



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

PLANES DE FRECUENCIAS EN TELEFONÍA MÓVIL GSM

Sergio Antonio Vasquez Gomez
Asesorado por el Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez

Guatemala, octubre de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

PLANES DE FRECUENCIAS EN TELEFONÍA MÓVIL GSM

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

SERGIO ANTONIO VASQUEZ GOMEZ

ASESORADO POR EL ING. BYRON ODILIO ARRIVILLAGA MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Angel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortiz de León
VOCAL V	Agr. José Alfredo Ortiz Herincx
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Marco Junio Martínez Hernández
EXAMINADOR	Ing. Edwin Alberto Solares Martínez
EXAMINADOR	Ing. Manuel Fernando Barrera Pérez
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado,

PLANES DE FRECUENCIAS EN TELEFONÍA MÓVIL GSM,

tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica, el 12 de abril de 2010.



SERGIO ANTONIO VASQUEZ GOMEZ

Guatemala, 17 de Mayo del 2010

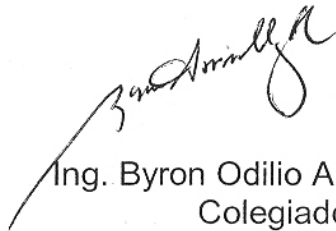
Ing. Julio Cesar Solares Peñate.
Coordinador de Área Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero:

Por este medio hago de su conocimiento que he asesorado y revisado el trabajo de graduación elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Electrónica **SERGIO ANTONIO VASQUEZ GOMEZ** con carné **2712858** cuyo trabajo se titula: **“PLANES DE FRECUENCIAS EN TELEFONÍA MÓVIL GSM”**

Este trabajo de graduación cumple con los objetivos planteados, y por lo tanto le doy mi aprobación y además le informo que el autor y mi persona somos responsables por el contenido del trabajo de graduación.

Atentamente



Ing. Byron Odilio Arrivillaga Mendez
Colegiado 5217
Asesor de tesis

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 25. 2010
Guatemala, 24 de MAYO 2010.

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
“**PLANES DE FRECUENCIAS EN TELEFONÍA MÓVIL GSM**”,
del estudiante, **Sergio Antonio Vasquez Gomez**, que cumple con
los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica



JCSP/sro

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 30. 2010.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; SERGIO ANTONIO VASQUEZ GOMEZ titulado: "PLANES DE FRECUENCIAS EN TELEFONÍA MÓVIL GSM", procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puento Romero



GUATEMALA, 20 DE JULIO 2,010.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.329.2010

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **PLANES DE FRECUENCIAS EN TELEFONÍA MÓVIL GSM**, presentado por el estudiante universitario **Sergio Antonio Vasquez Gomez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, octubre de 2010

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- DIOS** El gran creador del universo y el que me ha ayudado en todos los días de mi vida.
- MI MADRE** Quien me ayudó en el comienzo, seguimiento y terminación de mi carrera y tuvo fé en mí en todo momento y nunca dudó de mí.
- MI PADRE** Que en paz descanse y quien me apoyó y dió consejos sabios los cuales guiaron y siguen guiando mi vida.
- MI ESPOSA** De quien he tenido todo el apoyo incondicional y me ha apoyado en las buena y en las malas.
- MIS HIJAS** Fuente de inspiración y mi razón de seguir adelante en la carrera profesional.
- MIS HERMANOS** Porque siempre me han apoyado cuando más lo necesito.
- AMIGOS** Quienes me apoyaron grandemente, sin ellos me hubiera sido difícil realizar este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XXI
OBJETIVOS	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1. RADIO FRECUENCIA	1
1.1. El campo eléctrico	1
1.1.1. Permitividad	3
1.1.2. Conductividad	5
1.2. El campo magnético	8
1.3. El campo electromagnético	11
1.3.1. Polarización	14
1.3.1.1. Polarización vertical	16
1.3.1.2. Polarización horizontal	17
1.4. Fenómenos que suceden en una onda incidente en una superficie	17
1.4.1. Reflexión	17
1.4.2. Dispersión	18
1.4.3. Difracción	18
1.4.4. Refracción	18
1.4.5. Absorción	18
1.4.6. Despolarización	19

2.	ANTENAS	21
2.1.	El concepto de antena	21
2.2.	Parámetros de las antenas	22
2.2.1.	Ganancia	22
2.2.2.	Área efectiva	23
2.2.3.	Patrón de radiación	24
2.2.4.	Polarización	26
2.2.5.	Impedancia y VSWR	26
2.3.	Antenas utilizadas en telefonía celular	28
2.3.1.	Inclinación y acimut	32
3.	INTRODUCCIÓN A LA RED GSM	33
3.1.	Estructura de una RED GSM	33
3.2.	Tipo de modulación digital utilizada para GSM	44
3.2.1.	GMSK	51
4.	INDICADORES DE RED (KPI)	55
4.1.	El concepto de contador	55
4.1.1.	Interpretación de los contadores	57
4.1.2.	Como se trabajan con los contadores	58
4.2.	Principales KPI utilizados para medir una red celular	60
4.2.1.	Accesibilidad	60
4.2.1.1.	Accesibilidad en TCH	61
4.2.1.2.	Accesibilidad en SDCCH	61
4.3.	Llamadas caídas	62
4.3.1.	Clasificación del tipo de llamadas caídas	63

5.	INTERFERENCIA	65
5.1.	Qué es la interferencia	65
5.2.	Cuáles son las causas de la interferencia	68
5.3.	Cómo afecta la interferencia a los diferentes canales de GSM	72
6.	DISEÑO DE PLANES DE FRECUENCIAS PARA GSM	73
6.1.	Espectro disponible	73
6.1.1.	Cómo se dividen los canales GSM dentro del espectro	74
6.1.1.1.	Cómo calcular la frecuencia y el canal	77
6.2.	Concepto de canales en GSM	78
6.2.1.	Canales lógicos	79
6.2.1.1.	Canal lógico TCH	79
6.2.1.2.	Canal de control lógico BCH	80
6.2.1.3.	Canal lógico de control CCCH	81
6.2.1.4.	Canal lógico de control DCCH	83
6.2.2.	Canales físicos en GSM	85
6.2.2.1.	Trama TDMA	85
6.3.	Principales parámetros en el diseño de un plan de frecuencias	91
6.3.1.	El BSIC	91
6.3.2.	El BCCH	93
6.4.	Algoritmos que disminuyen el efecto de la interferencia	94
6.4.1.	DTX	94
6.4.2.	<i>Frequency Hopping</i>	95
6.4.3.	MAIO	98
6.4.4.	HSN	100
6.4.5.	Control de potencia de la BTS	102
6.4.6.	Control de potencia de la MS	104
6.5.	Diseño de planes de frecuencias	106
6.5.1.	Reuso de los ARFCN para los BCCH	109

