en la capa de saltos solamente, y más específicamente en la asignación de uno de los parámetros que forman el plan de frecuencias para esta capa.

2.4 Saltos de frecuencia en GSM

Los saltos de frecuencia consisten en un cambio periódico de la frecuencia de transmisión. Una señal que se transmite usando esta técnica puede ser considerada como una secuencia de ráfagas de información modulada con frecuencias de portadora variantes en el

tiempo y seudo aleatorias con el objetivo de disminuir la interferencia promedio que sufre la señal (10).

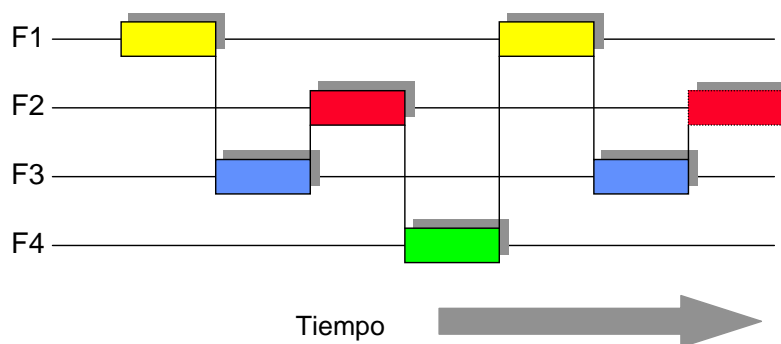


Figura 2.12 : Salto de frecuencias

Los saltos de frecuencia pueden ser clasificados como rápidos o lentos. Saltos rápidos de frecuencia ocurren si hay más de un salto durante cada símbolo transmitido; mientras que los saltos lentos de frecuencia ocurren si uno o más símbolos son transmitidos en el intervalo de tiempo entre saltos de frecuencia.

La interfase de radio de GSM usa los saltos lentos de frecuencia (SFH), lo cual significa que la frecuencia por ranura de tiempo de radio (RTSL) se cambia ráfaga por ráfaga; es decir se tiene la misma frecuencia mientras dure una ráfaga (0.577 ms).

Tres esquemas diferentes de saltos son definidos en las especificaciones de GSM: no saltos, saltos cíclicos y saltos pseudo aleatorios. Los primeros dos esquemas son casos especiales del último. La secuencia de saltos es determinada por un conjunto de parámetros transmitidos por la estación base (9):

- Número de Trama (FN): Este número es cíclico en el rango de 0 a 2'715,647. Este ciclo se lo conoce como una hipertrama de 3 horas 28 minutos y 53.76 segundos de duración. El número de trama es difundido en el canal de sincronización (SCH).
- Lista de canales para asignación móvil (MAL): Define el conjunto de canales de radio frecuencia a ser usados en la secuencia de salto. Esta lista contiene N canales de radio frecuencia, donde $1 \leq N < 64$.
- Número de secuencia de salto (HSN): Puede estar entre 0 y 63. Si es 0 se emplea saltos cíclicos, para cualquier otro número tenemos saltos aleatorios de frecuencias. Este número es usado para distinguir las diferentes celdas, dando a todos los canales dentro de una misma celda el mismo HSN; pero a diferentes celdas, diferentes HSN.

- Índice de desplazamiento en la MAL (MAIO): Es usado para la asignación de diferentes frecuencias para diferentes portadoras que tienen la misma MAL y HSN en la misma celda; puede estar entre 0 y $N - 1$.

MAL, MAIO y HSN constituyen en conjunto lo que se conoce como el plan de frecuencias para la capa de saltos y son utilizados junto con el número de trama TDMA como entradas al algoritmo de saltos de GSM que se utiliza para la asignación de la misma portadora momentánea tanto en la BTS como en el móvil, permitiendo de esta manera que la frecuencia cambie sin la necesidad de una señalización explícita de la frecuencia a transmitir en la próxima ranura de tiempo. La salida del algoritmo de saltos es un índice, MAI, para la MAL; es decir la frecuencia apuntada por el MAI es la frecuencia a ser usada en la próxima ranura de tiempo. El algoritmo mencionado se describe en el Apéndice A y se ilustra en la Figura 2.13.

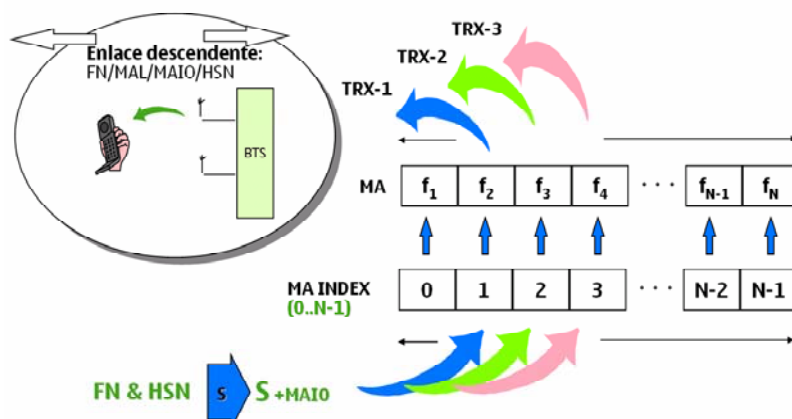


Figura 2.13: Algoritmo de Saltos de frecuencia en GSM.

Las especificaciones de GSM dan la posibilidad de usar dos alternativas diferentes de saltos de frecuencia: Salto de frecuencias en banda base (BB-FH) y saltos de frecuencia sintetizados (RF-FH).

2.4.1 Saltos de frecuencia en banda base

En este método los transceptores transmiten en una frecuencia fija y la trama TDMA es conmutada a través de los mismos (8). Las ranuras de tiempo en las estaciones base son divididas en dos grupos separados: Las ranuras de tiempo 0 de todos los transceptores, excepto del BCCH, están en el grupo 1 y todas las demás ranuras de tiempo 1 – 7 de todos los transceptores están en el grupo 2. El número de frecuencias sobre las cuales se realizan los saltos es igual al número de transceptores en

el grupo de salto. Los saltos de frecuencia en banda base se ilustran en la Figura 2.14.

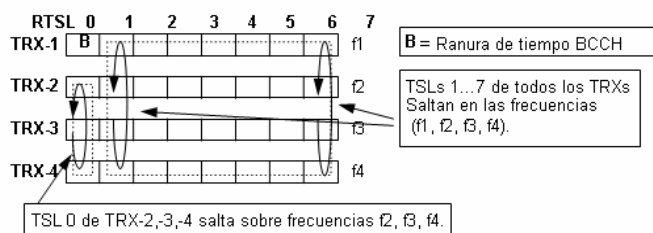


Figura 2.14: Saltos de frecuencia en banda base (9).

2.4.2 Saltos de frecuencia sintetizados

A diferencia del método anterior, en este los transceptores no usan una frecuencia fija sino que ellos cambian su frecuencia entre tramas TDMA (8). El número de frecuencias sobre las cuales se realizan los saltos es igual al número de frecuencias que contiene la MAL, por lo que la eficiencia de los saltos no depende del número de transceptores en una celda pero si del número de frecuencias en la MAL. El TRX de BCCH no realiza saltos ya que la frecuencia de BCCH debe ser transmitida continuamente en una celda. La Figura 2.15 muestra el salto de frecuencias sintetizado. La Figura 2.16 compara ambos modos de saltos de frecuencia.

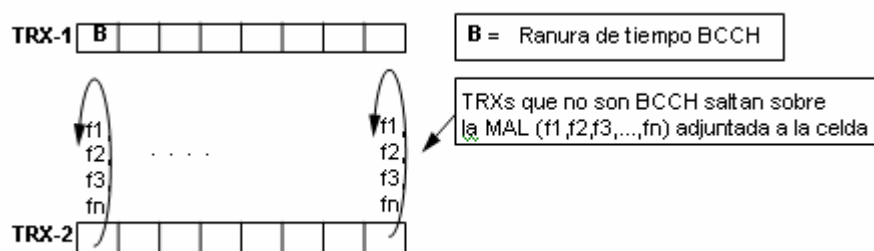


Figura 2.15: Saltos de frecuencia sintetizados (9).

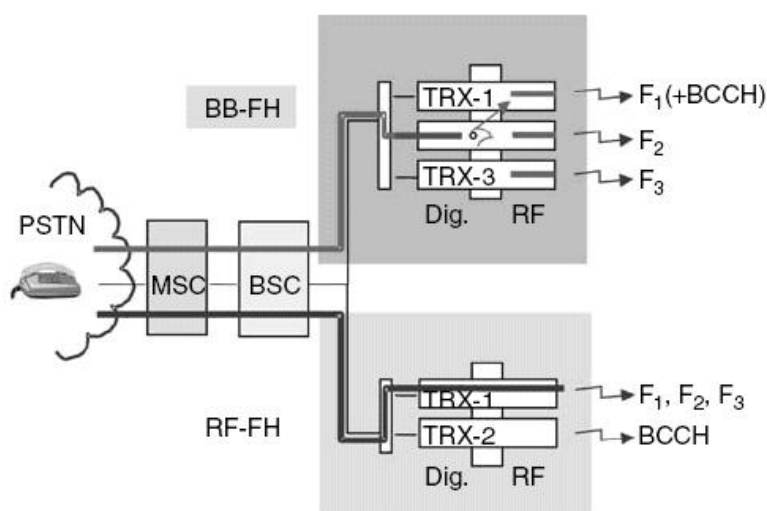


Figura 2.16: Saltos de frecuencia banda base y sintetizado (4).

Por lo general siempre se utilizan los Saltos de frecuencia sintetizados. Las frecuencias para una celda que utiliza este método de saltos están definidas en la MAL y son asignadas por el operador. De igual manera parámetros como MAIO y HSN son dados por el operador. La asignación de ambos requiere de un proceso de planeación.

2.5 Indicadores de calidad

El desempeño de las redes celulares y en particular la calidad de la voz pueden ser medidos empleando múltiples indicadores de calidad (KPI). Estos indicadores son estadísticas que se obtienen por medio del subsistema de administración de la red (NMS). Los operadores manejan una gran cantidad de indicadores para controlar el buen rendimiento del sistema, siendo los más importantes los que reflejan la calidad de la voz. El algoritmo propuesto en el presente trabajo será evaluado con los siguientes indicadores: Tasa de llamadas caídas (DCR), Calidad de recepción (RX QUAL), y Tasa de error de trama (FER). A continuación se describe que representan y como se miden cada uno de estos indicadores.

2.5.1 Tasa de llamadas caídas (DCR)

El DCR mide el porcentaje de conexiones que no fueron completadas satisfactoriamente con respecto al número de llamadas iniciadas. Matemáticamente se puede definir como:

$$DCR(\%) = \frac{DC}{SC} \times 100\% \quad (2.1)$$

Donde DC representa el número de llamadas no completadas satisfactoriamente y SC el número de llamadas iniciadas.

La Tasa de llamadas caídas es uno de los KPI más importantes para evaluar la calidad de enlace que se consigue en un sistema ya que una llamada caída tiene un impacto negativo que es percibido notoriamente por el usuario final. En GSM la caída de una llamada depende principalmente de dos factores. Por un lado del contador RLT que incrementa o decrece dependiendo de una recepción satisfactoria de la trama SACCH. Cuando RLT disminuye hasta cero la llamada se cae, de ahí que el DCR a más de medir la calidad del sistema constituye también un indicador de la señalización de SACCH. Por otro lado una llamada también puede caerse por fallas en la señalización de handover, esto es cuando una llamada no es transferida de una celda a otra por fallas de señalización en la capa de enlace; es decir, por fallas en la señalización de la trama FACCH, el nivel de señal decrece por debajo del umbral permitido por lo que el enlace se cae.

Hoy en día se han planteado algunas fórmulas para el DCR. Unas solo consideran el RLT, otra las fallas en la señalización de cambio de celdas y otras más consideran otros factores. Para el presente trabajo calcularemos el DCR con la siguiente ecuación:

$$DCR = DCR_UL + DCR_DL + DCR_HOS \quad (2.2)$$

Donde DCR_UL es el porcentaje de llamadas caídas con respecto al RLT en enlace ascendente, DCR_DL representa el porcentaje de llamadas caídas con respecto al RLT en enlace descendente, y por último DCR_HOS indica el porcentaje de llamadas caídas con respecto a fallas en la señalización de cambio de celdas.

2.5.2 Calidad de recepción (RX QUAL)

La calidad de recepción no es más que una manera de representar la tasa de error de bit (BER). Según (11) el RX QUAL se divide en 8 clases, cada una representando un rango de BER como se muestra en la Tabla II.

Clase de RX QUAL	BER	Calidad
0	< 0.2 %	Buena calidad
1	0.2 - 0.4 %	
2	0.4 - 0.8 %	
3	0.8 - 1.6 %	
4	1.6 - 3.2 %	
5	3.2 - 6.4 %	
6	6.4 - 12.8 %	Mala calidad
7	> 12.8 %	

Tabla II: Clases de RX QUAL (11).

El sistema evalúa el BER sobre una multitrama SACCH en cada bloque TCH (en cada TSL) y asigna la clase de RX QUAL según la tabla.

La calidad de recepción se mide tanto en el enlace ascendente (UL) como en el descendente (DL), por lo que constituye uno de los indicadores que permite comparar el desempeño del enlace en ambas direcciones. La estadística empleada más comúnmente con este indicador es el porcentaje de muestras que tuvieron una calidad de recepción buena; es decir, que se encontraron entre la clase 0 y la 5 inclusive. Matemáticamente se define por:

$$\%Good_RX_QUAL = \frac{\#Muestras_en_clases_0-5}{\#Total_de_muestras} \quad (2.3)$$

En el presente trabajo calcularemos el $\%Good_RX_QUAL$ para enlace ascendente y descendente mediante la ecuación (5.6) considerando las muestras de toda la red.

2.5.3 Tasa de error de trama (FER)

De todos los indicadores evaluados en esta tesis, la tasa de error de trama (FER) es el más importante ya que está altamente correlacionado

con la calidad de voz final que el usuario percibe. La calidad de voz es inversamente proporcional a los valores de FER. Para medir esta tasa de error se evalúa una muestra durante un periodo de 1.92 s, correspondientes a 4 multitramas SACCH. Este indicador evalúa el porcentaje de muestras que tuvieron un FER mayor o igual a umbrales especificados, estos umbrales pueden ser 1%, 2.1% y 4.2% (4).

Un problema en particular que se presenta en la vida real al medir el FER es que desde el NMS solo se pueden obtener mediciones para el enlace ascendente, ya que en este la información la recibe la BTS, mientras que en el descendente la información queda en el móvil, siendo imposible para la BSC coleccionar estas estadísticas. Ya que los resultados que mostramos en este trabajo se obtuvieron con el simulador SMART no tendremos este inconveniente y presentaremos estadísticas tanto de enlace descendente como ascendente.

En esta tesis se evalúa el porcentaje de muestras con $FER < 4.2\%$, que es lo que comúnmente se conoce como *Porcentaje de muestras con buen FER*, y que matemáticamente se puede definir como:

$$\%Good_FER = \frac{\#Muestras_con_FER < 4.2\%}{\#Total_de_muestras} \quad (2.4)$$

El umbral para evaluar el FER lo fija el operador. En el caso de esta tesis, el operador tiene establecido 4.2% como umbral para la Tasa de Error de Tramas.

2.6 Carga efectiva de frecuencia (EFL)

EFL es una medida de la utilización promedio de las frecuencias en el sistema, representa cuan cargada se encuentra cada frecuencia en la red. Es proporcional a la eficiencia espectral y al tráfico cargado en la red (4). La carga efectiva de frecuencia está definida por la ecuación 2.5:

$$EFL = \frac{Traf / N_{TS_AVG}}{N_{freqs} / N_{TRX_AVG}} \quad (2.5)$$

Donde *Traf* es el tráfico promedio por sector en Erlangs, N_{TS_AVG} es el número promedio de ranuras de tiempo con tráfico por sector, N_{freqs} es el número total de frecuencias en la red y N_{TRX_AVG} es el número promedio de unidades de transmisión – recepción (TRX) por sector.

EFL es una medida de la carga del sistema, independiente del reuso de frecuencias o de la configuración de transceptores. Para ilustrar como se calcula veamos el siguiente ejemplo: Consideremos una banda de

1.2 MHz (6 portadoras x 200 KHz) para la capa de saltos en la que se tiene un TRX en promedio por sector (ver Figura 2.17); asumiendo que en promedio se tienen cinco usuarios simultáneamente en cada portadora; esto es, 5 Erlangs de tráfico, tenemos un EFL de 5 Erlangs / (6 Frecuencias x 8 Ranuras de tiempo) = 10.4 %.

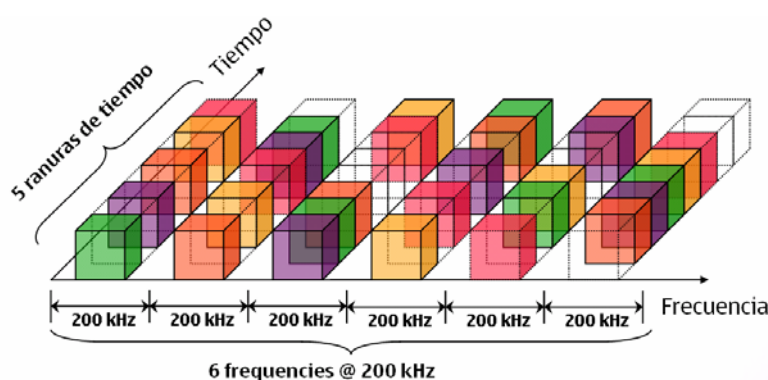


Figura 2.17: Sistema con 6 portadoras y 5 ranuras de tiempo de tráfico.

Teniendo en cuenta que el EFL es una medida de la eficiencia espectral que se tiene en una red, lo más conveniente es tener un EFL bien alto; sin embargo el nivel de EFL que se alcance en una red estará limitado por la calidad de la misma, ya que no se puede obtener una Carga Efectiva de Frecuencia alta si los indicadores de calidad sobrepasan los niveles permitidos por las entidades reguladoras.

2.7 Criterio para evaluar Indicadores de Calidad (KPI)

Para poder medir la capacidad de optimización que se consigue en la capa de saltos con el algoritmo propuesto, se evaluaron los indicadores de calidad descritos anteriormente comparando los resultados del plan obtenido con el algoritmo contra el plan que el operador mantiene actualmente en la red. Es decir, se comparó dos posibles soluciones para cada indicador de calidad. Esta sección describe el procedimiento a seguir para medir porcentajes relativos de ganancias tomando como ejemplo la Figura 2.18, que muestra dos posibles soluciones para la Tasa de Llamadas Caídas (DCR) de un sistema.

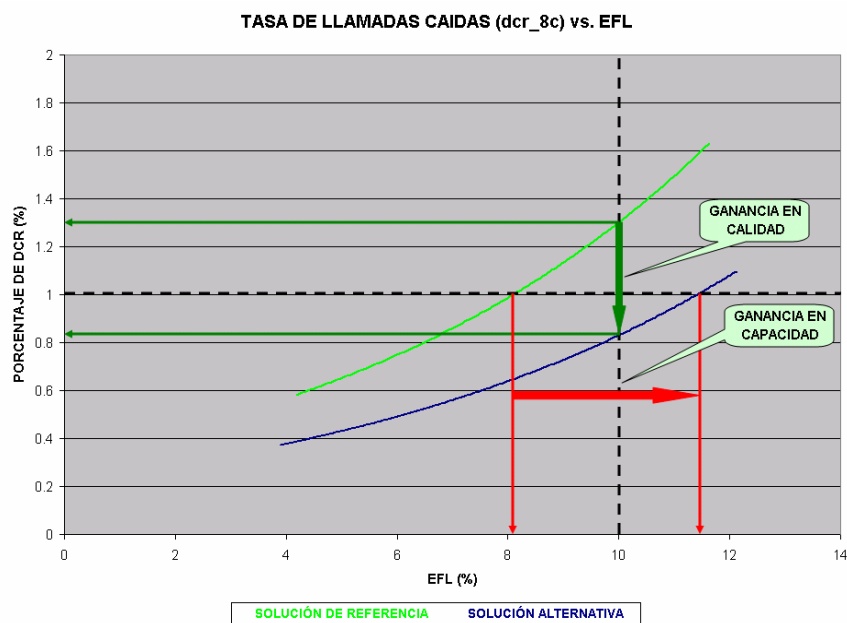


Figura 2.18: Evaluación de ganancias en calidad y capacidad.