6.5.2.	Reuso de los BSIC	112
6.5.3.	El concepto de <i>channel group</i>	115
6.5.4.	Cómo utilizar el <i>frequency hopping</i>	116
6.5.4.1.	Formación de los grupos de ARFCN para los <i>channel groups</i>	118
6.5.4.2.	Asignación del MAIO	120
6.5.4.3.	Asignación de los HSN	122
6.6.	Ejemplo de planes de frecuencias	123
6.6.1.	Reuso variable	123
6.6.2.	Reuso fijo	129
7.	EQUILIBRO EN LA ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS	133
7.1.	Cuándo los canales de control tienen más espectro	133
7.2.	Cuándo los canales de voz tienen más espectro	135
7.3.	Equilibrio óptimo de espectro para canales de voz y control	136
8.	KPI QUE MEJORAN AL REALIZAR UN BUEN PLAN	139
8.1.	CSR	139
8.2.	SDCCH drop	140
8.3.	TCH drop	141
9.	SOFTWARE DE PLANEACIÓN DE FRECUENCIAS	143
9.1.	Programas que utilizan predicciones de coberturas	144
9.2.	Programas de utilizan estadísticas móviles	146

CONCLUSIONES	151
RECOMENDACIONES	153
BIBLIOGRAFÍA	155
E-GRAFÍA	157

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Líneas de campo de cargas eléctricas	2
2. Campo eléctrico entre 2 materiales de diferentes dieléctricos	6
3. Corriente circulante circular y el campo magnético resultante	9
4. Onda electromagnética	14
5. Antena panel con sus patrones de radiación	16
6. Patrón de radiación de una antena	25
7. Patrón de radiación horizontal polarización vertical	29
8. Patrón de radiación vertical polarización vertical	29
9. Patrón de radiación horizontal polarización vertical	30
10. Patrón de radiación vertical polarización vertical	31
11. Representación de una torre telefónica y los móviles	34
12. Estructura de una red celular GSM	35
13. Esquemas de multiplexación en tiempo y en frecuencia	36
14. Estructura de la BSS e interfases de cada etapa de una red GSM	37
15. <i>Handover</i>	41
16. BTS divididas en LA para la rápida ubicación de los móviles	43
17. Reuso de frecuencias en las BTS	44
18. Modulaciones análogas	45
19. BPSK	47
20. QPSK	48
21. Efecto del ruido en la modulación digital	49
22. Constelaciones	49

23. Modulación FSK	50
24. Modulación MSK	51
25. MSK Y GMSK	53
26. El concepto de contado en GSM	56
27. Señalización de una llamada en GSM	58
28. Un contador principal que contiene otros contadores	59
29. Señal transmitida y señal de la interferencia	66
30. Reuso de frecuencias, canal 116 tres veces reusado	67
31. Interferencia co-canal	69
32. Plan de frecuencias con reuso adyacente	70
33. Interferencia adyacente	71
34. Efecto de la interferencia sobre los canales de control y de tráfico	72
35. Canal dúplex de 200 KHz cada uno	75
36. Distribución de ARFCN del 1 al 5 en la banda P 900	76
37. Distribución de ARFCN del 1 al 5 en la banda P 900	77
38. Estructura de las tramas TDMA en GSM	88
39. <i>Hopping</i> banda base los transmisores tienen frecuencias fijas	96
40. <i>Hopping</i> sintetizado los transmisores tienen varias frecuencias	97
41. Asignación del MAIO en un sector de una BTS	99
42. Una BTS de 3 sectores con diferentes MAIO, 2 TRX por sector	100
43. Movimiento de las frecuencias de acuerdo con el HSN	101
44. Regulación de potencia de la BTS	103
45. Control de potencia del MS	105
46. Distribución geográfica de BTS	111
47. Asignación de los BCCH	112
48. Asignación de BSIC, combinación BCCH-BSIC	114
49. Celdas con diferentes cantidades de TRX	118
50. Distribución de celdas GSM para reuso variable	125
51. ARFCN asignados a los diferentes BCCH	126

52. Asignación de BSIC para los BCCH	127
53. Set de frecuencias de <i>hopping</i> y el HSN para cada sitio	127
54. MAL fijos para cada sector con HSN diferente para cada sitio	130
55. Comportamiento de la accesibilidad y llamadas caídas	134
56. Forma de obtener el CSR	140

TABLAS

I. Intensidad de campo eléctrico para geometrías simétricas	3
II. Permitividad de los materiales más comunes	4
III. Bandas de frecuencias para GSM	74
IV. Fórmulas que dan la frecuencia central en las bandas de GSM	78
V. 64 valores disponibles de BSIC	92
VI. Distribución de los TRX por <i>channel groups</i>	115
VII. Estrategia recomendada para asignar los ARFCN para los TCH	117
VIII. Otra forma de asignar el <i>hopping</i>	117
IX. ARFCN para los tres sectores de una BTS	121
X. Configuración adecuada de MAIO y ARFCN en cada sector	121
XI. Formación de grupos de frecuencias para <i>hopping</i>	128
XII. MALs para la asignación fija de frecuencias para las BTS	130
XIII. Una configuración típica para BCCH y SDCCH	141

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
μ	Permeabilidad
BQ	<i>Bad Quality</i>
BSC	<i>Base Station Controller</i>
BSIC	<i>Base Station Identity Code</i>
BTS	<i>Base Transceiver Station</i>
C	Coulomb
CP	<i>Central Processor</i>
CS	<i>Circuit Switched</i>
D	Densidad de flujo eléctrico
dB	Decibeles
dBm	$10 \times \log$, <i>Potencia en watts /1 mW</i>
E	Intensidad de campo eléctrico
F	Fuerza
f	Frecuencia
FR	<i>Full rate</i>
H	Intensidad de campo magnético
H	Henry
HR	<i>Half Rate</i>
Hz	<i>Hertz</i>
I	Corriente
J	Densidad de corriente
kbps	kilo bits por segundo

KHz	Kilo Hertz
L	Inductancia
m	Metro
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
N	Newton
PS	<i>Packet Switched</i>
Q	Carga eléctrica
QoS	<i>Quality of Service</i>
R99	<i>3Gpp release 99</i>
RR	<i>Radio Resource</i>
s	Segundo
S	Siemens = $1 / \Omega$
SS	<i>Signal Strength</i>
TA	<i>Taming Advance</i>
TCH	<i>Traffic Channel</i>
TDMA	<i>Time División Multiple Access</i>
TRX	<i>Transceiver</i>
TS	<i>Timeslot</i>
V	Voltaje
Wb	Weber
Z	Impedancia
ϵ	Permitividad
η	Impedancia intrínseca del medio
θ	Ángulo
λ	Longitud de onda
μ_r	Constante magnética
π	Pi
ρ	Resistividad
σ	Conductividad