Primero que todo, el lector debe notar que en el eje de las abscisas está la Carga Efectiva de Frecuencia (EFL) mientras que en el eje de las ordenadas tenemos el valor del DCR, por lo que la ganancia de calidad que la solución alternativa produce con respecto a la de referencia se mide en el eje vertical, mientras que el incremento de capacidad se mide en el eje horizontal. Para medir la ganancia en calidad tomaremos como referencia un EFL de 10%, ya que este es un valor promedio del EFL que tienen las redes actualmente (4), y lo que hacemos es interpolar los valores de DCR que cada curva solución tiene para este EFL. En el ejemplo, la solución referencia (KPI_{REF}) tiene un DCR de 1.3 mientras que la solución alternativa (KPI_{ALT}) tiene 0.82, para calcular la ganancia en calidad empleamos la ecuación 2.6, que nos una ganancia en calidad de 37%.

$$QG = \frac{|KPI_{REF} - KPI_{ALT}|}{KPI_{REF}} \times 100\% \quad (2.6)$$

Un procedimiento similar se emplea para medir la ganancia en capacidad, tomando en cuenta que ahora se medirá en el eje de las abscisas, por lo que es necesario establecer el umbral de cada KPI en el que se interpolarán los valores del EFL. Comúnmente estos umbrales los establece el operador y deben ser mejores que los impuestos por el

organismo regulador del estado, que en nuestro país sería la Superintendencia de Telecomunicaciones. En el ejemplo se evaluó la ganancia de capacidad para un DCR de 1%, obteniendo 8.2% de EFL para la curva de referencia y 11.6% de EFL para la curva alternativa, para calcular la ganancia en capacidad empleamos la ecuación 2.7, de la que obtenemos una ganancia de 41%.

$$CG = \frac{|EFL_{REF} - EFL_{ALT}|}{EFL_{REF}} \times 100\% \quad (2.7)$$

Este mismo procedimiento se aplicará a los demás indicadores de calidad evaluados.

CAPÍTULO 3

3. OPTIMIZACIÓN DE LA CAPA DE SALTOS DE UNA RED GSM

Desde la aparición de GSM, los operadores han optado por trabajar con redes no sincronizadas; sin embargo, el número de usuarios ha crecido tanto en los últimos años al punto que los saltos de frecuencias no es suficiente para evitar problemas de interferencia en las redes. La única manera de tener un control total sobre la interferencia es sincronizando la red (1); es decir, tener un alineamiento en las tramas y ranuras de tiempo que se transmiten en cada sitio. Con una red sincronizada es posible prever estadísticamente el número de colisiones que habrá en la misma, con lo que se puede optimizar su rendimiento simplemente con una adecuada asignación de los parámetros que forman el plan de frecuencias para la capa de saltos, como se demuestra en (12). Tanto la asignación de MAL como MAIO son procedimientos estudiados muy ampliamente por lo que hoy en día resulta muy sencillo asignar estos

parámetros y básicamente se lo hace siguiendo un patrón establecido. Sin embargo muy poco es lo que se ha dicho hasta ahora sobre el HSN, por lo que este capítulo describe el plan de frecuencias de la capa de saltos, hace un análisis de la necesidad que existe de optimizar la capa de saltos, resalta el impacto que tiene en el desempeño de una red GSM el Número de Secuencia de Saltos (HSN) y finalmente se plantea el problema de asignación del mismo

3.1 Descripción del plan de frecuencias para la capa de saltos

La sección 2.3, que describe los saltos de frecuencia en GSM, detalla los dos tipos de saltos de frecuencia que existen: banda base y sintetizado. En la gran mayoría de los casos las redes GSM emplean los saltos de frecuencia sintetizados. Para este tipo de saltos se requiere un conjunto de parámetros que juntos constituyen lo que se denomina *Plan de frecuencias para la capa de saltos*, recordemos que la asignación de canales se realiza por medio de un algoritmo pseudo aleatorio que toma como entrada este conjunto de parámetros. La intención de la presente sección es familiarizar al lector con el procedimiento de asignación de canales mediante la técnica de saltos de frecuencia.

En los saltos de frecuencia sintetizados, el canal utilizado por cada TRX cambia en cada trama TDMA, el canal a emplearse en la próxima lo determina un algoritmo (13). Los tres parámetros requeridos para fijar el canal son el número de trama TDMA, el HSN, y el MAIO. A partir de los tres el algoritmo calcula un índice (MAI) que constituye un puntero del arreglo MAL. Recordemos que la MAL es el conjunto de frecuencias asignadas para la capa de saltos de una determinada celda. Dado que cada sector puede tener varios transceptores, la manera de diferenciar los canales que emplea cada TRX es mediante el MAIO, cuyo valor representa un desplazamiento relativo con respecto al MAI, por lo que para cada nueva trama TDMA, se deben asignar canales a todos los transceptores de la capa de saltos de un sector, recordemos que el TRX del canal de BCCH emplea una frecuencia fija.

Para ilustrar este procedimiento fijémonos en el siguiente ejemplo: Se tiene el sector ESPOLX, el mismo que cuenta con 4 transceptores para la capa de saltos y desde luego uno para BCCH, este sector tiene configurado los parámetros que se muestran en la Tabla III.

Parámetros del sector ESPOLX	
MAL	128, 129, 130, 131, 132, 133
HSN	34
Parámetros por TRX	
TRX	MAIO
1	BCCH, No salta
2	0
3	2
4	4
5	6

Tabla III: Parámetros de la capa de saltos para el sector ESPOLX.

Si en una trama en particular el algoritmo determinó un MAI igual a 1 para el primer transceptor de la capa de saltos, esto implicaría que la frecuencia a utilizar por este sería el elemento uno del arreglo MAL, es decir, se emplearía la frecuencia 129 enumerando desde cero los elementos del arreglo. Las frecuencias utilizadas por los demás transceptores se muestran en la Tabla IV.

TRX	MAIO	FRECUENCIA
1	BCCH, No salta	120
2	0	129
3	2	131
4	4	133
5	6	128

Tabla IV: Frecuencias usadas por los transceptores del sector ESPOLX.

Teniendo el MAI para el primer transceptor, los índices de los demás transceptores se determinan con la operación MODULO ($MAI + MAIO, N$), donde N es el número de frecuencias disponibles en la MAL. Por esta razón el lector notará que el transceptor cinco emplea la frecuencia 128, primer elemento de la MAL, a pesar de tener un MAIO de 6.

Nótese que el TRX de BCCH emplea una frecuencia que se encuentra fuera del rango de las frecuencias definidas en la MAL, esto se debe a la restricción de que ningún TRX empleado para el canal de TCH puede usar la misma frecuencia que aquel usado para BCCH. En este ejemplo el sector ESPOLX tiene asignado una MAL de longitud 6, en las redes reales la longitud de la MAL depende primeramente del espectro disponible por el operador y del patrón de reuso que emplee. Por ello se puede tener una sola lista para toda una red, o varias de igual longitud, cada una con canales diferentes. Incluso se puede tener una lista para cada sector con diferentes longitudes, que constituye lo que se conoce como plan de frecuencia *AdHoc*.

De este ejemplo, podemos resumir como está formado un plan de frecuencias para la capa de saltos. En primer lugar tenemos la lista de canales (MAL) y el número de secuencia de saltos (HSN) que se definen para cada sector. Otro factor importante es el número de

transceptores del que dispone cada sector, por cada TRX se debe tener un MAIO, el cual se asigna de manera tal que dos transceptores dentro de un mismo sector no usen la misma frecuencia en la misma trama TDMA. Si hablamos de un sitio, que puede tener hasta tres sectores, lo único que puede variar es que todos los sectores de un mismo sitio tengan igual HSN; si ocurre esto, se debe procurar asignar el MAIO de manera tal que dos transceptores que pertenezcan al mismo sitio no empleen la misma frecuencia simultáneamente. La siguiente sección explica al lector la necesidad que se tiene de optimizar la capa de saltos de una red.

3.2 ¿Por qué optimizar la capa de saltos de una red?

En las redes no sincronizadas es muy poco, o casi nada, lo que se puede hacer para controlar las colisiones en la capa de saltos, ya que no existe un alineamiento en las tramas TDMA y ranuras de tiempo usadas por las celdas, y para ser más concretos, en la actualidad las diferencias son completamente aleatorias, por lo que no hay manera alguna de anticipar cuando y en que celdas se darán las colisiones. Hasta ahora la mayoría de operadores han mantenido sus redes sin sincronización debido principalmente al factor económico, ya que como fue explicado en el Capítulo 2 es necesario contar con un GPS en cada BTS para que exista un sincronismo total en la red, pero ciertamente

sincronizando una red es la única manera de controlar totalmente la interferencia producida por el reuso de frecuencias, con lo que se puede mejorar significativamente el desempeño de la red; así lo demuestran varios estudios como el realizado en (12). La Figura 3.1 muestra la Tasa de Error de Trama (FER) para una red real en la que se ha evaluado un plan AdHoc sin sincronismo y un plan con un reuso de 1/1 pero con la red sincronizada. Como vemos el último produce un menor FER; es decir, el plan con sincronismo tiene mejor rendimiento que cuando la red no estaba sincronizada y usaba un plan AdHoc.

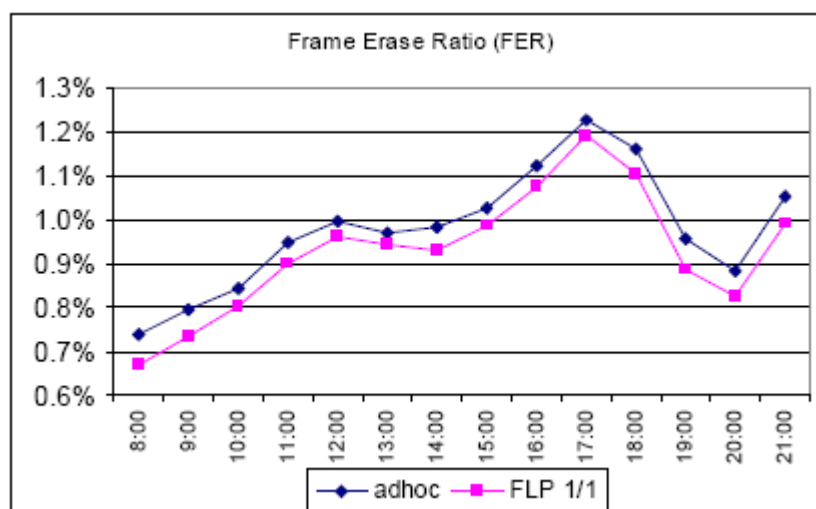


Figura 3.1 : UL FER para una red real (12).

Ahora, mejorando la calidad de la capa de saltos de una red lo que conseguimos indirectamente es aumentar la capacidad de la misma. Recordemos que hoy en día se utilizan dos modos de canales para

tráfico, AMR FR y AMR HR, siendo la ventaja del primero tener una mejor robustez ante la interferencia y la del segundo ofrecer una mayor capacidad del Hardware. Para ser más precisos, si con AMR FR se puede soportar cuatro usuarios, con AMR HR se podrían soportar hasta ocho, ya que con AMR HR se ocupa la mitad de cada ranura de tiempo. Desde luego, el uso de AMR HR tiene una consecuencia y es que degrada la calidad del enlace. Justamente lo que se gana mejorando los índices de calidad es que se puede aumentar la penetración de HR (capacidad del sistema) y compensar los valores de tal manera que se mantengan dentro de umbrales establecidos. Para explicar esto, veamos la Figura 3.2, en la cual se grafican dos soluciones alternativas para el DCR en una red. Si establecemos un umbral de 1%, observamos que la línea verde alcanza este valor para un EFL de 8%, mientras que la línea azul lo alcanza en 11.6% aproximadamente. Es decir, con la solución azul se logra una mayor eficiencia espectral, o lo que es lo mismo se soporta un mayor número de usuarios antes de llegar al umbral establecido. Podemos concluir que mientras se mejore la calidad de la capa de saltos de una red, mayor será la capacidad que consigamos en el sistema.

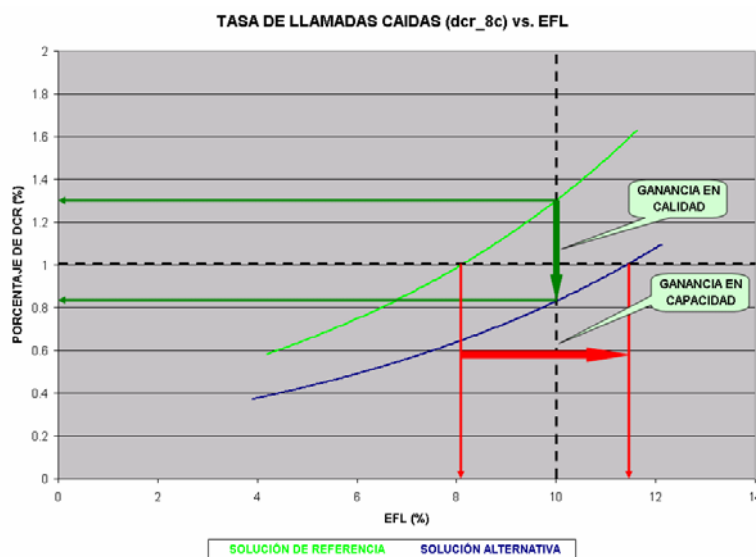


Figura 3.2: DCR vs. EFL para una red.

Teniendo en cuenta que el principal objetivo de todo operador es aumentar la capacidad de su red y así incrementar el número de usuarios, se vuelve imprescindible la optimización de la capa de saltos para mejorar el desempeño de la misma y en especial a través de una correcta asignación de HSN como se plantea en la siguiente sección.

3.3 Influencia del HSN en el desempeño de la capa de saltos

A pesar de que el algoritmo de asignación de canales de GSM genera índices seudo aleatoriamente a partir del HSN, este último es quien establece el número de colisiones co-canal y adyacentes que hay en un sector en una determinada trama. Quizás se podrá pensar que como

una trama dura 4.615 ms el hecho de que dos transceptores empleen la misma frecuencia al mismo tiempo no es muy relevante. Pero si tenemos presente que cada trama está numerada de 0 a 2'715,657, debemos tener en cuenta que si en la mitad de estas tramas existen colisiones, estamos hablando de que durante una hora y 45 minutos habrá interferencia entre los sectores en los que se producen las colisiones, lo cual se reflejaría en una pésima calidad de servicio que incluso sería percibida notablemente por el usuario. Es por este motivo que el HSN se debe asignar de una manera tal que se minimicen las colisiones co-canal entre los sectores que constituyen una red. El análisis realizado en (1) demuestra que es preferible reducir las colisiones co-canal aún a costas de aumentar las colisiones por canales adyacentes, ya que son las primeras las que más influyen en el rendimiento de la red.

Muchas de las personas que se dedican al planeamiento de redes manejan el criterio de que el HSN se puede asignar aleatoriamente a los sitios de una red teniendo como única restricción el hecho de que dos sitios vecinos no pueden tener el mismo HSN, otros van un poco más allá y asignan el HSN de una manera tal que se maximice la distancia mínima de reuso en la red (1); si bien es cierto que con ambos criterios se pueden generar planes con los que la red opere, debemos

indicar que se puede optimizar mucho más el funcionamiento a través de un plan de HSN que minimice las colisiones co-canal entre celdas potencialmente interferentes. La Figura 3.3 ilustra la influencia que tiene el HSN en el número de colisiones que se pueden producir entre dos sectores. El sector 1 tiene una HSN de 5, mientras que el HSN del sector 2 se ha variado de 1 a 63. De esta gráfica podemos concluir que en el sector 2 se debe asignar 18 como HSN, ya que produce el menor de número de colisiones.

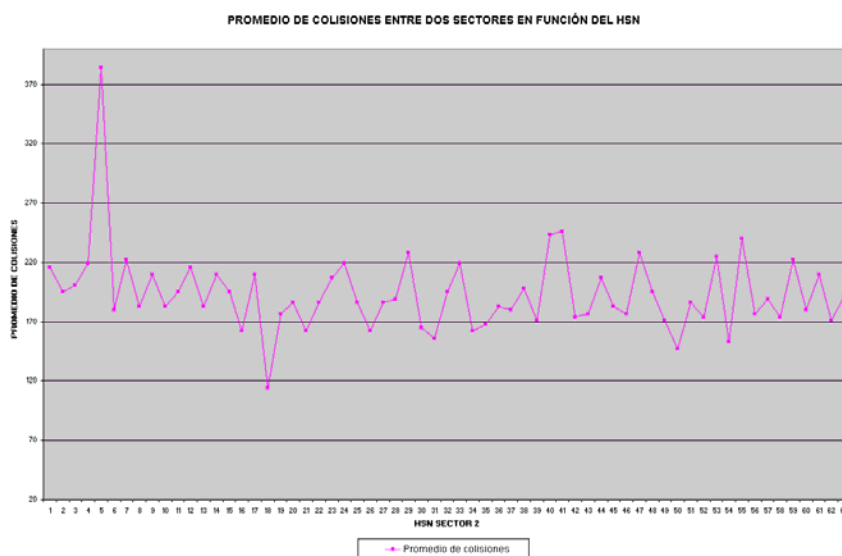


Figura 3.3: Colisiones co-canal entre dos sectores en función del HSN.

La Figura 3.4 muestra que diferentes combinaciones de HSN en tres sectores pertenecientes a diferentes sitios producen diferentes números de colisiones co-canal.

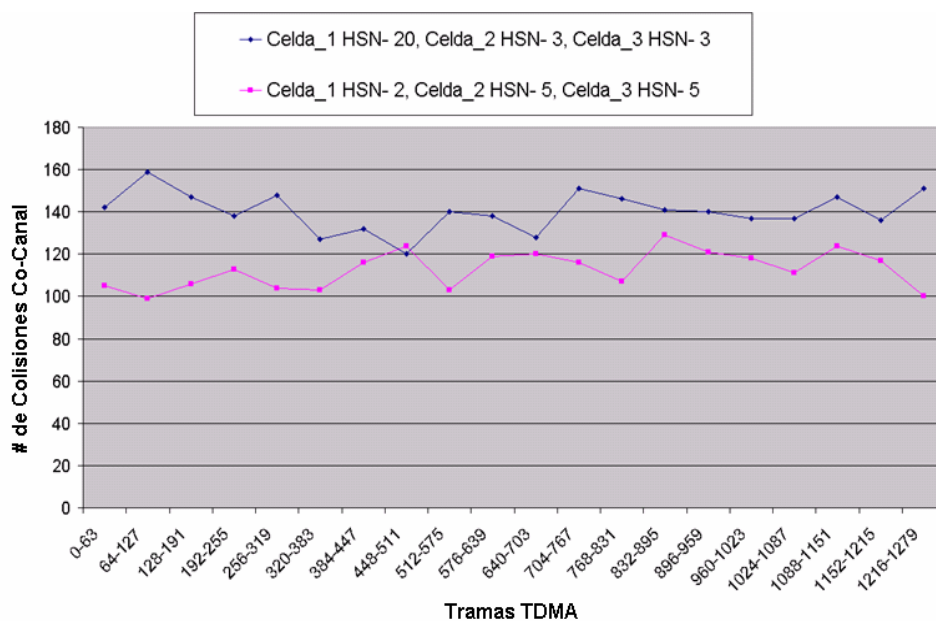


Figura 3.4: Colisiones co-canal entre tres sectores.

La figura ilustra el caso de tres sectores, pero de la misma manera se puede encontrar la combinación adecuada para una red completa, de tal manera que se minimicen las colisiones entre sectores con una gran interferencia mutua. Precisamente esto constituye el punto de partida del presente trabajo. El objetivo es disponer de una herramienta que permita crear un plan de HSN para una red sincronizada de cualquier tamaño a partir de cierta información. La siguiente sección describe analíticamente el problema de asignación de HSN en una red real.

3.4 Planteamiento del problema de asignación de HSN

El HSN es un parámetro que se puede asignar por sector o por sitio dependiendo del patrón de reuso que se tenga en la red (ver Figuras 3.5 y 3.6). Para el segundo caso todos los sectores de un mismo sitio tendrían igual HSN. La asignación del Número de Secuencia de Salto en una red no es otra cosa que distribuir los 63 HSN disponibles entre todos los sectores que conforman la red, desde luego se debe recurrir al reuso, ya que por lo general en una red se tienen más de 63 sectores o sitios según sea el caso. Dicha planeación se realiza procurando minimizar colisiones, es decir se procura asignar HSN que eviten las colisiones co-canal entre los sectores.

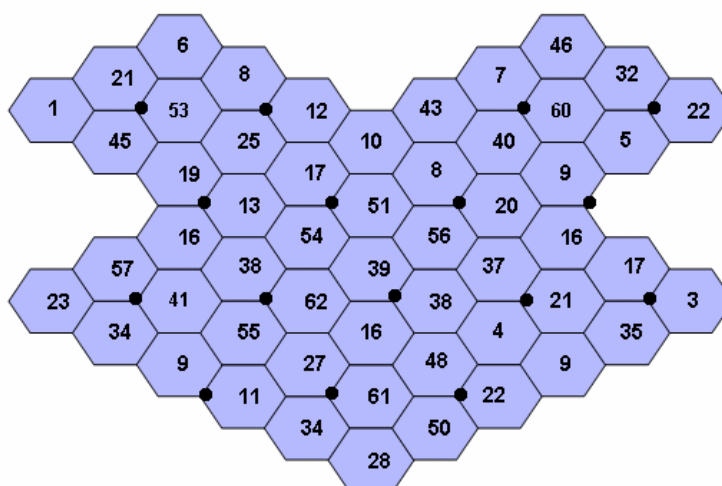


Figura 3.5: Asignación de HSN por sector.