Φ	Flujo magnético
Ω	Ohmios
ω	Frecuencia angular

GLOSARIO

ARFCN	Código de un canal dúplex de 200 KHz, compuesto por un canal de 200 KHz para comunicarse de la BTS hacia la MS y otro canal de 200 KHz para la comunicación de la MS hacia la BTS.
bit	Es la unidad más pequeña de información digital denotado por 1 o 0, <i>uno o cero</i> .
BLER	Errores de bloques de transmisión digital, es una medida del porcentaje de bloques de datos RLC recibidos incorrectamente.
BSC	Componente de la red GSM que controla a las BTS (<i>Base Transceiver Station</i>) y que realiza las decisiones de control de potencia, <i>handover</i> y asignación de canal.
BTS	Estación transmisora receptora base, compuesto por los radios de transmisión y recepción y antenas.
Busy	Estado del teléfono móvil cuando se está utilizando para realizar una llamada de voz o datos.

C / I	Relación entre la potencia de una señal portadora y la potencia de la interferencia que llega al punto de medición.
<i>Channel Group</i>	Es un número que identifica a un grupo de TRX y facilita la asignación de ARFCN a los TRX, ya que los ARFCN son asignados al <i>channel group</i> , e internamente los TRX del <i>channel group</i> comparten todos los ARFCN en el proceso de <i>hopping</i> .
Coordenadas	Números que identifican la posición geográfica de cualquier punto sobre la superficie de la tierra.
Coulomb	Unidad de carga eléctrica.
<i>Downlink</i>	Es la definición de la dirección de la información y onda electromagnética y este término indica que la dirección es de la BTS hacia la MS.
<i>Dual band</i>	La habilidad de acceder a las bandas GSM 900 y GSM 1800.
EGPRS	Sistema que soporta los métodos de modulación GMSK y 8-PSK y define nueve modulaciones y esquemas de códigos. MCS-1 a MCS-4 son modulados con GMSK y MCS-5 a MCS-9 son modulados con 8-PSK. EGPRS soporta tasas de transmisión de hasta 59.2 kbps por <i>timeslot</i> .

GPRS	Sistema que hace posible enviar paquetes de datos sobre la red GSM con esquemas de códigos GMSK. El GPRS soporta hasta una tasa de transmisión de 20.0 kbps por <i>timeslot</i> .
GPS	Equipo que puede determinar las coordenadas de un punto.
Henry	Unidad de la inductancia.
Idle	Estado del teléfono móvil cuando está encendido y no se está utilizando para una llamada de voz o datos.
IMSI	<i>“International Mobile Subscriber Identity”</i> . Es un número como identifica al usuario la red GSM y es la Identificación de Abonado Móvil Internacional.
MS	Estación móvil o más conocido como teléfono celular, utilizado por los usuarios para la comunicación de voz o datos.
MSC	Componente de la red GSM, responsable del inicio, enrutamiento y asignación de llamadas.
Newton	Unidad de fuerza.

PAGING	Es el proceso cuando una red celular intenta contactar a un MS en particular y es logrado al difundir un mensaje de <i>paging</i> .
RADIO BLOCK	Un bloque de radio que es una secuencia de cuatro ráfagas transportando datos de usuario o mensajes de control.
RLC/MAC	Son protocolos responsables por la segmentación de los datos y multiplexación de los usuarios.
SIT	Superintendencia de Telecomunicaciones. Organismo eminentemente técnico del Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda de Guatemala, cuya función es administrar y regular el espectro radioeléctrico.
Slotted ALOHA	Un sistema asíncrono con <i>timeslots</i> por transmisión. Cualquier usuario en el sistema puede transmitir en cualquier <i>timeslot</i> en cualquier punto en el tiempo, si ocurre una colisión, el usuario puede retransmitir su mensaje.
TBF	Es una conexión lógica entre el BSS y la MS. Un TBF es activado cuando hay datos para enviar del lado del BSS o la MS.
Timeslot	Es un canal físico de la trama TDMA y lleva información de canales de control, canales de voz o canales de datos.

<i>Timing Advance</i>	Este término se refiere a los atrasos en tiempo que suceden cuando la distancia entre la MS y la BTS se incrementa, ya que a mayor distancia la ráfaga de información tarda más tiempo en llegar de la MS hacia la BTS.
<i>Uplink</i>	Es la definición de la dirección de la información y onda electromagnética y este término indica que la dirección es de la MS hacia la BTS.
Weber	Unidad de flujo magnético.

RESUMEN

La planeación de frecuencias es un trabajo que se realiza constantemente, ya sea para ampliaciones de radios, sitios nuevos o resintonizaciones generales y es un trabajo en el que se utilizan estrategias y procedimientos adecuados para evitar interferencias entre los sectores de las celdas de una red GSM. Actualmente, la capacidad de la red GSM es utilizada en su mayoría para realizar llamadas de voz y es muy importante que los usuarios experimenten una excelente calidad del servicio de telefonía móvil.

En una red GSM existen dos tipos de canales: lógicos y físicos; los canales lógicos son los que llevan toda la información de los usuarios y toda la señalización respectiva, tanto de la radiobase hacia el teléfono celular y viceversa, algunos canales lógicos son sólo de una vía es decir, de la radiobase hacia el teléfono y otros son de doble vía. Los canales físicos son los *"timeslots"*, *Ranura de tiempo*, de cada radio (TRX) un radio esta compuesto por ocho *"timeslots"* y cada uno de estos puede llevar información de un canal de control, de voz o de datos.

Los canales lógicos pueden ser de control o de tráfico. El objetivo de la planeación de frecuencias es asignarles frecuencias a todos los canales de control y de tráfico de los sectores de las radiobases; hay reglas específicas en la asignación de frecuencias para los canales de control y otras reglas para la asignación de los canales de tráfico.

OBJETIVOS

General

Crear un documento que tenga la información necesaria para diseñar un plan de frecuencias en GSM y mostrar los resultados que se obtienen al aplicar diferentes distribuciones de frecuencias.

Específicos

1. Proporcionar al lector la teoría necesaria del comportamiento de las ondas electromagnéticas.
2. Transmitir a través de este documento el conocimiento mínimo necesario que es aplicado en las empresas de telefonía móvil de GSM.
3. Mostrar los diferentes parámetros que se utilizan en el diseño de planes de frecuencias.
4. Estudiar los diferentes algoritmos utilizados para disminuir la interferencia.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, son muchas las empresas que prestan el servicio de telefonía móvil o servicio de datos en todo el mundo. Cada empresa u operador utiliza una porción del espectro radio eléctrico sobre el cual transmite y recibe la información de cada unidad móvil, comúnmente llamado teléfono celular, y la calidad del servicio que prestan depende en buena parte de la cantidad de espectro que utilizan y la frecuencia de operación de la misma.