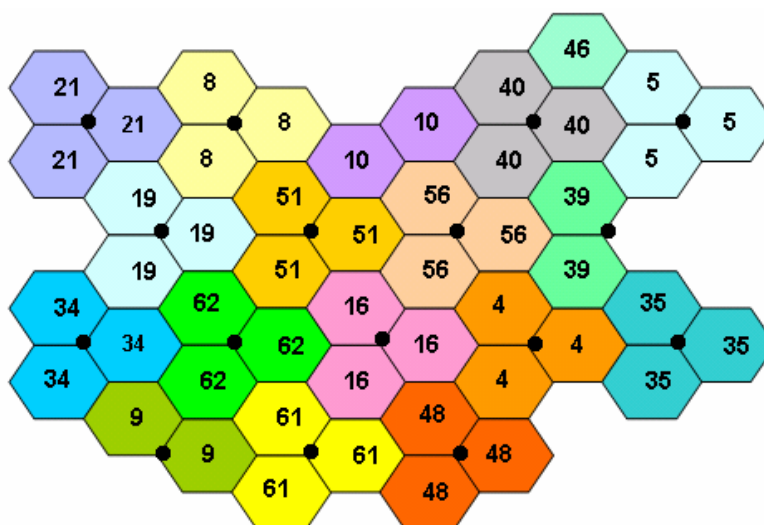


Figura 3.6: Asignación de HSN por sitio.

La asignación de HSN por sitio se utiliza cuando se tiene una sola MAL para toda la red, ya que las colisiones co-canal en un mismo sitio se evitan mediante una correcta planeación de MAIO, y las colisiones entre sectores de diferentes sitios se “evitan” asignando diferentes HSN a los sitios. De manera general, la asignación de HSN se la realiza por sector en el presente trabajo, ya que dependiendo del factor de reuso que se tiene en la red se pueden conseguir planes en los que a sectores de un mismo sitio se les asigna igual HSN.

Esto concluye este capítulo, como el lector se habrá dado cuenta se ha analizado la influencia que tiene el HSN en el número de colisiones que hay en una red y se ha presentado de manera muy general en que consiste la asignación de HSN. En el siguiente capítulo se detalla por

completo el algoritmo para asignar el HSN, empezando por delinear las bases de dicha solución y luego presentando el funcionamiento del algoritmo.

CAPITULO 4

4. ALGORITMO PROPUESTO PARA ASIGNACIÓN DE HSN

Este capítulo propone un algoritmo de optimización que encuentra una combinación de HSN para todos los sectores de una red, de tal manera que minimiza la interferencia entre las celdas; por lo que constituye una guía descriptiva y funcional del algoritmo, detallando los requisitos de información, mediciones de campo, el funcionamiento y finalmente las fortalezas y debilidades que tiene el algoritmo.

4.1 Información requerida y mediciones de campo realizadas

El algoritmo realiza los cálculos a partir de información netamente estadística. Básicamente se alimenta de dos archivos. En primera instancia se tiene un archivo con la configuración del plan de frecuencias para la capa de saltos de cada sector de la red, en el que

constan todos los parámetros con excepción, desde luego, del HSN. El formato de este archivo se muestra en la Tabla V.

SITE	CELL	TRX	MAIO OFFSET	MAIO STEP	MAL
1RODEMAYO	1RODEMAYOX	4	0	3	128 131 151 154
1RODEMAYO	1RODEMAYOY	4	5	3	129 132 152 155
1RODEMAYO	1RODEMAYOZ	3	10	3	130 133 153 156
AGUIRRE	AGUIRREX	2	0	3	129 132 152 155
AGUIRRE	AGUIRREY	2	5	3	130 133 153 156
AYACUCHO	AYACUCHOX	4	0	2	128 131 151 154
AYACUCHO	AYACUCHOY	5	0	1	129 132 152 155
AYACUCHO	AYACUCHOZ	4	0	2	130 133 153 156
BIBLIOTECA	BIBLIOTECAX	4	0	3	128 131 151 154
BIBLIOTECA	BIBLIOTECAY	4	0	2	129 132 152 155
BIBLIOTECA	BIBLIOTECAZ	3	10	3	130 133 153 156
BOLIVAR	BOLIVARX	5	0	3	128 131 151 154
BOLIVAR	BOLIVARY	5	5	3	129 132 152 155
BOLIVAR	BOLIVARZ	5	0	1	130 133 153 156
BOULEVARD	BOULEVARDX	5	0	3	128 131 151 154
BOULEVARD	BOULEVARDY	5	5	3	129 132 152 155

Tabla V: Configuración de la capa de saltos de los sectores.

Donde los campos representan:

SITE: El nombre del sitio.

CELL: El nombre del sector.

TRX: Número de transceptores que posee el sector

MAIO_OFFSET y MAIO_STEP: Juntos son empleados para determinar el Índice de Desplazamiento Relativo (MAIO) para cada TRX dentro de una celda.

MAL: Vector que contiene la lista de frecuencias disponibles para cada celda.

Para la implementación realizada, la Tabla V debe estar en un archivo de texto en el que los campos se delimitan con comas.

Por otro lado, el segundo archivo en el que consta de las relaciones de interferencia entre las celdas de la red. Dichas relaciones se presentan en forma de matriz, de ahí que se denomina *Matriz de Interferencia* y para poder obtenerla es necesario recolectar mediciones de campo por medio de alguna herramienta del Subsistema de Administración de Red (NMS).

Para el presente trabajo, se obtuvo la *Matriz de Interferencia* empleando la herramienta *Optimizer*, propietaria de Nokia, sin embargo las relaciones de interferencia entre las celdas a partir de las cuales *Optimizer* genera la matriz por lo general no están disponibles, razón por la cual es necesario recolectar mediciones de campo durante dos o tres días al menos para obtenerlas. Estas estadísticas se obtienen activando dos mediciones denominadas *Channel Finder* y *DAC*. Dichas mediciones se activan mediante comandos MML en el

Subsistema de Administración de la red. MML es un lenguaje que emplea comandos genéricos, por lo que no dependen de la plataforma.

La activación de estas mediciones permite retener, a más de los reportes de los móviles, información adicional en la BSC que comúnmente no es almacenada, ya que para generar una matriz de interferencia completa, *Optimizer* necesita los reportes de mediciones de los móviles para cada frecuencia de BCCH de la red. Como es conocido, el móvil mide la potencia recibida de las seis celdas vecinas con mejor señal y las reporta a la BSC, lo que permite determinar las celdas más interferentes a la servidora, ver Figuras 4.1 y 4.2.

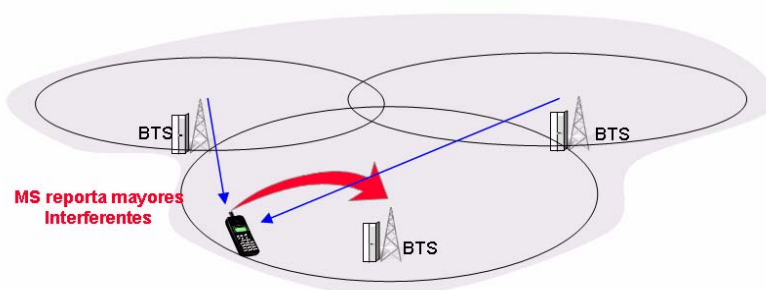


Figura 4.1: El móvil reporta celdas interferentes.

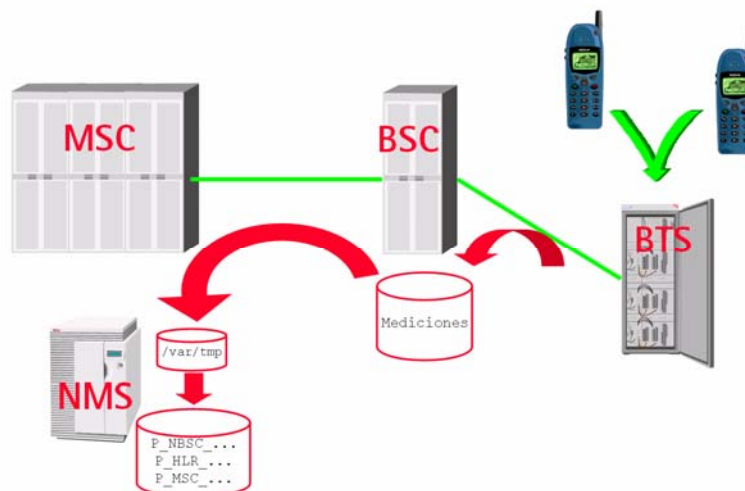


Figura 4.2: Flujo de las mediciones reportadas por el móvil.

Las relaciones de interferencia entre las celdas se basan más que nada en los niveles de potencia, razón por la cual en la *Matriz de Interferencia* se reflejan factores geográficos de entorno de los sectores; es decir, la distancia, alteraciones del terreno, etc.

Para medir la relación de interferencia entre dos sectores se evalúa la relación Portadora a Interferencia, C/I, de los mismos. *Optimizer* en particular da como resultado la probabilidad de que la relación Portadora a Interferencia entre dos celdas cualesquiera sea menor de 12 dB, esto simplemente es una manera de expresar la relación de interferencia entre las celdas. La herramienta evalúa las relaciones C/I entre la celda servidora y las interferentes en el área de dominancia de

la primera y con todas las muestras recolectadas calcula la probabilidad de interferencia.

Una vez que las mediciones han sido recolectadas en el Sistema de Administración de Red, el procedimiento, para generar la matriz de interferencia en la herramienta *Optimizer* es el siguiente:

- En menú *Tools*, se escoge la opción *Network Statistics* dentro de la cual se selecciona *Interferente Matrix*. Ver Figura 4.3.

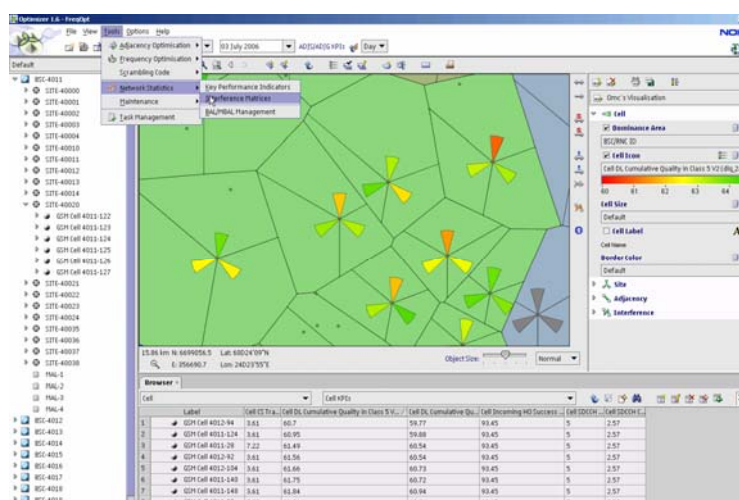


Figura 4.3: Generación de la Matriz de Interferencia.

- Luego aparece una ventana como la de la Figura 4.4, en la que se debe presionar el botón *Retrieve* e ingresar el periodo en el

cual se hicieron las mediciones. Para el resto de opciones se usaron los valores preestablecidos.

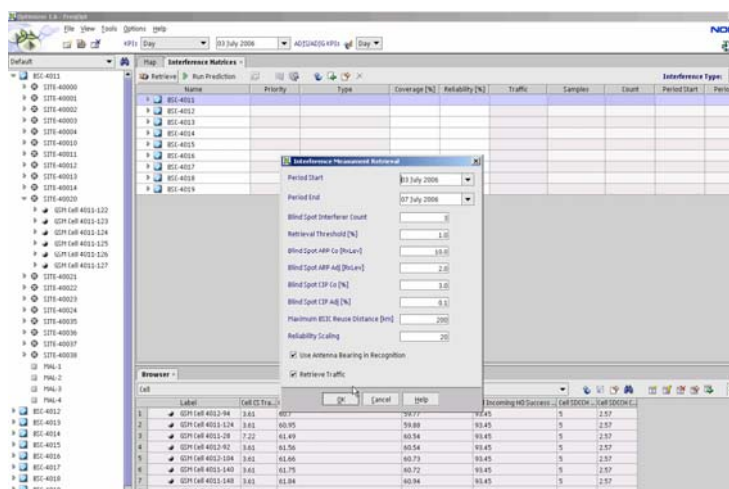


Figura 4.4: Ingreso de periodo de mediciones.

- Es muy importante que en la opción de *Interferente Type* se escoja la opción de *CIP*, esto es Probabilidad de Interferencia.

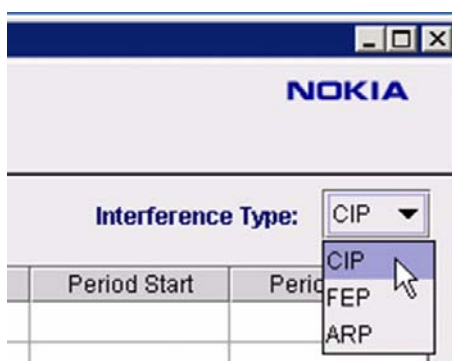


Figura 4.5: Selección del tipo de matriz.

- Finalmente se deben seleccionar las BSC para las cuales se activaron las mediciones y exportar la Matriz de Interferencia para cada una.

The screenshot shows the 'Optimizer 1.6 - Actual' application window. The left pane displays a tree view of BSCs (BSC-4034 to BSC-4052). The right pane shows the 'Interference Matrices' table with columns: Name, Priority, Type, Coverag..., Reliabili..., Traffic, Samples, Count, Period S..., and Period E... The table contains data for several BSCs, including BSC-4011, BSC-4012, BSC-4013, BSC-4014, BSC-4015, BSC-4016, BSC-4017, BSC-4018, BSC-4019, BSC-4050, BSC-4051, and BSC-4052. Each BSC has associated SETs (e.g., SET-353, SET-1, SET-179) with their respective metrics.

Name	Priority	Type	Coverag...	Reliabili...	Traffic	Samples	Count	Period S...	Period E...
BSC-1001									
BSC-2001									
BSC-4011									
SET - 353		MEASURED	100	70.98	1765450.	42093525	3715	01-Apr...	10-Apr...
SET - 1		SIMPLE_PREDI...	100	70	0	0	2280	10-Apr...	10-Apr...
SET - 179		SIMPLE_PREDI...	100	70	0	0	10876	10-Apr...	10-Apr...
BSC-4012									
BSC-4013									
BSC-4014									
BSC-4015									
BSC-4016									
BSC-4017									
BSC-4018									
BSC-4019									
SET - 108		MEASURED	100	56.6	1367137.	24816600	2783	03-Apr...	09-Apr...
SET - 1		SIMPLE_PREDI...	100	70	0	0	2280	10-Apr...	10-Apr...
SET - 179		SIMPLE_PREDI...	100	70	0	0	10715	10-Apr...	10-Apr...

Figura 4.6 : Selección de BSC.

De este último paso se obtiene una matriz por cada BSC. Luego de procesar esta información en una base de datos y filtrar solo las celdas que pertenecen al área escogida para realizar las pruebas se obtuvo un archivo con un formato similar a la Tabla VI.

VSITE	VCELL_NAME	INTSITE	INTCELL_NAME	CIP
1RODEMAYO	1RODEMAYOX	1RODEMAYO	1RODEMAYOZ	39.71
1RODEMAYO	1RODEMAYOX	LUQUE	LUQUEX	23.42
1RODEMAYO	1RODEMAYOX	ROCA	ROCAZ	22.89
1RODEMAYO	1RODEMAYOX	PIEDRAHITA	PIEDRAHITAX	18.99
1RODEMAYO	1RODEMAYOX	PCENTENARIO	PCENTENARIOZ	18.51
1RODEMAYO	1RODEMAYOX	PJUSTICIA	PJUSTICIAX	17.84
1RODEMAYO	1RODEMAYOX	1RODEMAYO	1RODEMAYOY	13.62
1RODEMAYO	1RODEMAYOX	PJUSTICIA	PJUSTICIA Y	9.12
1RODEMAYO	1RODEMAYOX	ROCA	ROCA X	8.26
1RODEMAYO	1RODEMAYOX	NAVALNORTE	NAVALNORTE Y	3.57
1RODEMAYO	1RODEMAYOX	COLON	COLON Y	3
1RODEMAYO	1RODEMAYOX	LUQUE	LUQUE Z	3
1RODEMAYO	1RODEMAYOX	VELEZ	VELEZ X	2.34
1RODEMAYO	1RODEMAYOX	PIEDRAHITA	PIEDRAHITA Y	2.13
1RODEMAYO	1RODEMAYOX	VELEZ	VELEZ Z	1.74
1RODEMAYO	1RODEMAYOX	NUEVOCARMEN	NUEVOCARMEN X	1.49
1RODEMAYO	1RODEMAYOX	PCENTENARIO	PCENTENARIO Y	1.32
1RODEMAYO	1RODEMAYOX	ROCA	ROCA Y	1.01
1RODEMAYO	1RODEMAYOY	1RODEMAYO	1RODEMAYOZ	56.79
1RODEMAYO	1RODEMAYOY	LUQUE	LUQUE X	43.86
1RODEMAYO	1RODEMAYOY	1RODEMAYO	1RODEMAYOX	30.48
1RODEMAYO	1RODEMAYOY	QUISQUIS	QUISQUIS Y	28.11
1RODEMAYO	1RODEMAYOY	PJUSTICIA	PJUSTICIA X	20.63
1RODEMAYO	1RODEMAYOY	PIEDRAHITA	PIEDRAHITA Y	16.17
1RODEMAYO	1RODEMAYOY	MSALADO	MSALADO X	11.99
1RODEMAYO	1RODEMAYOY	PJUSTICIA	PJUSTICIA Y	9.93
1RODEMAYO	1RODEMAYOY	PIEDRAHITA	PIEDRAHITA X	9.31

Tabla VI: Ejemplo de matriz de interferencia.

Donde: *VSITE* representa el sitio en el que se encuentra el sector que sufre la interferencia, *VCELL_NAME* es el sector que sufre la interferencia, *INTSITE* indica el sitio en el que se encuentra el sector que provoca la interferencia. *INTCELL_NAME* es el sector que provoca la interferencia y *CIP* representa la probabilidad de que la relación *C/I* entre *VCELL_NAME* e *INTCELL_NAME* sea menor a 12 dB.

Esta Probabilidad de Interferencia se puede graficar para cada celda, permitiendo visualizar todos los interferentes a una celda en particular, como se muestra en la Figura 4.7.

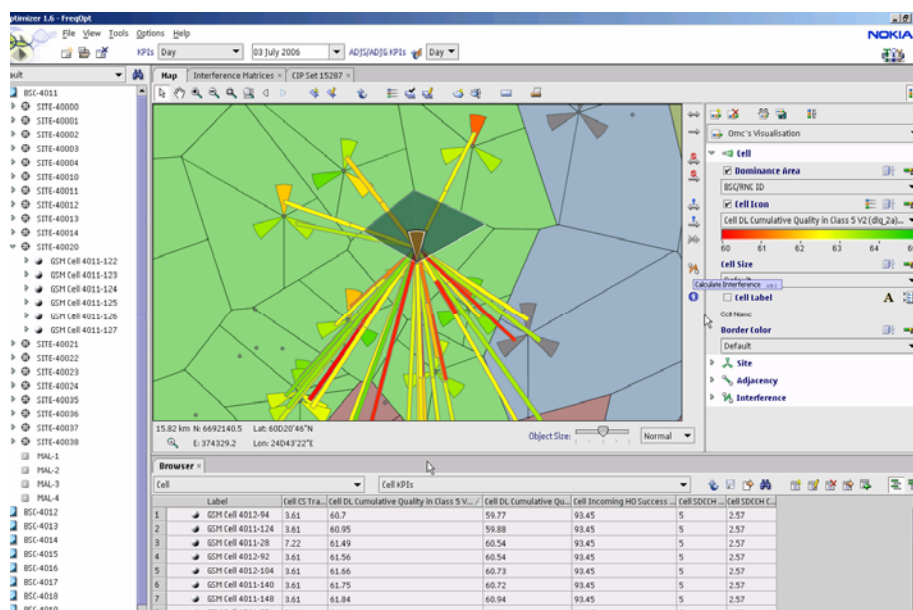


Figura 4.7: Gráfico de Probabilidad de Interferencia para una celda.

4.2 Bases para el desarrollo del algoritmo

El problema de asignación de frecuencias se ha estudiado por varias décadas, muchos son los métodos que se han propuesto para asignar frecuencias fijas a las celdas de una red celular, una gran mayoría se basa en algoritmos de optimización, en los que se plantea una función objetivo y una serie de restricciones, que no son otra cosa que separaciones mínimas que deben cumplir las frecuencias que se

asignen a celdas que pertenecen a un mismo sitio o celdas que son vecinas. Para la teoría de optimización la función objetivo se denomina función de costos y el objetivo de los algoritmos es encontrar un conjunto solución de frecuencias que constituya el mínimo de la función. En las redes celulares el costo viene dado por la interferencia que dos celdas se pueden causar mutuamente por el uso de determinadas frecuencias y por las violaciones a las restricciones requeridas, por lo que un algoritmo de asignación de frecuencias debe asignarlas de tal manera que se minimicen las violaciones y por consiguiente la interferencia entre los sectores de la red.