Dado que, generalmente, los operadores tienen más de una tecnología en el rango de frecuencias asignado, se reduce aun más el espectro disponible para GSM y es allí donde se necesita del ingeniero de planeación de frecuencias que pueda utilizar en forma óptima el espectro disponible.

Este trabajo trata sobre la resintonización de frecuencias para los canales de control y de tráfico de GSM, enseña las técnicas utilizadas para tal propósito, así como los algoritmos o "*features*" que se utilizan para disminuir las interferencias sobre los canales de control y de tráfico, también, se hace una introducción a la teoría de las ondas electromagnéticas que son el medio de transmisión de la información de una red celular, asimismo, se proporciona una teoría breve de la estructura de una red GSM

1. RADIO FRECUENCIA

Un ingeniero de planeación de frecuencias debe tener un conocimiento básico acerca de la forma de propagación de las ondas electromagnéticas, ya que, gran parte del trabajo se basa en hacer ajustes finos en la dirección e inclinación de las antenas, para controlar la propagación de las ondas electromagnéticas y limitar la cobertura de una radiobase a una distancia deseada y, de esa forma, no tener problemas con otros sectores que trabajan con la misma frecuencia.

1.1. El campo eléctrico

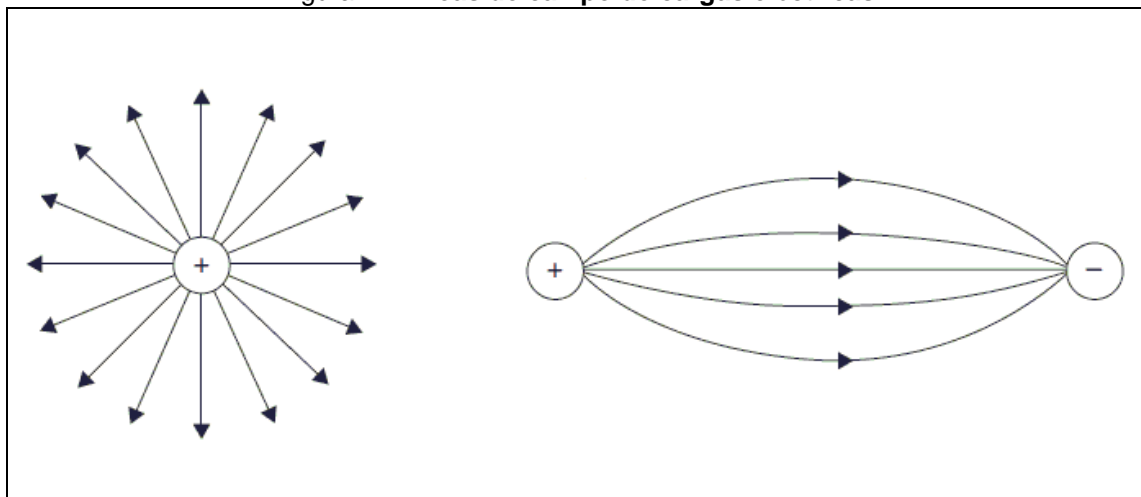
La carga eléctrica es una de las propiedades básicas de la materia y se originan a niveles atómicos dentro de la materia, pues en esencia el átomo esta compuesto, básicamente, por el electrón, neutrón y protón. El electrón tiene carga negativa y el positrón tiene carga positiva; al provocar que en un material los electrones se separen de sus átomos y se trasladen a otro material, se tendrán dos materiales una con carga positiva, *de donde los electrones se retiraron* y otra con carga negativa, *a donde los electrones se trasladaron*, esto básicamente, es el fenómeno eléctrico.

El vector campo eléctrico E en un punto en el espacio está definido como la fuerza eléctrica F que actúa sobre una carga de prueba positiva colocada en ese punto y dividido por la magnitud de la carga de prueba q_0 :

$$E = F / q_0 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Así, las unidades del campo eléctrico son Newton por Coulomb(N/C) por que la unidad de la carga eléctrica es Coulomb. El campo eléctrico E en la fórmula anterior no es la producida por la carga de prueba q_0 , sino que es producida por otra carga eléctrica. El campo eléctrico se puede representar por líneas de campo como se muestra en la figura 1, las cuales son sólo líneas imaginaria que ayudan a representar el comportamiento del campo eléctrico, con esto se puede definir otro concepto muy útil, el cual es el flujo eléctrico; este es el número de líneas de campo que atraviesan una región A, por ejemplo, en la figura 1, dando una región con área A, si se mide el número de líneas de campo que atraviesan la región a una distancia lejana de la carga, el número de líneas de campo es menor a la que se contaría si se hiciera cerca de la carga eléctrica, dicho de otra forma, el flujo eléctrico es la medida del número de líneas de campo que atraviesan cierta superficie. Las líneas de campo se originan en cargas positivas y terminan en cargas negativas o al infinito como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Líneas de campo de cargas eléctricas



Fuente: John S. Seybold. **INTRODUCTION TO RF PROPAGATION**. Pág. 15

La ley de Gauss establece que el flujo eléctrico neto a través de cualquier superficie Gaussiana cerrada, es igual a la carga neta que se encuentra dentro de la superficie cerrada dividido por ϵ_0 , donde ϵ_0 es la permitividad del espacio libre y tiene un valor de:

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Utilizando la ley de Gauss, se puede calcular el campo eléctrico, debido a varias distribuciones de carga simétricas, la tabla I muestra algunas fórmulas.

Tabla I. Intensidad de campo eléctrico para geometrías simétricas

Fuente de campo \mathbf{E}	Simetría	Intensidad del campo
Carga puntual	Esférico	$\mathbf{E} = \frac{Q}{4\pi r^2 \epsilon} \hat{\mathbf{r}}$
Líneas de carga infinitas	Cilíndrico	$\mathbf{E} = \frac{Q}{2\pi r \epsilon} \hat{\mathbf{r}}$
Superficie de carga infinita	Plano	$\mathbf{E} = Q\hat{\mathbf{z}}$

Fuente: John S. Seybold. *INTRODUCTION TO RF PROPAGATION*. Pág. 15

1.1.1. Permitividad

La permitividad es determinada por la tendencia de un material a polarizarse ante la aplicación de un campo eléctrico y, de esa forma, cancelar, parcialmente, el campo dentro del material y sus unidades son farad por metro. La permitividad se expresa como un múltiplo de la permitividad del espacio libre, ϵ_0 .

Este término es llamado permitividad relativa, ϵ_r , o constante dieléctrica del material, en la tabla II se muestran las permitividades relativas de varios materiales comunes en la naturaleza.

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Tabla II. Permitividad de los materiales más comunes

Material	Er
Vacío	1
Aire	1,0006
Polietileno	2
Huesos	2
Parafina	2,1
Teflón	2,1
Petróleo	2,2
Polietileno	2,2
Caucho	3
Arena seca	3,4
Plexiglas	3,4
Nylon	3,5
Vidrio	4
Músculos	4
Baquelita	5
Mica	6
Fórmica	6
Porcelana	6
Mármol	8
Etanol	24
Metanol	33
Nitrobenceno	35
Glicerina	50
Agua destilada	81
Titanato de bario (BaTiO ₃)	1200
Estanato titanato de bario	20000

Fuente: <http://www.answermath.com/Electricity/z-electrostatica-18.htm>

1.1.2. Conductividad

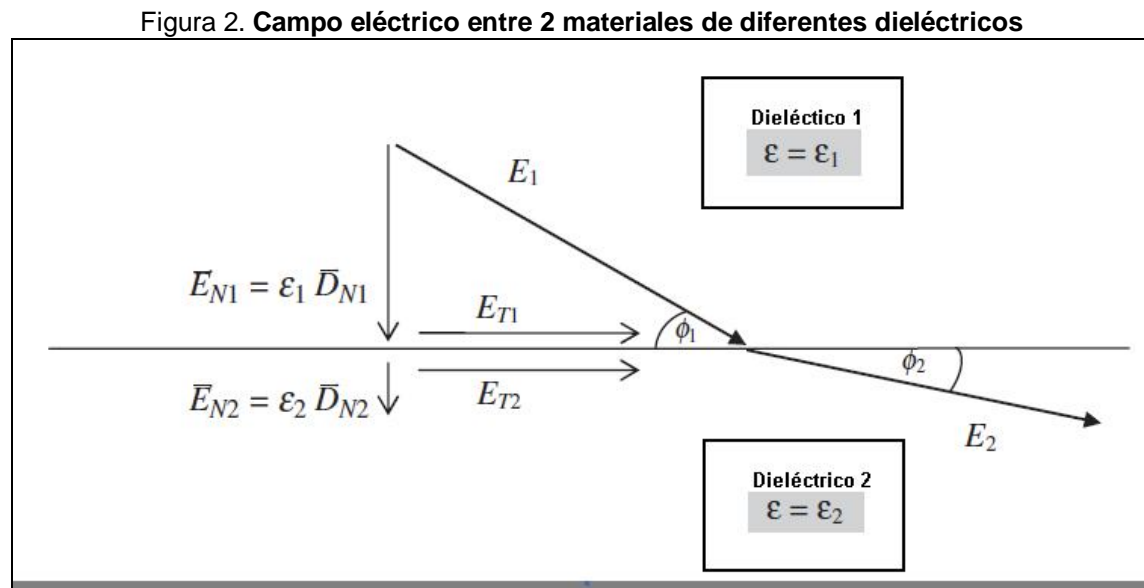
Los materiales que tienen electrones libres disponibles son llamados conductores. Los conductores se caracterizan por su conductividad, σ , o por el recíproco de la conductividad el cual es la resistividad, ρ . Las unidades de la conductividad son siemens por metro y las unidades de la resistividad son ohm-metro. Los materiales que tienen muy baja conductividad son llamados aislantes. Un dieléctrico perfecto tiene conductividad cero, mientras que la mayoría de los materiales reales tienen ambos una constante dieléctrica y una conductividad no cero. A medida que la conductividad del material dieléctrico se incrementa, el dieléctrico se vuelve un material con más pérdidas. Cuando se toma en cuenta que los materiales no tienen un comportamiento ideal para las ondas electromagnéticas, la permitividad puede expresarse como un número complejo que es una función de la constante dieléctrica, la conductividad y la frecuencia de la onda.

Un campo eléctrico estático no puede existir en un conductor, porque los electrones libres se mueven en respuesta al campo eléctrico hasta que se balancean. Así, cuando un campo eléctrico incide sobre un conductor, muchos electrones libres se trasladarán a la superficie del conductor, para balancear el campo eléctrico incidente, resultando en una superficie de carga sobre el conductor.

El vector densidad de flujo \mathbf{D} se define como un vector que tiene la misma dirección que el campo \mathbf{E} y cuya fuerza es proporcional a la carga que genera el campo \mathbf{E} . Las unidades del vector densidad de flujo son coulomb por metro cuadrado. El campo eléctrico depende de la densidad de flujo y de la permitividad del medio donde se propaga.

$$\mathbf{E} = \epsilon \mathbf{D} \quad (\text{Ecuación 4})$$

La frontera entre dos dieléctricos distintos curva o refracta un vector de campo eléctrico. Esto es debido a que el componente del vector de densidad de flujo que es perpendicular a la frontera es constante a través de la frontera, mientras que el componente paralelo del campo eléctrico es constante en la frontera.



Fuente: John S. Seybold. *INTRODUCTION TO RF PROPAGATION*. Pág. 17

Como se muestra en la figura 2 donde los subíndices N y T denotan el componente perpendicular y tangencial del vector campo eléctrico y del vector densidad de flujo relativo a la frontera dieléctrica respectivamente. Así, se tiene la siguiente ecuación:

$$\phi_1 = \tan^{-1}(-\vec{E}_{N1} / \vec{E}_{T1}) \quad (\text{Ecuación 5})$$

Y

$$\phi_2 = \tan^{-1}(\vec{E}_{N2}/\vec{E}_{T2}) \quad (\text{Ecuación 6})$$

Ya que:

$$D_{N1} = D_{N2} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$\vec{E}_{N2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \vec{E}_{N1} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Y usando:

$$E_{T1} = E_{T2} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Y haciendo las sustituciones respectivas se tiene:

$$\phi_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \frac{\vec{E}_{N1}}{\vec{E}_{T1}}\right) \quad (\text{Ecuación 10})$$

Así, el ángulo del campo E en el segundo dieléctrico puede ser escrito en términos del componente del campo E, del primer dieléctrico y la relación de las constantes dieléctricas. Así, también, se obtiene:

$$\phi_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \tan(\phi_1)\right) \quad (\text{Ecuación 11})$$

La ecuación 11 muestra que los campos eléctrico que son perpendiculares o paralelos a una frontera de dieléctricos ($\Phi=0$ o 90°) no son refractados y la cantidad de refracción depende de la constante dieléctrica de ambos materiales y el ángulo de incidencia.