El mismo concepto se puede aplicar a la asignación de parámetros de un plan de frecuencias para la capa de saltos; y como es el caso del presente trabajo, se empleará el mismo fundamento para diseñar un algoritmo de asignación de HSN, considerando que ahora no se asigna una frecuencia por sector sino una por cada TRX del sector y en cada trama TDMA. Hasta ahora el criterio más usado para la asignación de HSN había sido el de maximizar la distancia mínima de reuso de HSN entre las celdas de la red, pero como se describió en la Sección 3.2 esto no garantiza que se está minimizando las colisiones en la red. La única manera de tener una idea de la cantidad de colisiones co-canal que hay en una red es simular el proceso de asignación de canales, lo

cual permite generar información estadística del número de colisiones que hay entre cada par de celdas, y como tenemos la matriz de interferencia el objetivo es eliminar las colisiones entre celdas que son interferentes potenciales. Desde luego, esto no siempre será posible por lo que definimos la función de costos a minimizar, la cual está compuesta por dos factores: En primer lugar se tiene la *Probabilidad de Colisión* que viene dada por la ecuación 4.1:

$$P_{co} = \frac{CO}{64} \quad (4.1)$$

Donde, CO = Número de tramas en las que hubo al menos una colisión co-canal.

Se decidió evaluar la *Probabilidad de Colisión* cada 64 tramas TDMA, porque como veremos más adelante en total se evalúan 128,000 tramas, por lo que 64 da un número entero y considerable de muestras para calcular la probabilidad.

El objetivo es que los HSN que se asignen a dos celdas deben minimizar la *Probabilidad de Colisión* entre ellos. Pero si pensamos en una red entera, resulta prácticamente imposible obtener una combinación de HSN que minimice la P_{co} en toda la red, es por ese

motivo que aparece otro factor en la función de costo, la *Probabilidad de Interferencia*, que es una métrica del nivel de interferencia que existe entre dos celdas, esta probabilidad se obtiene de la *Matriz de Interferencia* en la que para cada par de celdas j, k se tiene la probabilidad de que la relación portadora a interferencia desde la celda k hacia la celda j sea menor a 12 dB esta dada por $P(C/I < 12dB)(j, k)$. Se seleccionó 12 dB como umbral para evaluar esta probabilidad siguiendo las recomendaciones del estándar de GSM en el que se especifica que se debe utilizar 9dB más un margen de 3dB como umbral para la relación Portadora a Interferencia.

La función de costo a minimizar es una sumatoria del producto de estos dos factores para cada par de celdas y viene dada por la ecuación 4.2:

$$\text{Costo} = \sum_{j=1, k=1, j \neq k}^m Pco(j, k) P(C/I < 12dB)(j, k) \quad (4.2)$$

Donde m representa el número de sectores que existen en la red. La ecuación 4.2 se determinó a partir de las funciones de costos empleadas por los algoritmos de optimización genéricos, en los que se suman los productos de los factores que afectan directamente el costo de la función objetivo.

Se podría pensar que la *Probabilidad de Colisión Co-canal* se evalúa cada 64 tramas hasta completar los 2'715,647 números de tramas TDMA posibles, pero desde luego eso resultaría en un algoritmo pobre en eficiencia que le tome varios días terminar un plan, para evitar esto, lo que se propone es tomar una muestra de esas tramas y en ellas evaluar las colisiones, específicamente se evaluará una muestra de 10 minutos de enlace, que son suficientes para obtener una tendencia en el número de colisiones (1).

El algoritmo que se describe en la siguiente sección tiene como objetivo encontrar el mínimo de la ecuación 4.2.

4.3 Diagramas de flujo

El algoritmo propuesto en el presente trabajo es detallado en esta sección a través de diagramas de flujo. La implementación del mismo se hizo en lenguaje C, pero el código se resume en los siguientes diagramas.

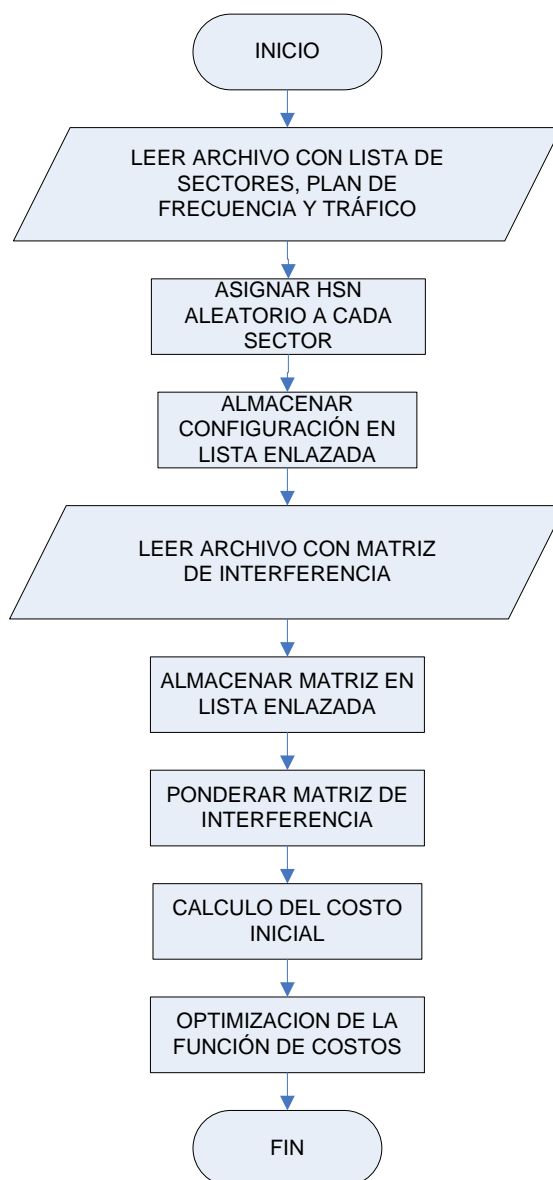


Figura 4.8: Programa principal.

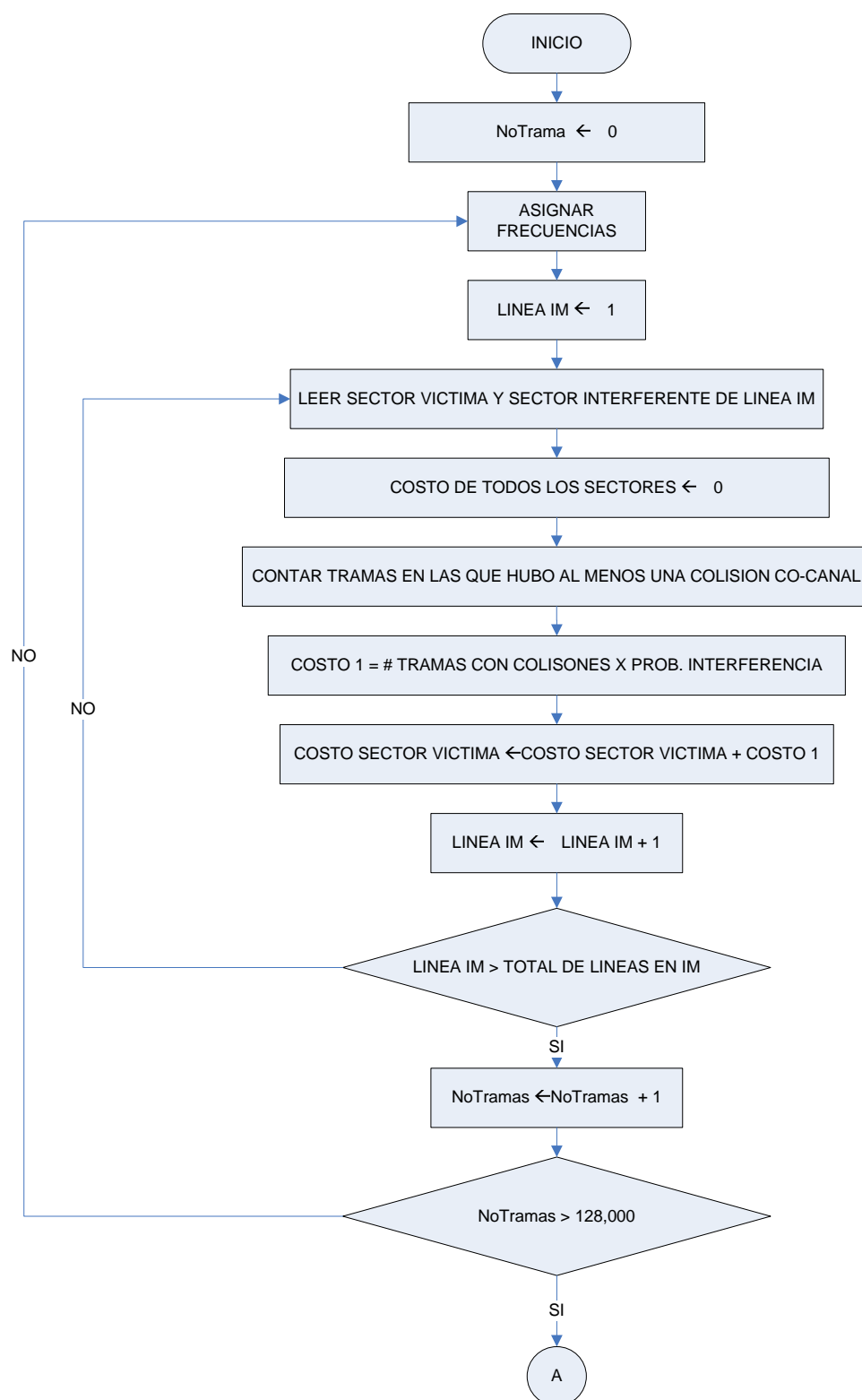


Figura 4.9: Cálculo del costo parte 1.

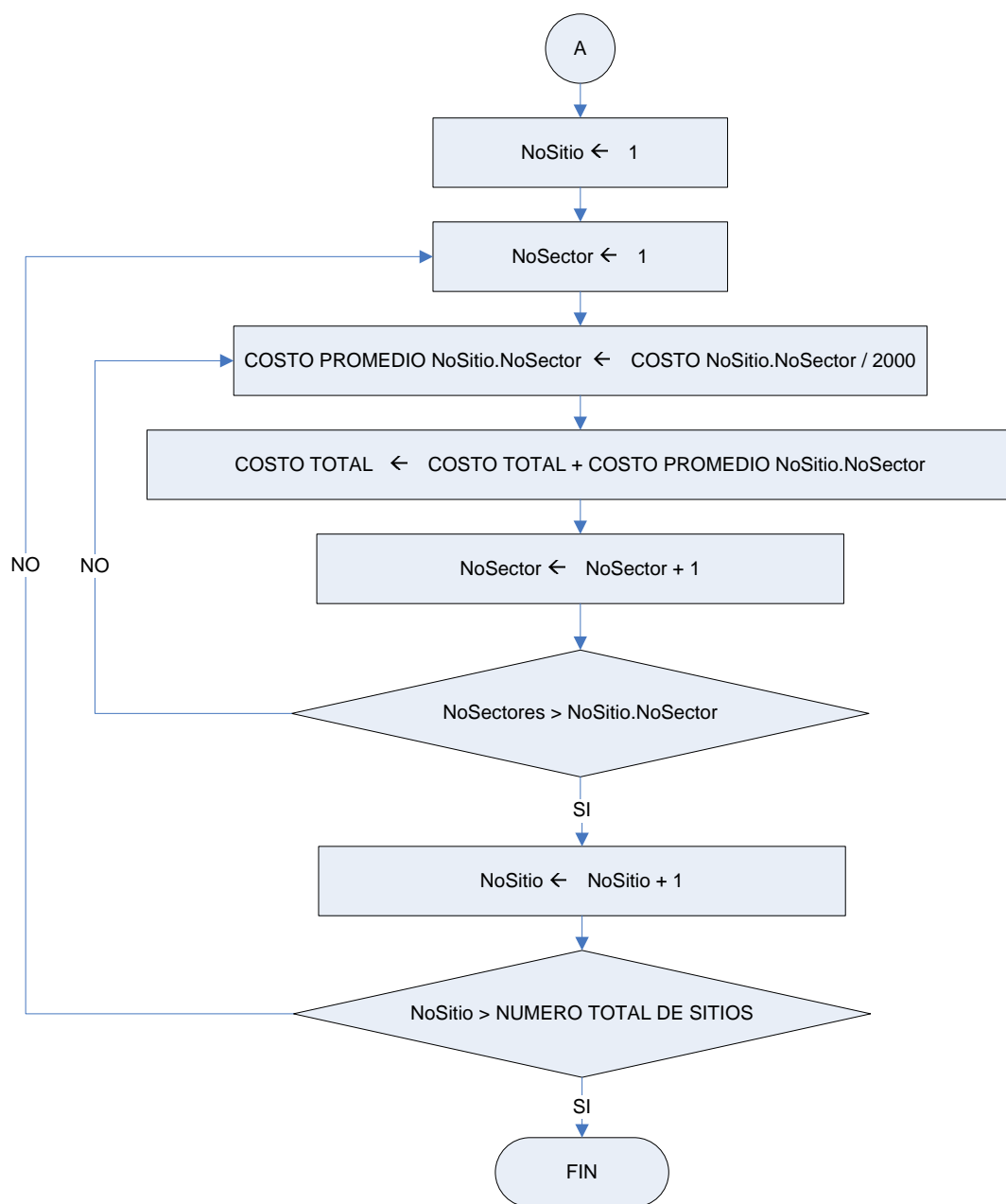


Figura 4.10: Cálculo del costo parte 2.

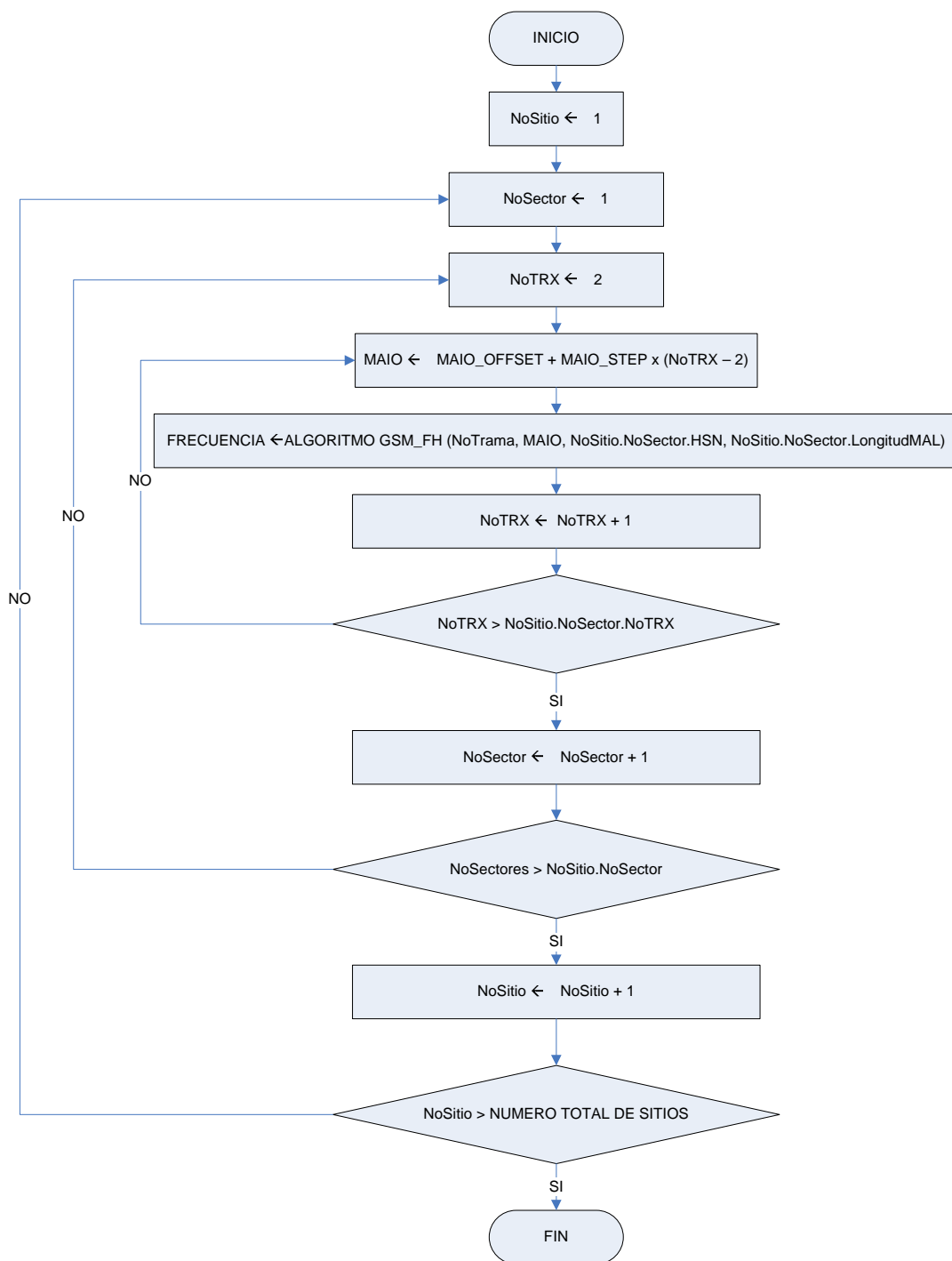


Figura 4.11: Asignación de frecuencias.

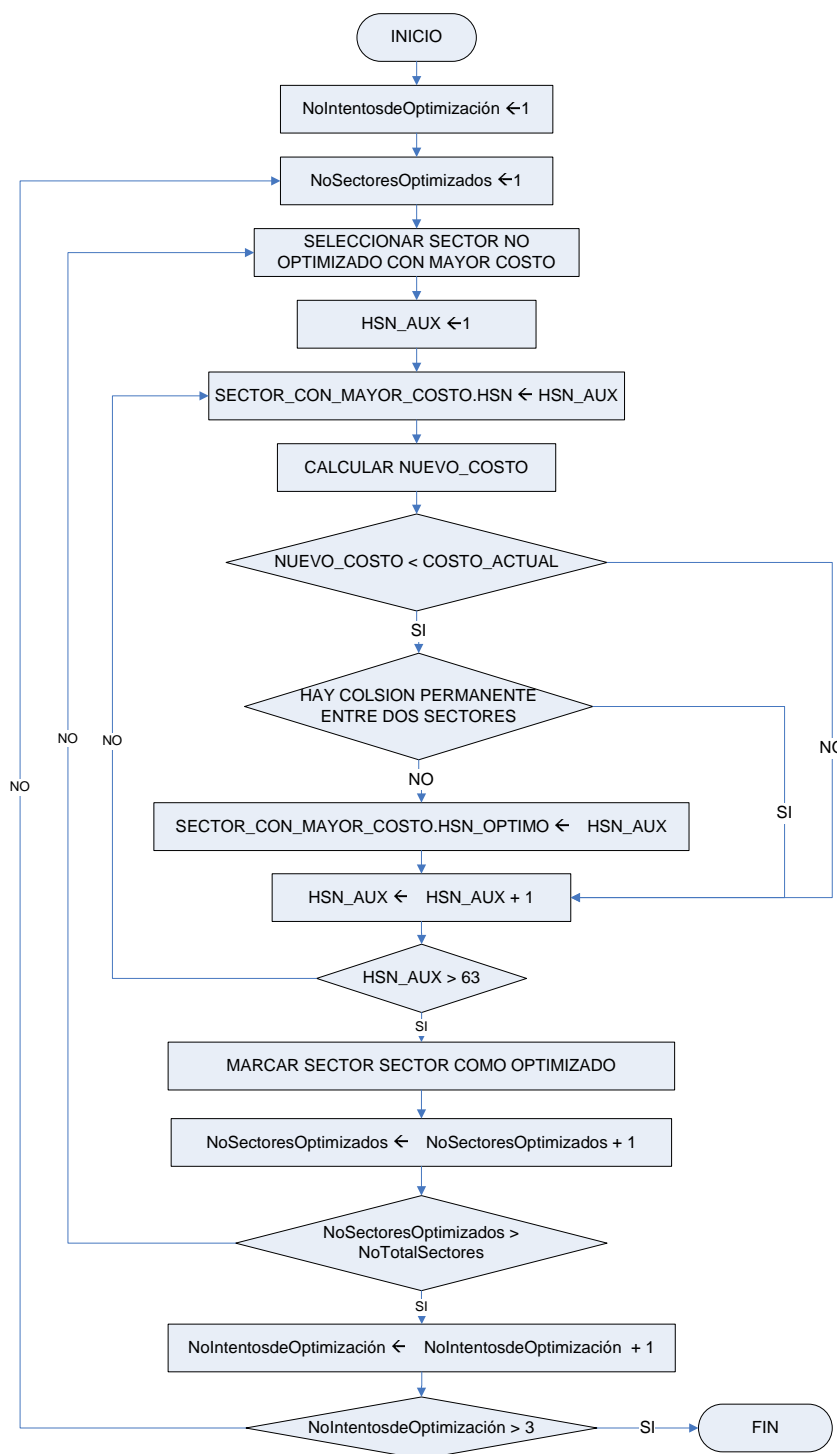


Figura 4.12: Optimización de la función de costos.

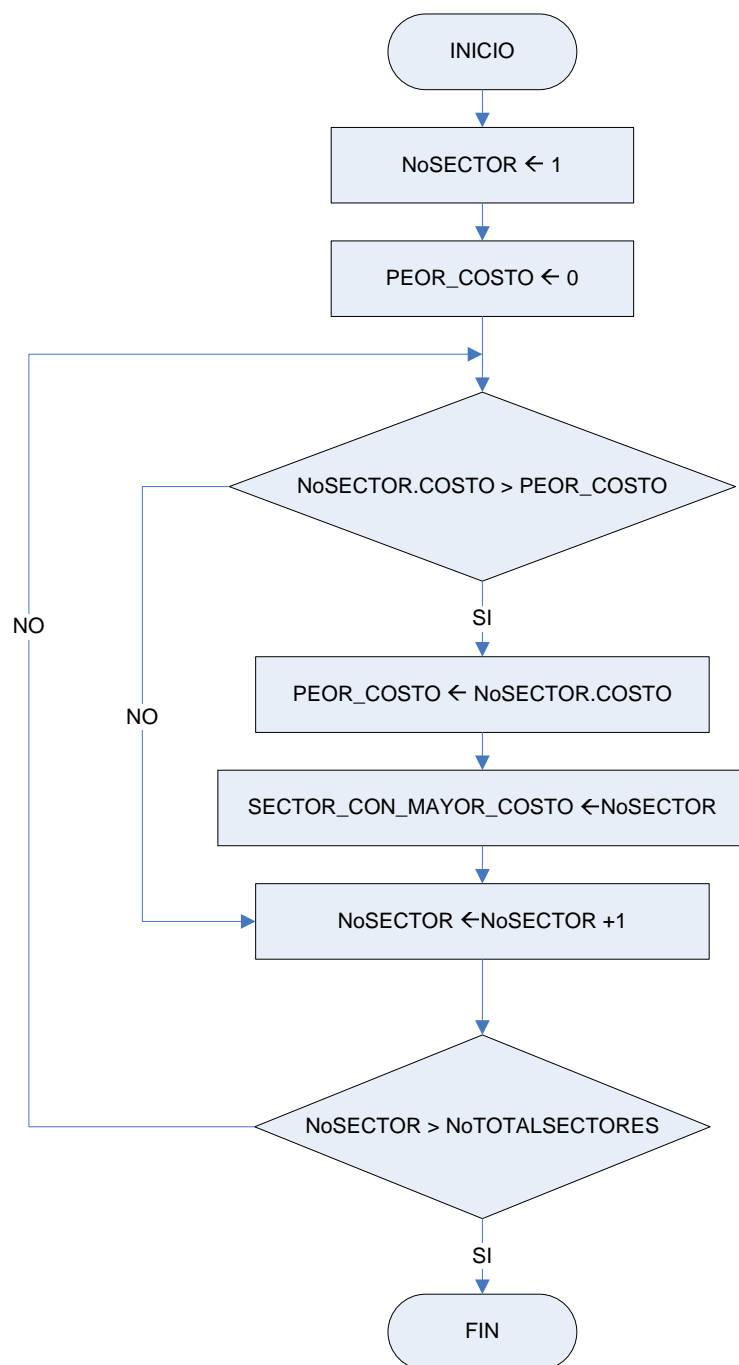


Figura 4.13: Selección del sector con mayor costo.

Como podemos observar en el diagrama mostrado en la Figura 4.11, se utiliza el algoritmo de asignación de canales para saltos de frecuencia de GSM, el lector encontrará este algoritmo en el Apéndice A.

4.4 Descripción funcional

Como se observa en los diagramas de flujo mostrados en la sección anterior, el algoritmo propuesto consta de dos etapas claramente diferenciadas:

- En primer lugar se tiene una etapa en la que se carga toda la información de la red y de la matriz de interferencia en memoria para luego evaluar la función de costos.
- La segunda etapa consiste en una búsqueda de un conjunto de HSN que minimice la función de costos.

La Figura 4.14 muestra una descripción gráfica de los procesos involucrados en el algoritmo. A continuación se detalla cada uno:

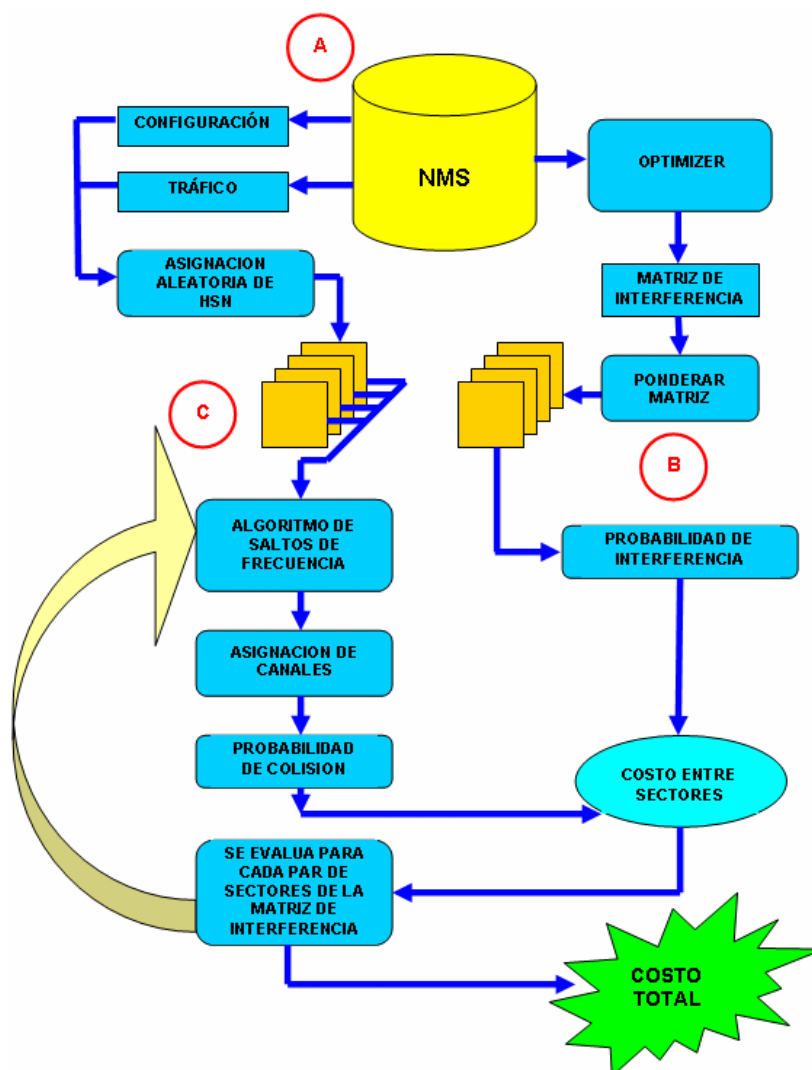


Figura 4.14: Diagrama de bloques del proceso inicial del algoritmo.

- A. El algoritmo comienza leyendo toda la información referente a la configuración de la red, parámetros del plan de frecuencia para la capa de saltos y las relaciones de interferencia entre los sectores. Esta información debe constar en archivos de texto cuyo formato fue descrito en la sección 4.1. Toda esta información es cargada

en listas enlazadas. El algoritmo maneja dos listas, una con información particular de cada celda y otra con las relaciones de interferencia entre las mismas.

- B. Una vez que toda la información se ha cargado en memoria, se procede a una ponderación de las relaciones de interferencia entre los sectores. Para esto, para cada sector se ordenan sus interferentes descendientemente con respecto a la *Probabilidad de Interferencia* y se realiza el siguiente procedimiento:
- 1) Los diez primeros interferentes se multiplican por el factor $[100 - (\text{Posición} - 1) \times 10] / 100$; esto es, el mayor interferente se multiplica por 1, el segundo mayor interferente se multiplica por 0.9 y así sucesivamente hasta llegar a un factor de 0.1.
 - 2) El resto de interferentes se multiplican por un factor de 0.05.
- C. El algoritmo tiene como primer objetivo calcular la función de costos, para ello se realiza una asignación aleatoria de HSN a todos los sectores de la red. Teniendo ya todos los parámetros que conforman el plan de frecuencias de la capa de saltos, la

evaluación de la función de costos se realiza de la siguiente manera:

- 1) Para cada trama TDMA se obtienen las frecuencias a usar por cada sector de la red.
- 2) Para cada par de celdas de la lista que contiene la matriz de interferencia, se evalúa cada 64 tramas el número de las mismas en las que hay al menos una colisión co-canal, es decir, se determina la *Probabilidad de Colisión* entre los dos sectores, procedimiento que se repite hasta completar 128,000 tramas, que corresponden a 10 minutos de enlace aproximadamente. Luego se obtiene una *Probabilidad de Colisión* promedio sobre las 128,000 tramas.
- 3) Dado que en la *Probabilidad de Interferencia*, $P(C/I < 12dB)$, la portadora C representa la celda víctima y la Interferencia I la celda interferente, para determinar el costo entre un par de sectores la *Probabilidad de Colisión* se multiplica con la *Probabilidad de Interferencia*. Este proceso se repite para cada par de celdas de la matriz de interferencia.

- 4) El valor de la función de costos se determina sumando todos los costos evaluados en el punto 3.

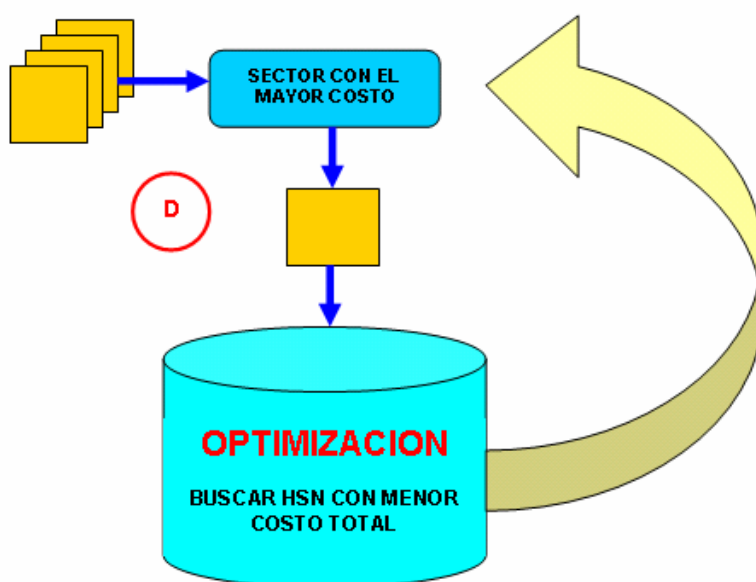


Figura 4.15: Diagrama de bloques de la etapa de optimización.

- D. El objetivo final del algoritmo es encontrar el mínimo de la función evaluada en el punto 4. Por lo que esta etapa constituye un proceso de optimización en el que se tienen como variables libres los HSN de cada sector. El proceso de optimización representa en sí un proceso cíclico que se repite un determinado número de veces hasta que ya no sea posible minimizar la función.

- 1) Se selecciona el sector que tiene el mayor costo entre todos y que no se le haya optimizado el HSN.
- 2) Se cambia el HSN de este sector de 1 a 63. Para cada uno de los cuales se recalcula el valor de la función de costos con el procedimiento descrito en el punto C.
- 3) Si el HSN evaluado produce un costo total menor al actual se lo asigna a la celda en cuestión, caso contrario se deja el HSN que tenía la celda antes del cambio.
- 4) Se marca el sector como optimizado. Se regresa al punto 1 hasta completar todos los sectores.
- 5) El procedimiento descrito en 1- 4 se repite tres veces. La Figura 4.16 muestra como disminuye el costo total conforme se aumentan los intentos de optimización; el lector notará claramente que a partir del tercer intento de optimización no se consigue reducción alguna en el costo total de la función objetivo.

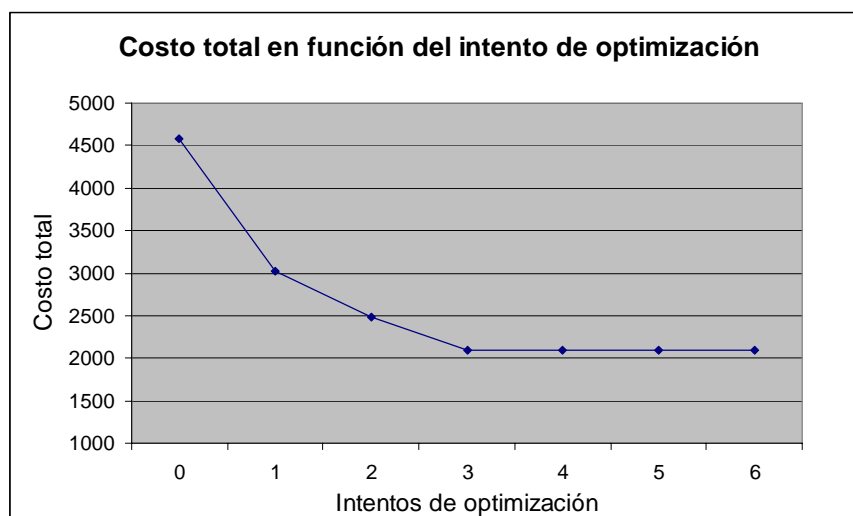


Figura 4.16: Costo total en función del intento de optimización.

Es preciso dar más detalles sobre dos puntos de este procedimiento. Primero, en el punto 2 se indica que se prueban los 63 HSN posibles para una celda, pues bien, esto se debe a que el HSN es una de las entradas al algoritmo pseudo aleatorio de asignación de canales de GSM por lo que la única manera de conocer el que produce menor número de colisiones en el área es evaluando cada uno. Por otro lado, en el punto 5 se indica que todo el proceso de optimización se repite 3 veces. Este número se determinó luego de una serie de pruebas en las que observó que a partir del cuarto intento de minimizar el costo ya no se conseguía ninguna disminución en el mismo.

4.5 Fortalezas y debilidades del algoritmo propuesto

El algoritmo que describimos tiene cuatro ventajas potenciales sobre otras herramientas que permiten también asignar HSN:

- El algoritmo realiza la optimización para una red con N sectores, es decir no establece un límite en cuanto al número de sectores que pueden conformar la red.
- No existe restricción alguna en cuanto al patrón de reuso que se emplea en la red, esto es, no hay limitación para el número de listas de canales de salto (MAL). El algoritmo trabaja con planes de frecuencia que emplean desde una sola lista para todos los sectores, hasta planes *AdHoc* en los que se tiene una lista por cada sector.
- A pesar de ser una herramienta de planeación el tiempo que le toma a la herramienta obtener un plan es relativamente pequeño. Para la red evaluada, que se describe en el Capítulo 6, al algoritmo le tomó aproximadamente una hora con treinta minutos encontrar un plan de HSN que minimice la función de costos.

- El algoritmo asigna el HSN óptimo para una celda mediante una simulación del proceso de asignación de canales de GSM, a partir de la cual genera información estadística de la cantidad de colisiones que hay en la red, por lo que se analiza primero el impacto en la red del HSN a asignar. Esto representa una ventaja ante las demás herramientas que brindan la posibilidad de crear planes de HSN, ya que el único criterio que utilizan estas es el de maximizar la distancia mínima de reuso entre las celdas.

Si bien es cierto que estas fortalezas hacen ver al algoritmo como una potente herramienta de planeación, debemos admitir que también tiene una debilidad, misma que se presenta por el hecho de que la optimización por ahora solo es posible en redes sincronizadas. Es decir, si el operador mantiene una red no sincronizada seguramente no se obtendrá una reducción notable de la interferencia en la red, no queriendo decir con esto que el algoritmo no sirve para redes no sincronizadas, sino más bien que en estas redes no presentaría ganancias con respecto a otras herramientas de planeación. Esto se debe al hecho de que en las redes no sincronizadas no se conoce la diferencia entre los números de trama que utiliza cada celda, por lo que resulta imposible mantener un control sobre la interferencia, lo que se

traduce en una poca influencia del HSN en el número de colisiones co-canal en la red.

Con esto se concluye este capítulo, en el cual se describió muy detalladamente como opera el algoritmo que propone esta tesis, se analizaron también los puntos fuertes y débiles del algoritmo, dejando al lector en libertad de hacer las modificaciones que considere pertinente en el mismo con el objetivo de adaptarlo a sus necesidades. En los capítulos posteriores el lector podrá ver los resultados de las pruebas realizadas con el algoritmo y comprobar las ventajas que ofrece el mismo.

CAPITULO 5

5. DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR SMART

Siendo el SMART la herramienta seleccionada para evaluar el algoritmo propuesto en este trabajo, no se podía dejar de lado una presentación al lector de este poderoso simulador. El presente capítulo no pretende ser un manual de usuario del simulador, sino más bien presenta una descripción general de las principales características que posee, resaltando desde luego las funcionalidades empleadas en el presente trabajo. Para una referencia completa del simulador el lector puede consultar (14).

5.1 Generalidades del SMART

SMART es un simulador dinámico a nivel de capa de red utilizado para evaluar el desempeño de sistemas GSM/EDGE. SMART modela las

conexiones lógicas (llamadas) y los enlaces físicos (radio canales) entre las estaciones base y los móviles. Por ser dinámico, los móviles se mueven en el ambiente de red escogido, simulando el movimiento de los usuarios en una red real, haciendo posible estudiar las funcionalidades de los algoritmos empleados en el control de los enlaces de igual manera que los algoritmos que controlan los recursos de radio en la BSC que son modelados con un alto nivel de detalle.

SMART se enfoca ampliamente en el rendimiento de los canales de tráfico. Los canales de señalización y control eran asumidos ideales en las primeras versiones del simulador, pero con los años de desarrollo se ha modelado algunos canales como SACCH, FACCH y PACCH.

SMART es la herramienta de simulación más usada dentro de la multinacional de telecomunicaciones *Nokia*. La mayoría de libros relacionados con GERAN/EDGE están basados en simulaciones del SMART; esto se debe al alto nivel de confiabilidad que brindan sus resultados, producto del alineamiento que tiene el simulador con las especificaciones del 3GPP. El apéndice B muestra una lista de las diferentes publicaciones científicas cuyos resultados fueron obtenidos con SMART.

Este simulador funciona bajo el sistema operativo Linux y fue escrito en lenguaje C++ siguiendo el estándar ANSI. La última versión disponible de SMART es la 6.5 que contiene 268 clases y 156,694 líneas de código fuente. Desde luego, a más de las librería típicas del lenguaje C++ emplea otras relacionadas con movilidad, propagación, geometría, números aleatorios, lectura de parámetros, tráfico y estadísticas; por tal motivo SMART se basa en el ambiente de simulador de sistemas WISE que contiene librerías relacionadas con las anteriores funciones mencionadas.

El simulador trabaja junto con otras herramientas gráficas, de ellas la más usada es *NuSpede* (Ver Figura 5.1) la misma que permite graficar las celdas, su propagación, canales que usan, etc.

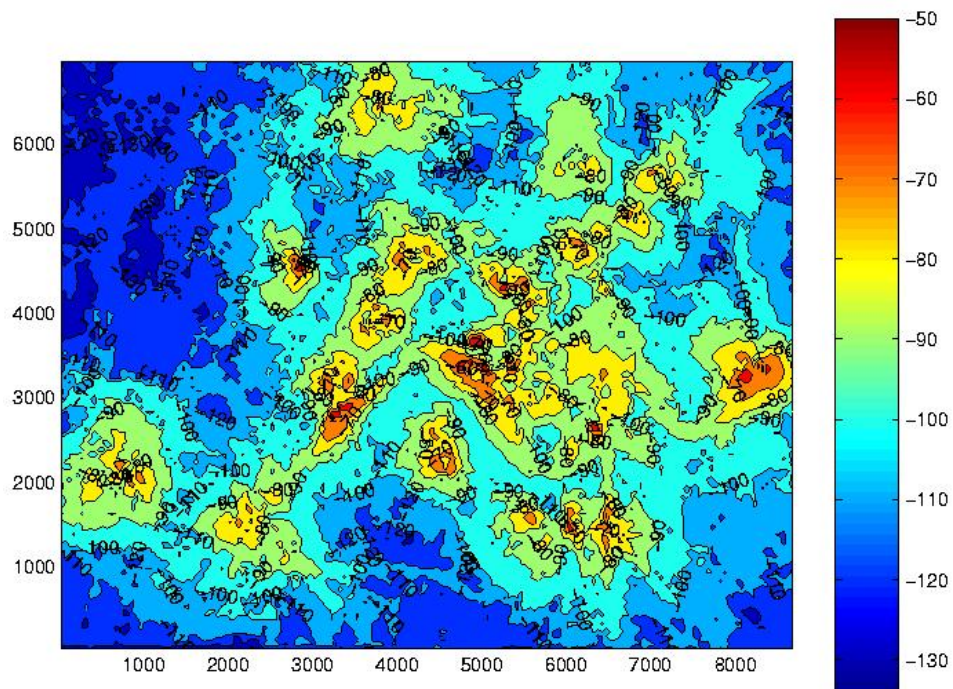


Figura 5.1: Propagación de una red real en *NuSpede*.