1.2. El campo magnético

Un campo magnético estático puede ser generado por un flujo de corriente fijo o por un material magnético. El campo magnético tiene fuerza y dirección y se denota por un vector **B**. De una manera similar al campo eléctrico, el campo magnético puede ser dividido en densidad de flujo magnético (H) y el campo magnético (B). La unidad de campo magnético es ampere por metro (A/m) y la unidad de la densidad de flujo magnético es Weber por metro cuadrado (Wb/m²) o tesla. Para los materiales no magnéticos, el campo magnético y la densidad de flujo magnético son linealmente relacionados por, μ , que es la permeabilidad del material.

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Las unidades de la permeabilidad del material son Henry por metro donde el Henry es la unidad de la inductancia. Un Henry es igual a un Weber por Ampere. La permeabilidad se expresa como una permeabilidad relativa, μ_r , veces la permeabilidad del espacio libre μ_0 .

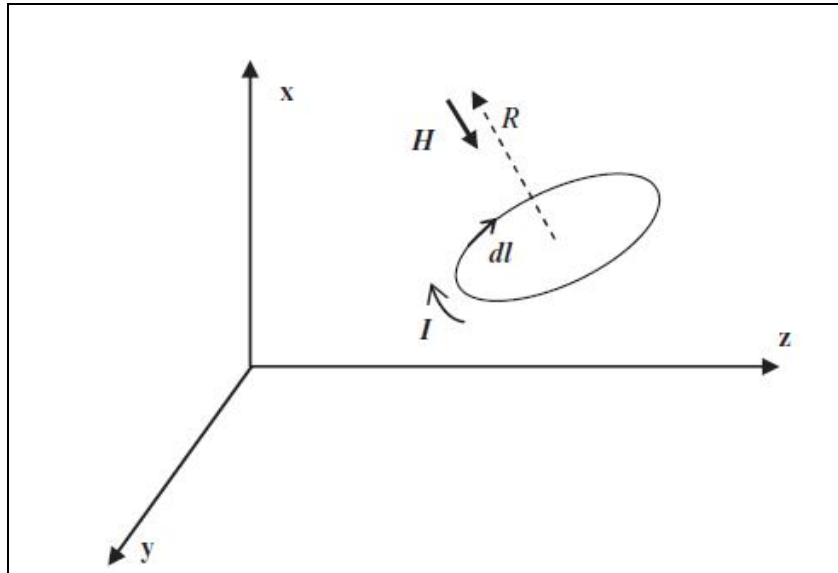
$$\mu = \mu_r\mu_0 \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad (\text{Ecuación 14})$$

El flujo magnético es proporcional al flujo de corriente, mientras que el campo magnético depende del flujo de corriente y de la permeabilidad del material. Para tener un flujo de corriente fijo, se requiere de un circuito cerrado como lo muestra la figura 3.

Figura 3. Corriente circulante circular y el campo magnético resultante



Fuente: John S. Seybold. **INTRODUCTION TO RF PROPAGATION**. Pág. 19

La ley de Biot-Savart establece que en cualquier punto P la magnitud de la intensidad de campo magnético producida por el elemento diferencial, es proporcional al producto de la corriente, la magnitud del diferencial de longitud y el seno del ángulo formado entre el filamento y la línea que conecta al filamento con el punto P, donde se busca el campo.

La magnitud de la densidad de campo magnético es, inversamente, proporcional al cuadrado de la distancia desde el elemento diferencial al punto P. La dirección de la intensidad de campo magnético es normal al plano que contiene el filamento diferencial y la línea dibujada desde el filamento hasta el punto P.

La forma integral de la ecuación de Biot-Savart es:

$$\vec{H} = \oint \frac{I d\vec{l} \times \hat{a}_R}{4\pi R^2} \quad \text{A/m} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Cuando un campo magnético incide sobre una frontera entre materiales magnéticos, las ecuaciones son:

$$\mathbf{B}_{N1} = \mathbf{B}_{N2} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Y

$$\mathbf{H}_{T1} - \mathbf{H}_{T2} = \mathbf{J}_S \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde \mathbf{J}_S es el vector de densidad de corriente superficial en la frontera.

1.3. El campo electromagnético

Las ecuaciones de Maxwell son la base de la propagación de las ondas electromagnéticas. La esencia de las ecuaciones de Maxwell es que un campo eléctrico variante en el tiempo produce un campo magnético y un campo magnético variante en el tiempo produce un campo eléctrico. Un campo magnético variante en el tiempo se puede producir por una carga eléctrica acelerada.

En un estricto sentido, todas las ondas reales son esféricas, pero a una distancia suficiente de la fuente, la onda esférica puede ser aproximada a una onda plana con componentes de campos lineales sobre una pequeña extensión cuando se usan las ondas planas, el campo eléctrico, el campo magnético y la dirección de propagación son todos mutuamente ortogonales. Al usar la dirección del vector de propagación para representar la onda plana, la visualización y análisis de la propagación de la onda plana se facilita grandemente. Esto es llamado teoría de ray.

La teoría de ray es muy útil en ondas lejanas, pero no es, universalmente, aplicable en situaciones de campos cercanos a la fuente. La relación entre el campo eléctrico y magnético variantes en el tiempo se expresan matemáticamente:

$$\nabla \times \bar{E} = -\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \quad (\text{Ecuación 18})$$

$$\nabla \times \overline{H} = \epsilon \frac{\partial \overline{E}}{\partial t} \quad (\text{Ecuación 19})$$

La forma diferencial de las ecuaciones de Maxwell se usan para obtener la ecuación de onda, la cual se expresan en una dimensión como:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Esta ecuación diferencial parcial es la relación fundamental que gobierna la propagación de las ondas electromagnéticas. La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas es determinada de la ecuación de onda y es una función de la permitividad y permeabilidad del material o medio ambiente.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (\text{Ecuación 21})$$

La cual se expresa en términos de la permeabilidad relativa y permitividad relativa, la ecuación para la velocidad de la onda electromagnética es entonces:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (\text{Ecuación 22})$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} c \quad (\text{Ecuación 23})$$

Con los valores de la permeabilidad y permitividad en el espacio libre se tiene:

$$c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (\text{Ecuación 24})$$

Así, la velocidad de propagación es igual a la velocidad de la luz, en el espacio libre dividido por la raíz cuadrada del producto de la permitividad y permeabilidad relativas.