5.2 Funcionalidades de GSM modeladas

Actualmente GSM especifica decenas de funcionalidades y algoritmos para el control y la administración del sistema; gracias al alineamiento que tiene SMART con las especificaciones de 3GPP, el simulador incorpora gran parte de estas funcionalidades permitiendo simular redes reales con resultados muy aproximados a los que se consiguen en mediciones de campo reales. SMART modela detalladamente la red celular, aún la topología de una red real junto con los parámetros reales de BSS pueden ser importados usando la herramienta de importación

de datos *NetAct* y la interfase para generar los archivos de predicción de propagación. Tanto en enlace ascendente como descendente, las capas de BCCH y NO-BCCH pueden ser simuladas. El simulador usa números pseudo aleatorios como parámetros de entrada predeterminados, como por ejemplo el número de terminales en la red, de tal manera que cada simulación puede ser reproducida dado que los parámetros son los mismos. En la Figura 5.2 se muestra un diagrama que describe las acciones realizadas durante cada paso de la simulación.

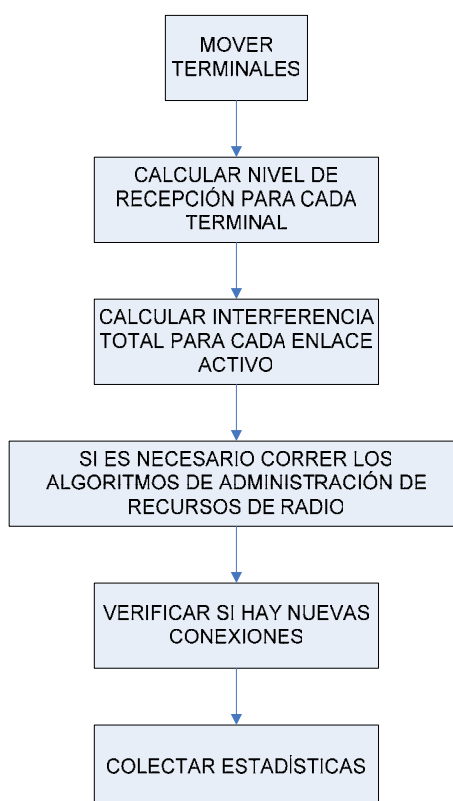


Figura 5.2: Procedimiento para cada paso de simulación.

El cálculo de interferencia se realiza evaluando la ecuación 2.1 para todos los enlaces activos en la red.

Las llamadas son generadas de acuerdo a procesos Poisson para toda la red, con tiempos de servicio exponenciales (conmutación de circuitos) con los siguientes parámetros:

Tasa de arribo de llamadas:	5 llamadas/hora/Terminal
Longitud promedio de la llamada:	120 segundos
Longitud mínima de la llamada:	1 segundo

Con estos valores, cada Terminal produce 0.17 Erlangs (tráfico de conmutación de circuitos). Para servicios de conmutación de paquetes los Erlangs/Terminal no pueden ser estimados con precisión debido a que la duración de la llamada depende de las condiciones de radio y la carga.

Los algoritmos de administración de recursos de radio permiten que los terminales se muevan libremente por toda la red manteniendo la comunicación activa en todo momento. SMART modela todos estos algoritmos, que consisten en tres grupos con funciones claramente definidas (14):

- *Procedimiento para establecer la llamada:* Normalmente la celda con mejor nivel de recepción es escogida.
- *Selección de la celda vecina:* Usado en el proceso de handover. Hay tres métodos en SMART:

- 1) Establecer todas las celdas como vecinas.
- 2) Seleccionar a partir de un criterio (más cercana).
- 3) Escogerlas a partir de una lista.

- *Control de potencia y handover:* Todos los algoritmos de control de potencia y handover especificados por 3GPP están disponibles, aunque comúnmente se usa el algoritmo DX200.

En cuanto a las funcionalidades especiales que actualmente GSM considera en el estándar, SMART implementa algoritmos para las siguientes (14):

- *DTX:* Que consiste en una transmisión discontinua para los servicios de voz; es decir cuando uno de los usuarios no habla, el móvil deja de transmitir ahorrando de esta manera recursos del sistema.

- *Administración avanzada de varias capas:* Funcionalidad que puede ser empleada con los servicios de voz para balancear la carga en la red, el objetivo de esta funcionalidad es distribuir el tráfico uniformemente en toda la red.
- *Asignación dinámica de frecuencias y canales:* Optimiza la asignación de canales para los servicios de voz solamente, requiere la sincronización de la red. Este algoritmo selecciona los parámetros de MAIO más apropiados, ranura de tiempo y código de secuencia de acuerdo a los niveles de interferencia y de tráfico que hay en la red.
- *Salto de frecuencia:* El algoritmo de saltos de frecuencia es implementado como se lo describe en GSM 05.02. SMART soporta todos los modos de saltos. Para simular saltos de frecuencia SMART debe correr en una resolución de trama TDMA y al menos una BTS debe tener los parámetros de la capa de saltos propiamente definidos.

5.3 Descripción de los servicios simulados

Básicamente todos los servicios incluidos en la especificación de GSM Versión 99 son modelados por SMART (12). En adición a estos se incluyen muchos servicios de 3GPP versión 5, como por ejemplo: AMR de banda ancha, voz para EDGE, etc. En esta sección describimos los principales servicios que SMART permite simular.

5.3.1 Servicios de voz

El modelamiento del servicio de voz se compone básicamente de los siguientes procesos: Asignación de canales, selección del modo del canal y codificación del canal.

- Para la asignación de canales se dispone de cuatro métodos:
 1. *Simple*: El primer canal libre es seleccionado.
 2. *Seudo aleatorio*: Se escoge un canal libre aleatoriamente.
 3. *Asignación de canales por ranura de tiempo sencilla de Nokia*: Tal como se implementa en la BSS toma en cuenta la interferencia de enlace ascendente.
 4. *DFCA*: Basado en la interferencia que hay en el momento en la red.

- En cuanto a los modos de canal disponibles, SMART modela la adaptación multitasa (AMR) tanto FR como HR, además ofrece la posibilidad de realizar simulaciones combinando FR/HR, incluyendo los algoritmos de adaptación de modo de canal.
- La mayoría de los esquemas de codificación de canal están disponibles además de varios algoritmos de adaptación de enlace.

5.3.2 Servicios de datos GPRS

A más de simular los servicios de voz, el simulador también incorpora servicios móviles de datos, permitiendo realizar análisis conjuntos de voz y datos en una red. El modelamiento de GPRS en SMART está basado en las especificaciones de 3GPP versión 99. A continuación se muestra una lista de las funcionalidades modeladas:

- Servicios combinados: Voz y datos.
- Protocolo RLC.
- Protocolo LLC.
- Procedimiento de reelección de celda.
- Establecimiento de TBF y procedimientos de liberación.

- Mecanismos de control de flujo de SGSN modelados para racionalizar la generación de tráfico.
- Implementación de EQoS.
- Control de potencia para enlace ascendente y descendente.
- Adaptación de enlace con algoritmos alternativos.
- Modelamiento dinámico de la interfase Abis simulando el impacto de una tasa de transferencia limitada a través de esta interfase.
- Handover por conmutación de paquetes con una completa señalización de MAC.

5.3.3 Modo de transferencia dual (DTM)

DTM se refiere a la posibilidad de transmitir voz sobre una conexión de conmutación de circuitos (CS) y al mismo tiempo tener un flujo con bloqueo temporal (TBF) en GPRS. Este es un servicio nuevo que recientemente se ha empezado a implementar en las redes GSM. La idea es que al mismo tiempo que el usuario atiende una llamada tenga servicios de datos, como navegar en Internet por ejemplo.

5.3.4 Calidad de Servicio Mejorada (EQoS)

Esta es una funcionalidad que permite manejar una calidad variable de un servicio a otro; esto es, tener diferentes tasas de transferencia, diferentes retrasos, diferentes tasas de llamadas caídas, etc. La idea de esta funcionalidad es optimizar la transmisión de información, ya que los servicios tienen diferentes requerimientos para su correcto funcionamiento; es así, que por ejemplo el retraso para datos puede ser mayor que el retraso para voz. EQoS toma en cuenta todo estos factores y lo que procura es que todos los servicios siempre cumplan al menos con los requerimientos mínimos y así se le de prioridad a otros con exigencias mayores.

5.4 Simulación de una red real

Sin lugar a dudas la mayor ventaja del SMART ante otros simuladores es el hecho de permitir simular redes GSM reales. El simulador brinda la posibilidad de importar toda la información relacionada con la BSC, desde la propagación de los sectores hasta los parámetros establecidos para los algoritmos de control de recursos de radio.

5.4.1 Información requerida

Para poder simular una red GSM en SMART es necesario importar la información de la BSC. Básicamente esta información comprende: Archivos de predicción de propagación, configuración de los sitios (ubicación geográfica, planes de frecuencia, potencia, etc.) y valores de los parámetros usados por los algoritmos de control.

Los archivos de propagación de las celdas se obtienen a través de la herramienta *NetAct Planner*. Esta herramienta contiene bases de datos muy detalladas del lugar geográfico donde se encuentra la red; es decir, en esta base consta información como altura del terreno, edificios, estructuras notables, montañas, etc. Para generar la predicción de la propagación la herramienta divide el terreno en cuadrados de una determinada resolución, que normalmente son de 25 metros, y calcula el nivel de señal para cada uno, teniendo al final un archivo con datos binarios que contiene la potencia en cada cuadrado de una determinada celda. El cálculo del nivel de señal es realizado empleando un modelo de propagación que ha sido ajustado con mediciones de drive test, por lo que estos archivos de predicción son muy aproximados a la propagación real de las celdas.

Desde luego, la información más importante para simular una red real es la configuración de la misma, la siguiente tabla resume toda la información relacionada con configuración que SMART necesita:

- Nombre del sector
- Longitud y latitud
- Tipo de BTS
- Potencia de TX
- Altura de la antena
- Tipo de antena
- Azimuth
- Tilt
- Frecuencia BCCH
- NCC
- HSN
- MAIO
- MALIST
- Número de transceptores

Con respecto a los parámetros de los algoritmos de control SMART requiere que el usuario le provea de tres grupos de parámetros:

- Control de Handover
- Control de Potencia
- Adaptación Multi-tasa (AMR)

Estos parámetros son básicamente umbrales y valores de histéresis para estos algoritmos. El lector encontrará una lista completa de los mismos en (13).

5.4.2 Proceso para simular una red real

La simulación de una red real en SMART agrupa tres tareas: Obtener la información de la red, importarla en el simulador y finalmente correr las simulaciones. Los pasos que involucran estas tres tareas se representan gráficamente en la Figura 5.3.

La información de la red que se debe obtener fue detallada en la sección anterior. Los archivos de predicción se generan con la herramienta de planeación *NetAct Planner*, mientras que el archivo índice de los mismos se obtiene por medio de una consulta SQL desde una base de datos que se encuentra en el Sistema de Administración de la Red, este archivo relaciona el nombre de estos archivos con el nombre de la respectiva celda en la red.

La información de configuración de los sectores y plan de frecuencia es provista por el operador de la red, normalmente esta información se tiene a la mano por lo que no es necesario realizar alguna consulta especial en el sistema de administración. Al igual que en el caso anterior esta información es procesada por la macro *file2smart*, que se encarga de generar archivos con el formato apropiado para el simulador.

La información relacionada con el plan de frecuencias, tanto de la capa de saltos como de la capa BCCH, debe copiarse manualmente en el archivo indicado.

La última información que falta importar es la relacionada con los parámetros para los algoritmos de administración de recursos de radio. Debemos decir que hasta la versión 6.5 de SMART, la única manera de importar esta información es llenando los respectivos archivos manualmente, pero se ha anunciado oficialmente que la próxima versión del simulador incluirá un macro que automatice este proceso. SMART agrupa todos los parámetros de un mismo tipo en archivos individuales, de ahí que todos los parámetros para handover se encuentran en un solo archivo y de igual manera ocurre con los parámetros para control de potencia y de AMR.

Para poder correr una simulación se debe editar un archivo especial desde el cual se indica al simulador que archivos incluir; es decir, SMART lee este archivo para saber que plan de frecuencia utilizar, de cuantas celdas se compone la red, que funcionalidades tiene la red, etc. Una vez editado este archivo denominado se puede iniciar la simulación por medio del comando respectivo en un terminal de Linux.

5.5 Estadísticas que ofrece el simulador SMART

Teniendo SMART la capacidad de simular una red real, también ofrece la posibilidad de evaluar la calidad de la misma por medio de estadísticas e indicadores como se lo hace comúnmente. Desde luego no genera estadísticas tan detalladas como las que se podrían obtener a través del NMS pero si permite analizar las estadísticas más relevantes de una red y además tres indicadores de calidad: Tasa de llamadas caídas (DCR), Calidad de Recepción (RXQUAL) y Tasa de error de trama (FER). SMART calcula estos indicadores bajo las mismas definiciones detalladas en la sección 1.3. Entre las estadísticas más importantes que genera SMART tenemos: Número y causas de handover, porcentaje de uso de los modos de transmisión, Tasa de error de trama, Tasa de error de bloques, entre otras. A continuación se

muestra el contenido del archivo de resultados con estas estadísticas (14).

SIMULATION STATISTICS:

!!!! You had 17 WARNING(S) during the simulation. Check the log file!

Simulation start time: Wed Dec 20 18:47:46 2006
 Estimated end time: Thu Dec 21 04:06:41 2006
 Current time: Thu Dec 21 04:06:41 2006
 Remaining time: 00:00:00

Simulated steps: 100000
 Remaining steps: 0
 Elapsed simulation time: 00:07:41

Average CS timeslot occupation: 77.3089 %
 Average all timeslot occupation: 77.6357 %
 Mean Erlang frequency load: 9.27707 %
 Mean speech channel occupancy: 9.27707 %

GLOBAL STATISTICS:

Number of started calls: 9619
 Number of ended calls: 9619
 Max number of active calls: 2452
 Number of handovers: 13174
 Number of dropped calls: 0
 Number of blocked calls: 318
 Current number of active calls: 0
 Mean number of active calls: 1665.04

Periodical BLER of speech blocks (period: 1.92 s):

- DL blocks with 1.04167 % BLER: 4.34058 %
 - DL blocks with 2.08334 % BLER: 2.3466 %
 - DL blocks with 4.16667 % BLER: 1.12335 %

 - UL blocks with 1.04167 % BLER: 1.56175 %
 - UL blocks with 2.08334 % BLER: 0.792044 %
 - UL blocks with 4.16667 % BLER: 0.40503 %

HOPC_STAT STATISTICS:

HO reasons	attempts	failures
interference_dl_ho:	27	3
interference_ul_ho:	1	0
power_budget_ho:	8135	369
psw_pool_upgrade:	1249	0
psw_pool_downgrade_ps:	4134	791
psw_pool_forced_ps_release:	791	0
PC reasons	attempts	failures

pc_l_rxqual_dl:	283848	0
pc_u_rxqual_dl:	254086	0
pc_l_rxqual_ul:	357399	0
pc_u_rxqual_ul:	184887	0

SpeechAMR STATISTICS:

Number of started calls:	2888
Number of ended calls:	2888
Max number of active calls:	702
Number of handovers:	3103
Number of dropped calls:	0
Number of blocked calls:	165
Current number of active calls:	0
Mean number of active calls:	536.855

HO types	attempts	failures	attempts/call
Intra-cell handovers:	643	0	0.2361
Inter-cell handovers:	2460	188	0.9034
Handovers due to pool updates:	632	NaN	0.2321
underlay-overlay handovers:	0	0	0
Umbrella handovers:	0	0	0
Traffic-reason HOs due to AMH:	0	0	0
HO reasons	attempts	failures	
interference_dl_ho:	10	0	
interference_ul_ho:	1	0	
power_budget_ho:	2648	188	
psw_pool_upgrade:	632	0	
PC reasons	attempts	failures	
pc_l_rxqual_dl:	142672	0	
pc_u_rxqual_dl:	105548	0	
pc_l_rxqual_ul:	177772	0	
pc_u_rxqual_ul:	79117	0	
Number of rejected connections:	0		

Ratio of blocked calls to started calls: 5.713 % (blocked calls: 165)

Ratio of dropped calls to ended calls: 0 % (dropped calls: 0)

- when including only dropped calls due to downlink radio link failure: 0 % (dropped calls: 0)
- when including only dropped calls due to uplink radio link failure: 0 % (dropped calls: 0)
- when including only dropped calls due to handover signalling failure: 0 % (dropped calls: 0)

Ratio of bad quality calls to ended calls (FER criteria):

- calls with 0.6 % FER: 6.856 % (198 calls)
- calls with 1 % FER: 3.082 % (89 calls)
- calls with 3 % FER: 0.8657 % (25 calls)

Ratio of satisfied users to all users: 87.43 %

Average call length: 90.98 seconds

Minutes Per Dropping: inf minutes
 System load: 7.158 users/cell
 Capacity: 1.432 users/cell/MHz = 18.61 kbit/s/cell/MHz
 Quality of service:
 - calls with 0.6 % FER: 87.43 %
 - calls with 1 % FER: 91.2 %
 - calls with 3 % FER: 93.42 %
 Mean DTX silence time: 3.558 seconds
 Mean DTX talking time: 3.302 seconds

CODEC MODE RATIO STATISTICS - GMSK - FULL RATE:

- AMR122 DL: 79.17 % UL: 80.12 %
 - AMR740 DL: 14.49 % UL: 13.81 %
 - AMR590 DL: 4.816 % UL: 4.561 %
 - AMR475 DL: 1.526 % UL: 1.518 %

CHANNEL MODE STATISTICS:

Full rate ratio: 100 %

SpeechRadioBlock STATISTICS:

TCH:	DOWNLINK	UPLINK	TOTAL
Number of blocks transmitted:	14765647	13580326	28345973
- of which were erroneous:	43330	16121	59451
-> bad block ratio (%):	0.29	0.12	0.21
SACCH:	DOWNLINK	UPLINK	TOTAL
Number of blocks transmitted:	1027433	1027433	2054866
- of which were erroneous:	20802	9448	30250
-> bad block ratio (%):	2.02	0.92	1.47

A más de estas estadísticas el simulador también evalúa tres indicadores de calidad: Tasa de llamadas caídas (DCR), Calidad de Recepción (RXQUAL) y Tasa de error de trama (FER), los cuales son calculados bajo las mismas definiciones detalladas en la sección 2.5. Tanto las estadísticas como los indicadores de calidad se evalúan para una determinada carga efectiva de frecuencia, lo cual es indicado implícitamente por el usuario por medio del número de terminales a simular.

CAPÍTULO 6

6. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

El algoritmo propuesto se evaluó simulando un conjunto de celdas de una red real en SMART. El presente capítulo describe las características de dicho cluster, detalla las consideraciones tomadas en cuenta para realizar las simulaciones, muestra gráficos en los que se comparan los indicadores de calidad obtenidos con el algoritmo propuesto con los que se obtienen con el plan actual del operador, mismo que fue generado con la herramienta de planeación ASSET, cuyo proceso de asignación de HSN se basa en la maximización de la distancia mínima de reuso. Al final del capítulo el lector encontrará un resumen de los resultados que se obtuvieron de las comparaciones realizadas tanto en calidad como en capacidad.

6.1 Descripción de la red evaluada

Para evaluar el plan de HSN que se obtiene con el algoritmo propuesto se escogió un cluster de celdas de una red real de la ciudad de Guayaquil.

Las características del área evaluada son:

Banda de frecuencia:	850 MHz
Tramas y ranuras de tiempo:	Sincronizados
Espectro de capa de saltos:	3.6 MHz
Espectro total:	7 MHz
Patrón de reuso:	1/1 y 1/3
TRX BCCH:	Bloqueado
Número de sitios:	41
Número de sectores:	112
Tráfico promedio por sector en hora pico:	20 Erlangs
Tipo de zona:	Densa Urbana

El cluster completo se muestra en la Figura 6.1. Dos son los motivos por los que se seleccionó esta área para evaluar los resultados del algoritmo, en primer lugar, de toda la red del operador es la zona que tiene mayor densidad de celdas, y segundo, tiene la mayor penetración

de tráfico, por lo que se presenta como un área ideal para evaluar el verdadero alcance del algoritmo.

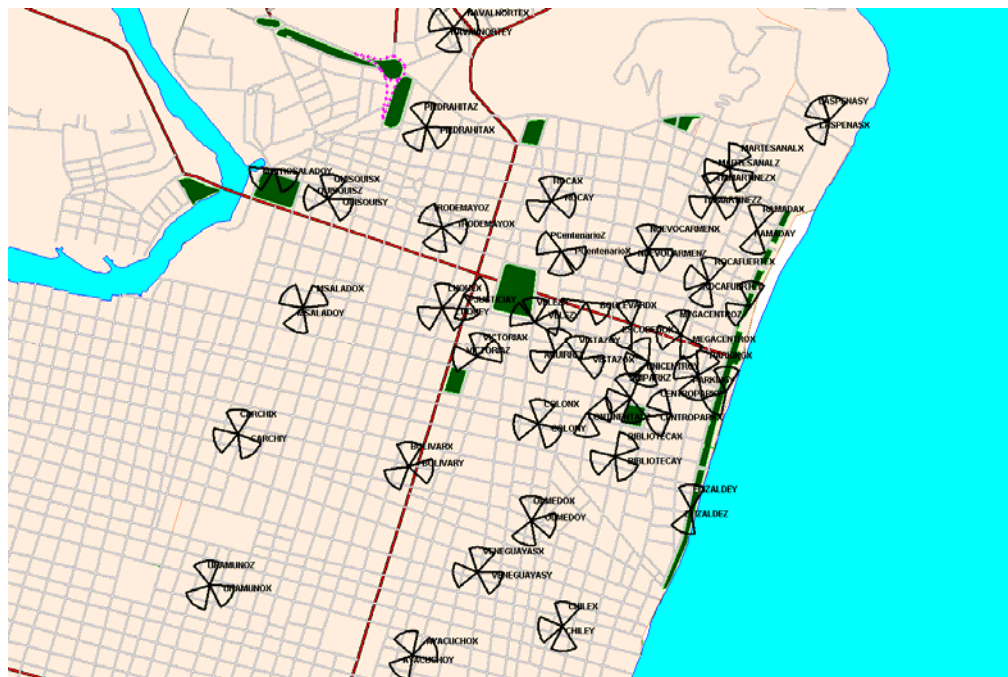


Figura 6.1: Área en la que se evaluaron los resultados.

6.2 Simulaciones realizadas

Las simulaciones fueron realizadas en base a los siguientes puntos:

- Se importó información de configuración de los sitios, archivos de predicción de propagación y parámetros para algoritmos de

control de recursos de radio de todas las celdas que se encuentran en el área seleccionada.

- Para poder evaluar el potencial del algoritmo propuesto hemos bloqueado el transceptor de BCCH de todas las celdas de la red. Esto se debe a que el plan de HSN afecta directamente a la capa de saltos de una red, por lo que para darle mayor validez a los resultados hemos asignado que todo el tráfico se cargue en la capa de saltos.
- Como fue descrito en el capítulo anterior, SMART realiza cada simulación con un determinado número de terminales moviéndose en el área geográfica de la red; los terminales generan una carga específica a la red, lo que se traduce en un porcentaje de EFL; es decir, para cada número de terminales que se define, se obtiene un valor de EFL y por ende un valor de cada indicador de calidad. Tomando esto en consideración y para poder aplicar el procedimiento de evaluación descrito en la Sección 2.7 hemos evaluado cada plan para 11 cantidades diferentes de terminales, por lo que al final obtenemos una tabla con un esquema similar al de la Tabla VII.

Número de terminales (%)	EFL (%)	Indicadores de Calidad (%)	
		Plan Operador	Plan Optimizado
2	X1	Y1	Z1
3	X2	Y2	Z2
4	X3	Y3	Z3
5	X4	Y4	Z4
6	X5	Y5	Z5
7	X6	Y6	Z6
8	X7	Y7	Z7
9	X8	Y8	Z8
10	X9	Y9	Z9
11	X10	Y10	Z10
12	X11	Y11	Z11

Tabla VII: Esquema en el que se generaron resultados.

- La resolución de simulación en SMART esta definida por una trama TDMA. Para cada número de terminales se evaluaron los dos planes durante 200,000 tramas TDMA lo que corresponde a 15 minutos de comunicación aproximadamente. Cada 5000 tramas se evalúan los indicadores de calidad, por lo que al final de las 200,000 tramas se obtiene un valor promedio para cada KPI.

6.3 Resultados de las simulaciones

Las simulaciones fueron realizadas con dos planes diferentes de HSN, por un lado el plan actual del operador de la red y por otro el plan

generado con el algoritmo propuesto. Los planes de HSN se muestran en la Tabla VIII.

CELL_NAME	MAIO OFFSET	MAIO STEP	HSN OPERADOR	HSN ALGORITMO
1RODEMAYOX	0	3	31	50
1RODEMAYOY	5	3	31	50
1RODEMAYOZ	10	3	31	50
AGUIRREX	0	3	21	14
AGUIRREY	5	3	21	50
AYACUCHOX	0	2	45	13
AYACUCHOY	0	1	48	63
AYACUCHOZ	0	2	33	5
BIBLIOTECAX	0	3	18	31
BIBLIOTECAY	0	2	30	34
BIBLIOTECAZ	10	3	18	31
BOLIVARX	0	3	35	23
BOLIVARY	5	3	35	23
BOLIVARZ	0	1	27	1
BOULEVARDX	0	3	19	60
BOULEVARDY	5	3	19	60
CARCHIX	0	2	32	42
CARCHIY	1	2	43	46
CARCHIZ	0	2	32	40
CENTROPARKX	0	3	57	50
CENTROPARKY	5	3	57	11
CHILEX	0	1	10	38
CHILEY	0	2	33	42
CHILEZ	0	2	37	43
COLONX	0	3	4	26
COLONY	5	3	4	26
COLONZ	10	3	4	26
CONTINENTALX	0	3	25	63
CONTINENTALY	5	3	25	63
CONTINENTALZ	10	3	25	63
ELIZALDEY	0	2	2	40
ELIZALDEZ	0	2	39	53
ESCOBEDOX	0	3	5	39
ESCOBEDOY	5	3	5	39
LAS_PENASX	0	2	17	60
LAS_PENASY	0	1	55	3
LAS_PENASZ	0	2	56	25
LUQUEX	0	3	7	49

LUQUEY	5	3	7	49
LUQUEZ	10	3	7	49
MALECON2KX	0	1	6	63
MALECON2KY	0	1	18	9
MALECON2X	0	2	26	34
MALECON2Y	0	1	29	18
MARTESANALX	0	2	30	16
MARTESANALY	5	3	6	51
MARTESANALZ	10	3	6	51
MEGACENTROX	10	3	35	16
MEGACENTROY	5	3	35	16
MEGACENTROZ	0	3	35	28
METROSALADOX	1	2	8	28
METROSALADOY	0	2	46	1
MSALADOX	0	3	23	42
MSALADOY	5	3	23	42
MSALADOZ	0	2	20	61
NAVALNORTEX	0	2	53	3
NAVALNORTEY	0	2	20	46
NAVALNORTEZ	0	2	57	55
NUEVOCARMENX	0	3	61	19
NUEVOCARMENY	5	3	61	16
NUEVOCARMENZ	10	3	61	16
OLMEDOX	0	2	28	62
OLMEDOY	0	2	3	16
OLMEDOZ	0	2	9	54
PARKINGX	0	3	52	11
PARKINGY	5	3	52	50
PARKINGZ	10	3	52	11
PCENTENARIOX	0	3	26	16
PCENTENARIOY	5	3	26	16
PCENTENARIOZ	10	3	26	16
PIEDRAHITAX	0	3	8	34
PIEDRAHITAY	5	3	8	34
PIEDRAHITAZ	0	2	3	28
PJUSTICIAX	0	3	15	59
PJUSTICIAY	5	3	15	59
QUISQUISX	0	1	55	59
QUISQUISY	5	3	29	42
QUISQUISZ	0	1	27	59
RAMADAX	0	2	32	44
RAMADAY	0	2	37	46
ROCAFUERTEX	0	3	44	50
ROCAFUERTEY	5	3	44	11
ROCAFUERTEZ	10	3	44	11
ROCAX	0	3	11	21

ROCA Y	5	3	11	21
ROCA Z	10	3	11	21
SUCRE X	0	2	3	63
SUCRE Y	0	2	17	15
SUCRE Z	0	2	7	5
TMARTINE Z X	0	3	17	51
TMARTINE Z Y	0	2	24	54
TMARTINE Z Z	10	3	17	19
UNAMUNOX	0	2	57	46
UNAMUNOY	0	2	55	55
UNAMUNOZ	0	2	59	22
UNICENTRO X	0	3	60	52
UNICENTRO Y	5	3	60	52
UNICENTRO Z	10	3	60	52
UNIPARK X	0	3	45	44
UNIPARK Y	5	3	45	44
UNIPARK Z	10	3	45	44
VELE Z X	0	3	28	14
VELE Z Y	5	3	28	14
VELE Z Z	10	3	28	14
VENEGUAYAS X	0	2	35	50
VENEGUAYAS Y	0	2	60	44
VENEGUAYAS Z	0	2	14	51
VICTORIA X	0	3	12	40
VICTORIA Y	5	3	12	40
VICTORIA Z	10	3	12	40
VISTAZOX	0	3	47	20
VISTAZOY	5	3	47	20

Tabla VIII: Planes de HSN simulados.

Como fue explicado al final del capítulo 1, se evaluó el desempeño de la red por medio de tres indicadores de calidad: Tasa de llamadas caídas (DCR), Calidad de Recepción (RXQUAL) y Tasa de error de trama (FER). La Tabla IX, muestra los resultados de las simulaciones, además en esta sección se muestran gráficos con dos curvas para cada indicador; la curva color azul fue obtenida con plan de HSN del

operador, mientras que la curva color rosa fue la que se obtuvo con el plan generado por el algoritmo propuesto. Para cada indicador de calidad se realizó una comparación entre los dos planes, evaluando las ganancias que se consiguen tanto en calidad como en capacidad. Se seleccionó un EFL de 8% como umbral para evaluar las ganancias en calidad por cuanto este es un valor promedio del EFL que se consigue comúnmente en las redes GSM (4). Las ganancias en capacidad se evalúan para diferentes umbrales dependiendo del KPI.

Plan	Term.	EFL	%DCR	%Good DL RXQUAL	%Good UL RX QUAL	%Good DL FER	%Good UL FER
OPERADOR	2K	2.1960	0.3883	99.2363	98.5192	98.6468	99.2086
	3K	3.2937	0.6307	98.7925	98.2092	97.3931	98.6185
	4K	4.4531	0.7471	98.5813	98.0698	95.8368	97.5421
	5K	5.5981	0.8704	98.3027	97.8074	93.0395	95.7097
	6K	6.7787	0.9336	98.0673	97.5063	90.1142	93.7477
	7K	7.8054	1.0823	97.8256	97.3184	87.5058	91.7656
	8K	8.9598	1.2286	97.6720	97.2023	85.3030	90.1057
	9K	10.0703	1.3620	97.4787	97.0956	82.8146	88.4513
	10K	11.0727	1.4919	97.1267	96.9301	81.3438	87.2435
	11K	12.0840	1.5552	96.8024	96.7790	80.0443	86.2816
	12K	13.0695	1.7722	96.5119	96.5476	78.6441	85.4566
OPTIMIZADO	2K	2.1734	0.2118	99.6760	98.9289	99.6104	99.6797
	3K	3.2768	0.3439	99.2841	98.7222	98.4363	99.2760
	4K	4.4574	0.5146	99.0506	98.4449	96.9231	98.7463
	5K	5.6046	0.6634	98.8922	98.3105	94.3078	96.4482
	6K	6.7901	0.8286	98.6231	98.0819	91.2799	94.7825
	7K	7.8318	0.9521	98.5375	98.0101	88.7814	92.9625
	8K	8.9686	1.0949	98.2163	97.7343	86.5397	91.1208
	9K	10.0334	1.2110	97.8661	97.6363	84.3438	89.4675
	10K	11.0738	1.2988	97.7544	97.4627	82.6071	88.0863
	11K	12.1230	1.3905	97.4821	97.2401	81.2049	86.9522
	12K	13.0687	1.5289	97.2105	97.0561	79.9802	86.1039

Tabla IX: Resultados de las simulaciones.

6.3.1 Resultados en DCR

La Figura 6.2 muestra los resultados con respecto a la tasa de llamadas caídas. Para evaluar la ganancia en calidad observamos que para un porcentaje de EFL de 8% tenemos un DCR de 1.12 % con el Plan Actual de HSN del operador, mientras que con el Plan Optimizado se consigue disminuir el DCR a 0.95 %.

$$DCR_QG = \frac{|1.12 - 0.95|}{1.12} \times 100\% = 15.2\% \quad (6.1)$$

Por lo que el algoritmo propuesto consigue mejorar el DCR de la red en 15.2% con respecto al plan original.

Para evaluar la ganancia en capacidad tomamos como referencia un umbral de 1% de DCR. Del gráfico vemos que para el plan actual del operador se tiene 6.9% de EFL, mientras que con el plan optimizado se llega a 8.4 %.

$$DCR_CG = \frac{|6.9 - 8.4|}{6.9} \times 100\% = 21.74\% \quad (6.2)$$

Teniendo como resultado un aumento de 21.74% de capacidad en la red con respecto al DCR.

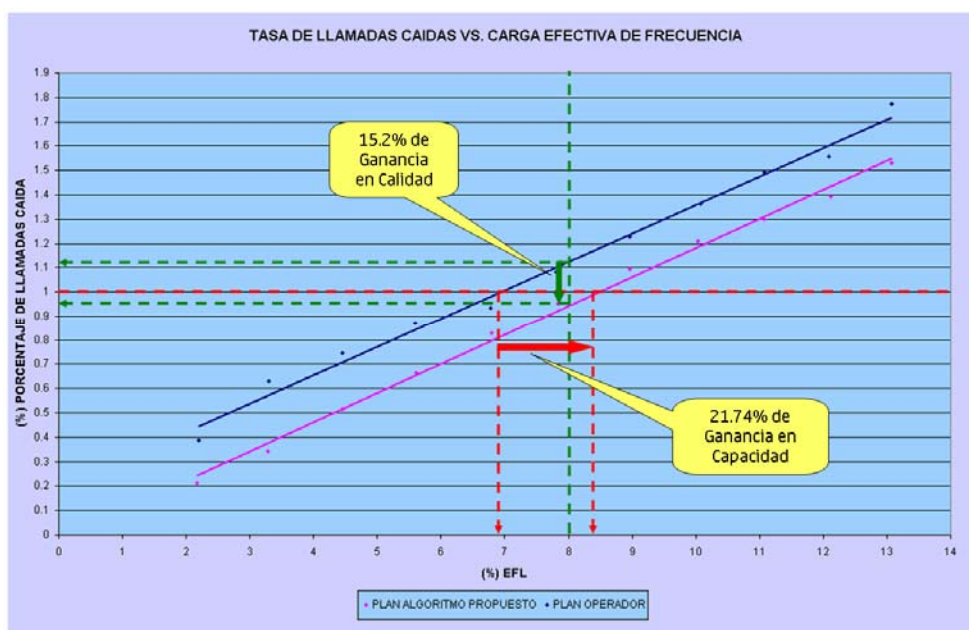


Figura 6.2: DCR vs. EFL.

6.3.2 Resultados en RXQUAL

Como ya se explicó, la calidad de recepción se evalúa tanto en enlace ascendente como descendente, por lo que para este indicador se obtuvieron dos gráficos.

La Figura 6.3 muestra los resultados para el enlace ascendente. Como vemos, para un EFL de 8% tenemos un GOOD UL RXQUAL de 97.3 %

con el Plan Actual de operador, mientras que con el Plan Optimizado se consigue aumentar a 97.9 %. Para evaluar la ganancias consideramos el porcentaje de BAD UL RXQUAL = 100-GOOD UL RXQUAL.

$$UL_RXQUAL_QG = \frac{|(100 - 97.3) - (100 - 97.9)|}{(100 - 97.3)} \times 100\% = 22.2\% \quad (6.3)$$

Por lo que el algoritmo propuesto consigue una mejora de 22.2% en UL RXQUAL con respecto al plan original.

Para evaluar la ganancia en capacidad tomamos un umbral de 97% de GOOD RXQUAL. Del gráfico observamos que para el Plan Actual del se tiene 10.4% de EFL, mientras que con el plan optimizado se llega a 13.7%.

$$UL_RXQUAL_CG = \frac{|10.4 - 13.7|}{10.4} \times 100\% = 31.73\% \quad (6.4)$$

Por lo que se consigue un aumento de 31.73% de capacidad en la red con respecto al UL RXQUAL.

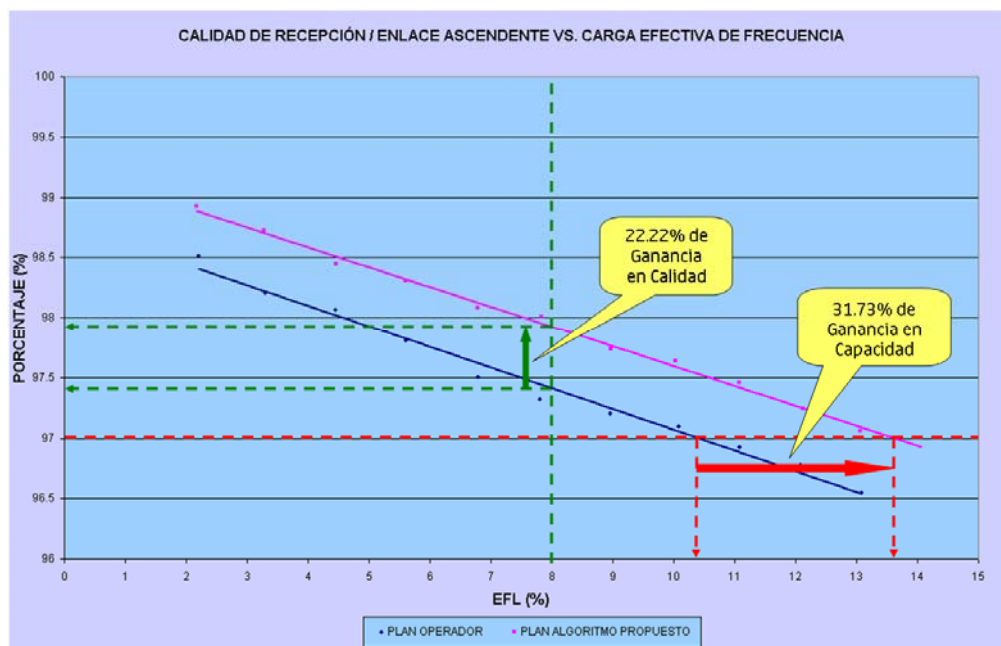


Figura 6.3: UL RXQUAL vs. EFL.

En la Figura 6.4 se muestran los resultados para el enlace descendente. Se observa que para un EFL de 8% tenemos un GOOD DL RXQUAL de 97.8 % con el Plan Actual, mientras que con el Plan Optimizado se consigue 98.35%.

$$DL_RXQUAL_QG = \frac{|(100 - 97.8) - (100 - 98.35)|}{(100 - 97.8)} \times 100\% = 25\% \quad (6.5)$$

Por lo que para el DL RXQUAL el algoritmo propuesto consigue una mejora en calidad de 25% con respecto al plan original

Para un 97% de GOOD DL RXQUAL, del gráfico observamos que para el Plan Actual del operador se tiene 11.5% de EFL, mientras que con el Plan Optimizado se llega a 14.4%.

$$DL_RXQUAL_CG = \frac{|11.5 - 14.4|}{11.5} \times 100\% = 25.22\% \quad (6.6)$$

Por lo que se consigue un aumento de 25.22% de capacidad en la red con respecto al DL RXQUAL.

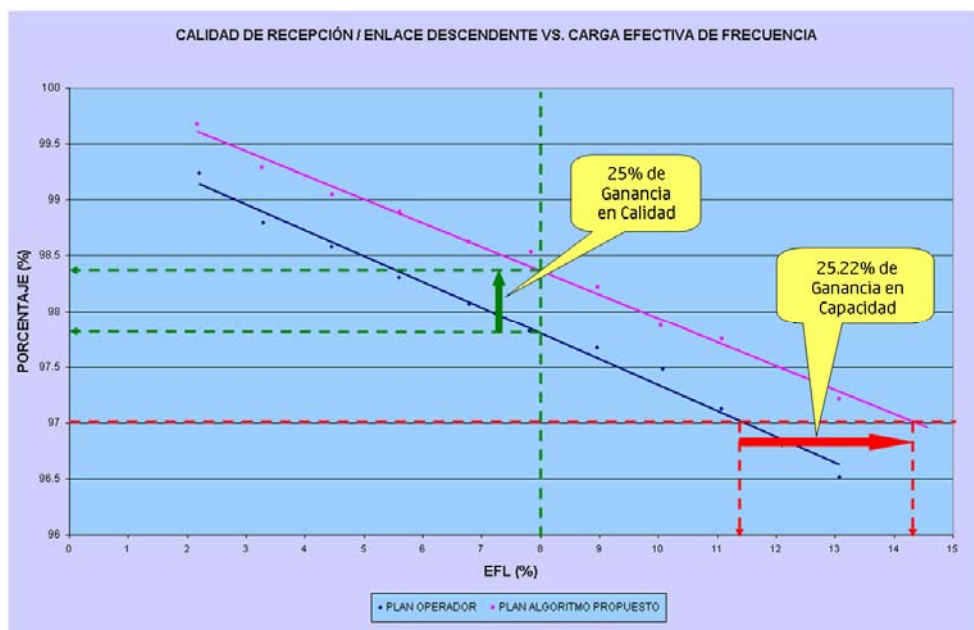


Figura 6.4: DL RXQUAL vs. EFL.