Una onda electromagnética plana viajando en la dirección positiva z puede ser descrita por la siguiente ecuación:

$$P(z) = E_x(z)H_y(z) \quad (\text{Ecuación 25})$$

Donde:

$$E_x(z) = E_1 e^{-jkz} + E_2 e^{jkz} \quad (\text{Ecuación 26})$$

$$\eta H_y(z) = E_1 e^{-jkz} + E_2 e^{jkz} \quad (\text{Ecuación 27})$$

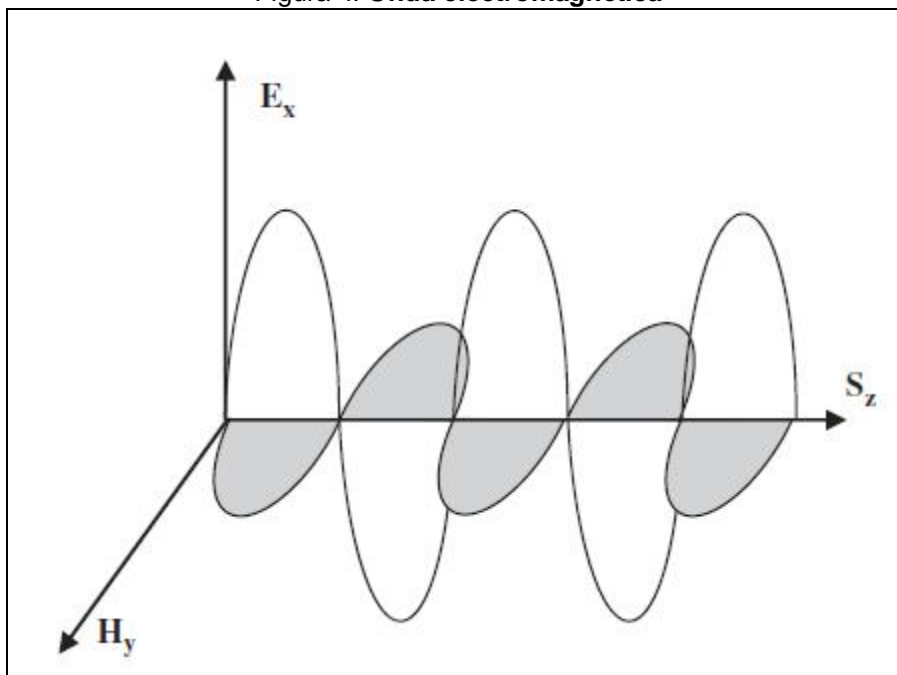
Donde k es el número de onda.

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ m}^{-1} \quad (\text{Ecuación 28})$$

1.3.1. Polarización

La polarización de una onda electromagnética se define como la orientación del plano en el cual el campo eléctrico reside. La polarización de una antena se define como la polarización de la onda que la antena transmite. La más simple de las polarizaciones es la polarización lineal, la cual es, usualmente, ambas polarización vertical u horizontal, pero puede ser definida por otras orientaciones.

Figura 4. Onda electromagnética



Fuente: John S. Seybold. **INTRODUCTION TO RF PROPAGATION**. Pág. 24

El producto cruz entre el campo eléctrico y magnético produce un vector en la dirección de la propagación. Este es llamado el vector *poynting* y se define como:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (\text{Ecuación 29})$$

o

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \mathbf{E} \times \mathbf{H} / Z_0 \quad \text{W/m}^2 \quad (\text{Ecuación 30})$$

Donde Z_0 es la impedancia característica del medio la cual es dada por:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad \text{ohms} \quad (\text{Ecuación 31})$$

El cual puede ser expresado como:

$$Z_0 = 377 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad \text{ohms} \quad (\text{Ecuación 32})$$

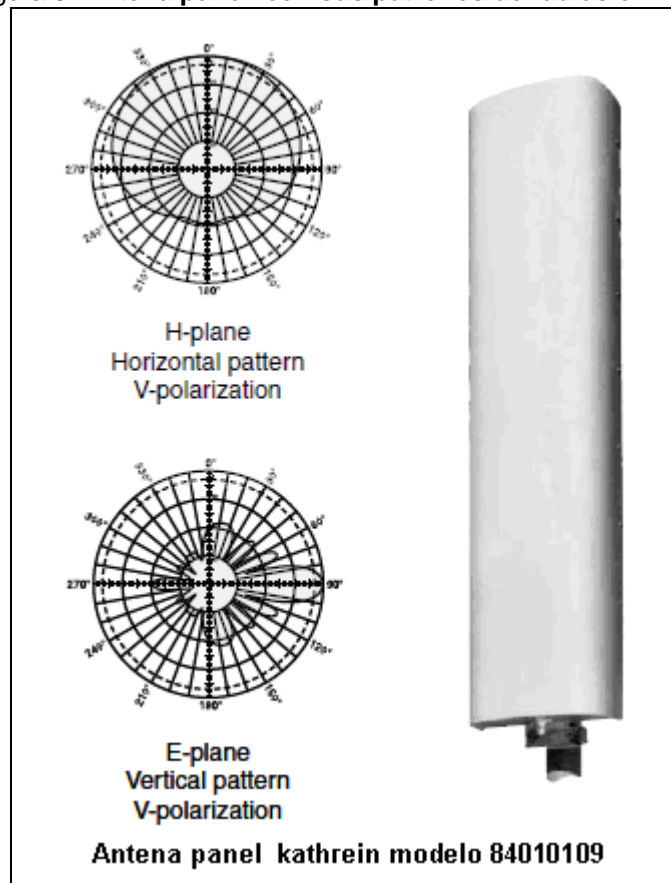
Esta formulación del vector de poynting da la densidad de potencia en watts por metro cuadrado, el cual es un valor que es muy utilizado por los ingenieros de radio frecuencia.

Otro tipo de polarización es circular, el cual es un caso especial de la polarización elíptica. La polarización elíptica consiste de la suma de dos ondas, linealmente polarizadas ortogonales, las cuales son 90 grados fuera de fase.

1.3.1.1. Polarización vertical

Es en la cual el campo eléctrico es vertical y el campo magnético es horizontal, este tipo de polarización es la más utilizada para la transmisión de las ondas electromagnéticas para la telefonía celular, para obtener este tipo de polarización, sólo basta con colocar las antenas en posición vertical, como lo muestra la figura siguiente.

Figura 5. Antena panel con sus patrones de radiación



Fuente: <http://www.kathrein-scala.com/catalog/84010109.pdf>

1.3.1.2. Polarización horizontal

Es en la cual el campo magnético es vertical y el campo eléctrico es horizontal, este tipo de polarización no es muy utilizado en telefonía celular salvo en aplicaciones especiales donde se requiera colocar la antena en posición horizontal.

1.4. Fenómenos que suceden en una onda incidente en una superficie

Hay una gran variedad de fenómenos que ocurren cuando una onda electromagnética incide sobre una superficie. Estos fenómenos dependen de la polarización de la onda, la geometría de la superficie, las propiedades de la superficie del material y de la característica de la superficie relativa a la longitud de onda de la onda electromagnética.

1.4.1. Reflexión

Siempre que una onda electromagnética incide sobre una superficie lisa, una porción de la onda será reflectada. Esta reflexión tiene una característica especial, ya que el ángulo de incidencia y el ángulo de reflexión son iguales.