6.3.3 Resultados en FER

Al igual que para la Calidad de Recepción, la Tasa de Error de Trama se evalúa tanto en enlace ascendente como descendente, por lo que se obtuvieron dos gráficos para este indicador.

Los resultados para el enlace ascendente se muestran en la Figura 6.5. Para un EFL de 8% se obtiene un GOOD UL FER de 91.8 % con el Plan Actual, mientras que con el Plan Optimizado se consigue aumentar a 93.8 %. Para evaluar la ganancias consideramos el porcentaje de BAD UL FER que es igual a $100 - \text{GOOD UL FER}$.

$$UL_FER_QG = \frac{|(100 - 91.8) - (100 - 92.8)|}{(100 - 91.8)} \times 100\% = 12.2\% \quad (6.7)$$

Por lo que el algoritmo propuesto consigue una ganancia de 12.2% en GOOD UL RXQUAL con respecto al plan original.

Evaluamos la ganancia de capacidad para un umbral de 92% de GOOD FER, consiguiendo para el Plan Actual 7.9% de EFL, mientras que con el plan optimizado se llega a 8.7%.

$$UL_FER_CG = \frac{|7.9 - 8.7|}{7.9} \times 100\% = 10.13\% \quad (6.8)$$

Por lo que se consigue un aumento de 10.13% de capacidad en la red con respecto al GOOD UL FER.

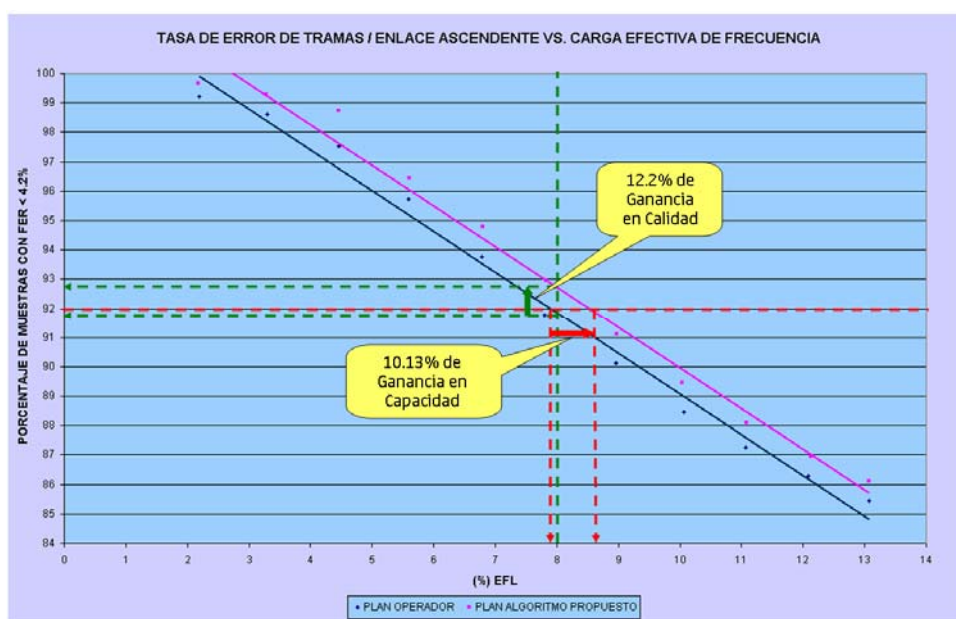


Figura 6.5: UL FER vs. EFL.

La Figura 6.6 se muestra los resultados para el enlace descendente. Se observa que para un EFL de 8% tenemos un GOOD DL FER de 87.8% con el Plan Actual, mientras que el Plan Optimizado aumenta el indicador a 89%.

$$DL_FER_QG = \frac{|(100 - 87.8) - (100 - 89)|}{(100 - 87.8)} \times 100\% = 9.83\% \quad (6.9)$$

Por lo que para el GOOD DL FER el algoritmo propuesto consigue una mejora en calidad de 9.83% con respecto al plan original.

Evaluando la ganancia de capacidad para un 92% de GOOD DL FER, del gráfico observamos que para el Plan Actual se tiene 5.9% de EFL, mientras que con el Plan Optimizado se consigue un 6.5%.

$$DL_FER_CG = \frac{|5.9 - 6.5|}{5.9} \times 100\% = 10.17\% \quad (6.10)$$

Esto nos indica que el plan generado con el algoritmo propuesto consigue una ganancia de 10.17% de capacidad en la red en lo que se relaciona al DL FER.

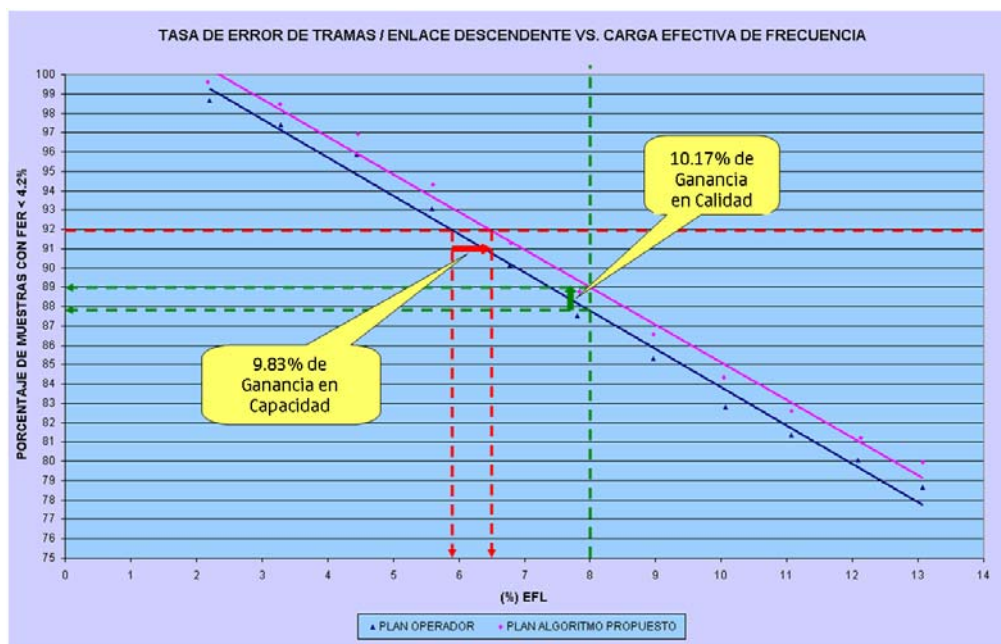


Figura 6.6: DL FER vs. EFL.

6.4 Conclusiones de las simulaciones

Se ha evaluado el rendimiento de un cluster de celdas de un sector denso urbano con dos planes diferentes de HSN, uno generado con el algoritmo propuesto y otro que es el que tiene el operador actualmente en la red. Los indicadores de calidad analizados fueron: La Tasa de Llamadas caídas, Calidad de recepción y Tasa de error de trama, estos últimos tanto para enlace ascendente como descendente; como podemos observar en las Figuras 6.2 – 6.6, con el algoritmo propuesto se consigue mejorar notablemente el desempeño de la red, aumentando la calidad de la misma e incrementando también su

capacidad con respecto a la interferencia. La Tabla X resume las ganancias obtenidas con el plan propuesto al compararlo con el plan del operador.

Indicador de Calidad	Ganancia en Calidad	Ganancia en Capacidad
DCR	15.18%	21.74%
GOOD DL RXQUAL	25.00%	25.22%
GOOD UL RXQUAL	22.22%	31.73%
GOOD DL FER	9.83%	10.17%
GOOD UL FER	12.20%	10.13%

Tabla X: Resumen de ganancias obtenidas.

Resulta importante resaltar que los porcentajes de ganancia para la Tasa de Error de Trama son menores que para los otros indicadores de calidad. Esto se debe a que el área evaluada presenta problemas en cuanto al FER, ya que como se puede observar en los gráficos, los valores llegan a ser inferiores al 90%.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es preciso iniciar esta parte final indicando al lector que esta es la primera herramienta de planeación exclusiva para asignación de HSN en redes GSM. Si bien es cierto que existen muchas herramientas para crear planes de frecuencia, se debe aclarar que todas generan planes completos, es decir no solo se enfocan en el HSN, sino también en los demás parámetros como MAIO y canales de la MAL. Justamente la mayor fortaleza del algoritmo propuesto en esta tesis radica en el hecho de que se concentra en la asignación de HSN únicamente, conociendo los demás parámetros que conforman el plan de frecuencias para la capa de saltos. Como fue demostrado en el Capítulo 3 la interferencia co-canal se ve afectada directamente por los Números de Secuencia de Salto que tienen las celdas, es decir diferentes combinaciones de HSN generan diferentes cantidades de colisiones co-canal.

El algoritmo que se propuso en el Capítulo 4 minimiza el número de colisiones co-canal entre los interferentes potenciales de una red GSM, con lo que disminuye la interferencia producida por el reuso de frecuencias en la

capa de saltos, a través de una combinación óptima de HSN para las celdas de la red. Este algoritmo simula la asignación de frecuencias en GSM y realiza una búsqueda exhaustiva en cada celda del HSN que minimiza la interferencia total en la red.

Si bien se afirmó al final del Capítulo 4 que con el algoritmo propuesto, la optimización actualmente solo es posible en redes sincronizadas, no debemos descartar la posibilidad de que en un futuro cercano sea posible conocer la diferencia que existe entre los números de trama y ranuras de tiempo que maneja cada celda en una red no sincronizada, por lo que resultaría muy sencillo ingresar estas diferencias al algoritmo y así adaptarlo para que permita también optimizar este tipo de redes.

En el Capítulo final se evaluó el algoritmo en un conjunto de celdas de un sector denso urbano de la ciudad Guayaquil. El plan de HSN obtenido se comparó con el plan del operador de la red realizando simulaciones dinámicas en SMART y evaluando Tasa de Llamadas caídas, Calidad de Recepción y Tasa de Error de Trama como indicadores de calidad. En el Capítulo 6 se mostraron los resultados de dichas simulaciones, de los cuales se obtuvo que con el algoritmo propuesto se consiguen ganancias de entre 9.8% y 31.7% tanto en calidad como en capacidad de la red, permitiendo de

esta manera tener una red con soporte para un mayor número de usuarios pero sin degradación de la calidad de la misma.

Este algoritmo puede ser el complemento ideal para herramientas de planeación más sofisticadas que se usan en la actualidad, pero que sin embargo hasta ahora no le han dado el enfoque que se le ha dado aquí a la asignación de HSN. Una de estas herramientas puede ser *Optimizer*, propietaria de Nokia, que sirve para generar planes de frecuencias completos, pero que con la incorporación de este algoritmo aumentaría cuantiosamente su potencial.

APÉNDICES

APÉNDICE A: ALGORITMO DE SALTO DE FRECUENCIAS DE GSM

Si HSN = 0 (Saltos cíclicos) entonces:

- MAI, Entero (0 ... (N - 1))
- MAI = (FN + MAIO) modulo N

Sino:

- M, Entero (0... 152)
- S, Entero (0... (N - 1))
- MAI, Entero (0 ... (N - 1))
- $M = T2 + \text{RNTABLE}((\text{HSN XOR } T1R) + T3)$
- $M' = M \text{ modulo } (2^{\text{NBIN}})$
- $T' = T3 \text{ modulo } (2^{\text{NBIN}})$
- Si $M' < N$ entonces:

$$S = M'$$

- Sino:

$$S = (M' + T') \text{ modulo } N$$

- MAI = (S + MAIO) modulo N

Donde:

- N: Número de frecuencias disponibles en la MAL
- T1R: Parámetro de tiempo, T1 modulo 64 (6 bits)
- T2: Parámetro de tiempo de 0 a 25 (5 bits)
- T3: Parámetro de tiempo de 0 a 50 (6 bits)
- NBIN: Número de bits requeridos para representar N
- RNTABLE: Arreglo de 114 números enteros

Dirección	Contenido									
000...009	48	98	63	1	36	95	78	102	94	73
010...019	0	64	25	81	76	59	124	23	104	100
020...029	10	47	118	85	18	56	96	86	54	2
030...039	80	34	127	13	6	89	57	103	12	74
040...049	55	111	75	38	109	71	112	29	11	88
050...059	87	19	3	68	110	26	33	31	8	45
060...069	82	58	40	107	32	5	106	92	62	67
070...079	77	108	122	37	60	66	121	42	51	126
080...089	117	114	4	90	43	52	53	113	120	72
090...099	16	49	7	79	119	61	22	84	9	97
100...109	91	15	21	24	46	39	93	105	65	70
110...113	125	99	12	123						

Arreglo RNTABLE

APÉNDICE B: LISTA DE PUBLICACIONES BASADAS EN SMART

La siguiente es una lista de las publicaciones científicas cuyos resultados fueron evaluados con el simulador SMART:

Enhanced circuit switched data for real time services over GSM. *Hamiti, S.; Hakaste, M.; Moisio, M.; Nefedov, N.; Nikula, E.; Vilpponen, H.;* Vehicular Technology Conference, 1999. VTC 1999 - Fall. IEEE VTS 50th, Volume: 1, Septiembre 19-22 1999. páginas: 578 - 582 vol.1.

EDGE circuit switched data-an enhancement of GSM data services. *Hamiti, S.; Hakaste, M.; Moisio, M.; Nefedov, N.; Nikula, E.; Vilpponen, H.;* Wireless Communications and Networking Conference, 1999. WCNC. 1999 IEEE, Septiembre 21-24 1999. páginas: 1437 - 1441 vol.3.

Capacity of Voice over EGPRS Service under Different Operational Scenarios. *Järvelä, R.; Moisio M.;* Finnish Wireless Communications Workshop, 2000.

Capacity Evaluation of EGPRS in a Frequency Hopping Network. *M. Moisio, S. Nikkarinen.* Wireless Personal Multimedia Communications, 2002.

The 5th International Symposium on, Volume: 2 , Octubre 27-30 2002, páginas:843 - 847 vol.2.

Network level performance evaluation of EGPRS. *Nikkarinen, S.; Moisio, M.* Vehicular Technology Conference, 2002. Proceedings. VTC 2002-Fall. 2002 IEEE 56th, Volume: 3, Septiembre 24-28 2002, páginas: 1811 - 1815 vol.3.

TCP/IP performance over EGPRS network. *Sanchez, R.; Martinez, J.; Romero, J.; Jarvela, R.;* Vehicular Technology Conference, 2002. Proceedings. VTC 2002-Fall. 2002 IEEE 56th , Volume: 2 , Septiembre 24-28 2002, páginas: 1120 - 1124 vol.2.

Speech Capacity Enhancements in the GSM/EDGE Radio Access Network (GERAN), *Bellier, T.; Moisio, M.;Sébire;* International Conference on Telecommunications, ICT 2002, Junio 2002.

GPRS radio network performance simulation and optimization with dynamic simulator. *Xiangguang Che; Hamalainen, S.; Ryyananen, J.; Moisio, M.;*Communication Technology Proceedings, ICCT 2003. International Conference, Volume: 2 , Abril 9 - 11 2003, páginas:935 – 939.

Capacity gain from transmit diversity methods in limited bandwidth GSM/EDGE networks. *Hulkkonen, J.; Kahkonen, T.; Hamalainen, J.; Korpi, T.; Saily, M.*; Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring. The 57th IEEE Semiannual, Volume 4, Abril 22-25 2003, páginas: 2413 - 2417 vol.4.

On the Performance of GSM/EDGE transmit diversity schemes when employing dual-polarized antennas. *Hamalainen, J.; Wichman, R.; Hulkkonen, J.; Kahkonen, T.; Korpi, T.; Saily, M.*; Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring. The 57th IEEE Semiannual, Volume 4, Abril 22-25 2003, páginas: 2418 - 2422 vol.4.

System performance evaluation of GERAN flexible layer one concept. *Hulkkonen, J.; Moisio, M.*; Wireless Communication Systems, 2004. 1st International Symposium on, September 20-22 2004, páginas: 149 – 153.

Performance of Streaming Services in GERAN A/Gb mode. *Rexhepi V.; Moisio M.; Hamiti S.; Vaittinen R.*; Vehicular Technology Conference, 2004.

Capacity Gains of Single Antenna Interference Cancellation in GSM. *Moisio, M.; Nikkarinen, M.*; Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2004.

The Effect of Single-antenna interference Cancellation on GPRS Performance. *Moisio, M.; Aschan, K.*; Wireless Communication Systems, 2004.

Handover of Packet-Switched Services in GERAN A/Gb mode. *Rexhepi, V. ; Bohaty , D.; Hamiti, S.; Sebire, G.*; Global Telecommunications Coenference, 2005. Globecom 2005, Volume: 5, páginas 2589 - 2593.

Variable bandwidth for GERAN evolution with regular frequency planning. *Piirainen, O.; Hulkkonen, J.; Niemela, K.; Saily, M.*; Vehicular Technology Conference, 2006. VTC 2006-Spring. IEEE 63rd, Volume 4, 2006, páginas: 1797 – 1801.

Dual symbol rate for GERAN uplink evolution. *Saily, M.; Piirainen, O.; Hulkkonen, J.; Niemela, K.*; PIMRC 2006.

COSIME: "Real-life Cellular Network on the Desktop, *Nikkarinen S.; Shemyak K;* International Conference on Networking and Services 2005 in Papeete, Tahiti; Octubre 2005.

EQoS Call Admission and Scheduler Parameter Evaluation for GERAN, *Vieira, R.D.; Aguayo,L.; Costa, G.W.O.,* PIMRC 2006.

Capacity Increase in GSM Networks Using Source-Adaptive AMR,
Barreto, A.N.; Pirhonen, R.; Vehicular Technology Conference, VTC 2006-
Spring. IEEE 63rd; Volume 2, páginas: 553 - 557, Melbourne, Australia, Mayo
2006.

BIBLIOGRAFÍA

1. NYBERG HENRIK, CRAIG STEPHEN, MAGNUSSON SVERKER Y EDGREN ERIK, Synchronization Strategies for GSM/EDGE Networks, IEEE Vehicular Technology Proceedings, Estocolmo, Suecia, Enero 2001, páginas 2670 – 2674.
2. NYBERG HENRIK, CRAIG STEPHEN, MAGNUSSON SVERKER Y EDGREN ERIK, Collision Properties of GSM Hopping Sequences, IEEE Vehicular Technology Proceedings, Estocolmo, Suecia, Mayo 2000, páginas 1004 – 1008.
3. RAPPAPORT THEODORE S., Wireless Communications: Principles and Practice, Prentice Hall, 1995, páginas 78 – 92.
4. HALONEN TIMO, ROMERO JAVIER y MELERO JUAN, GSM, GSPRS and EDGE Performance, Evolution towards 3G/UMTS, Wiley, Málaga, 2003, páginas 104-146, 188-193.

5. JÄRVELÄ RAULI, Smart GSM Network Simulator Release 6.5 Functional Description, Nokia Research Center, Dallas, Enero 2007, páginas 22 – 32.
6. NOKIA, GSM Systra: Training Material, 1998, páginas 6-17, 68-71.
7. 3GPP, Technical specification Group GSM/EDGE TS 05.01, Radio Access Network, Radio Transmission and Reception, April 2005, páginas 3 -4.
8. 3GPP, Technical specification Group GSM/EDGE TS 05.08, Radio Access Network, Radio Transmission and Reception, October 2005, páginas 7 - 9.
9. RANTALA TIMO, Implementation of Synthesized Radio Frequency Hopping Handling in Base Station Controller, Department of Information Technology at Tampere, University of Technology, Noviembre 1996, páginas 13-22, 25-32.
10. SALMENKAITA MATTI, Planning Methodology for frequency hopping solutions in GSM networks, Department of Electrical and

Communications Engineering, Helsinki University of Technology, Mayo 1998, páginas 18 – 32, 73 – 102.

11.3GPP, Technical specification Group GSM/EDGE TS 05.02, Radio Access Network, Radio Transmission and Reception, Noviembre 2005, páginas 8 -10.

12. SHI JAMES Y HUANG DONGJIE, Frequency Hopping Plan with Radio Network Synchronization, IEEE Vehicular Technology Proceedings, Plano, USA, Mayo 2005, páginas 2163 – 2166.

13.3GPP, Technical specification Group GSM/EDGE TS 05.05, Radio Access Network, Radio Transmission and Reception, Mayo 2006, páginas 13 -15.

14. JÄRVELÄ RAULI, Smart GSM Network Simulator Release 6.5 User Guide Description, Nokia Research Center, Dallas, Enero 2007, páginas 2 – 28.