1.4.2. Dispersión

La dispersión ocurre cuando una onda electromagnética incide sobre una superficie rugosa o irregular. Cuando una onda es dispersada la reflexión resultante ocurre en muchas y diferentes direcciones.

1.4.3. Difracción

La difracción ocurre cuando la trayectoria de una onda electromagnética es bloqueada por un obstáculo con un borde, relativamente, agudo.

1.4.4. Refracción

Es la alteración de la dirección de la trayectoria de la porción de la onda que es transmitida cuando entra en un segundo material.

1.4.5. Absorción

En cualquier momento que una onda electromagnética está presente en un material que no sea el espacio libre, habrá alguna pérdida de intensidad, a medida que penetra el material, debido a las pérdidas ohmicas.

1.4.6. Despolarización

Esto es debido a que las ondas electromagnéticas inciden en las superficies de materiales y suceden más de algunos de los casos anteriores con los cuales se cambian las direcciones y polarizaciones de las ondas electromagnéticas.

2. ANTENAS

2.1. El concepto de antena

La antena es un elemento muy importante para la transmisión de la energía de una radiobase celular, sin la antena no se podrían transmitir las señales de telefonía celular. Básicamente una antena es un elemento transductor que convierte la energía eléctrica en energía electromagnética y para su adecuado uso se tienen que entender varios parámetros muy importantes.

Una antena isotrópica radia la energía electromagnética en la misma cantidad en todas las direcciones, es como una esfera ideal. Esta es ideal, ya que, la mayoría de antenas tienen cierta directividad o tendencia a transmitir la energía no igual en todas las direcciones. La antena isotrópica se usa como referencia para determinar la ganancia de una antena real.

La densidad de potencia S debido a una radiación isotrópica es una función solo de la distancia, d , de la antena y puede ser expresada como la potencia total dividida por el área de la esfera de radio d .

$$S = \frac{P}{4\pi d^2} \quad \text{W/m}^2$$

(Ecuación 33)

De la fórmula anterior la potencia es distribuida de forma uniforme sobre toda la esfera, para una antena isotrópica a una distancia del punto de radiación la densidad de potencia es constante, en todas las direcciones.

2.2. Parámetros de las antenas

2.2.1. Ganancia

La ganancia de una antena se puede calcular de dos formas una de ellas tomando como referencia a la antena isotrópica, como ya se mencionó la antena isotrópica radia igual en todas las direcciones, pero una antena real no radia igual en todas las direcciones, ya que, tiene un ángulo donde se irradia más potencia. La directividad de una antena es dado una distancia d que es la dirección o ángulo donde se produce la máxima densidad de potencia, dividido el promedio de la potencia total a la distancia d .

$$D = \frac{\text{Densidad de potencia a una distancia } d \text{ en dirección de la máxima potencia}}{\text{Densidad de potencia promedio a una distancia } d}$$

(Ecuación 34)

La directividad de una antena isotrópica es 1 y cuando se incluyen las pérdidas de la antena en la directividad, la fórmula de la ganancia es:

$$G = \eta \cdot \frac{\text{Densidad de potencia en la máxima dirección}}{P_T / 4\pi d^2}$$

(Ecuación 35)

Donde:

- ✓ P_T es la potencia aplicada a las terminales de entrada de la antena.
- ✓ $4\pi d^2$ el área de la superficie de la esfera de radio d .
- ✓ η es la eficiencia total de la antena, la cual toma en cuenta todas las pérdidas en la antena, incluyendo las pérdidas resistivas y las pérdidas introducidas para controlar el patrón de radiación.

$$\eta = \eta_I \eta_R \quad (\text{Ecuación 36})$$

La ganancia de una antena se puede describir como la potencia de salida en una dirección específica comparada con la potencia de salida de una antena isotrópica en la misma dirección. Y la ganancia, medida de esta forma, se expresa en dBi, los cuales son los decibeles de diferencia entre la antena real y la ideal (isotrópica). También, se puede medir la ganancia de la antena comparándola con la ganancia de una antena dipolo y, al hacerlo de esta forma, la ganancia se expresa en dBd y es 2.15 menos que la ganancia isotrópica.

2.2.2. Área efectiva

La ganancia de una antena puede ser definida usando el área efectiva o área de captura y se define como:

$$A_e = \eta A_p \quad \text{m}^2 \quad (\text{Ecuación 37})$$

Donde:

- ✓ A_p es el área física de una antena.
- ✓ η es la eficiencia total de la antena.

La ganancia de una antena es:

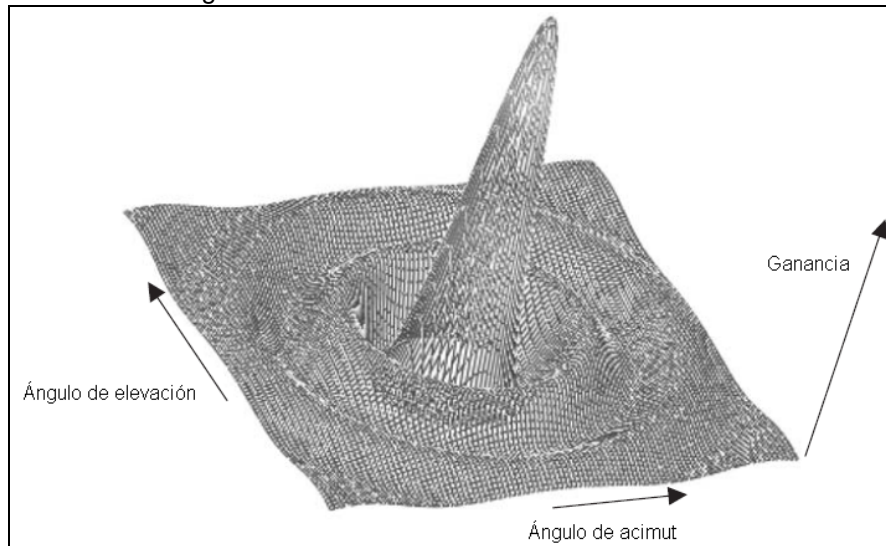
$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (\text{Ecuación 38})$$

Cuando sólo se conoce el área de la antena, se puede asumir una eficiencia de cerca de 0.6 y con esto se puede estimar las ganancias de las antenas más comunes en la industria.

2.2.3. Patrón de radiación

El patrón de radiación de una antena es una descripción geográfica de la ganancia de una antena en función del ángulo. Los patrones de radiación tienen 2 dimensiones que están en función del ángulo de elevación y acimut.

Figura 6. Patrón de radiación de una antena



Fuente: John S. Seybold. **INTRODUCTION TO RF PROPAGATION**. Pág. 42

El lóbulo principal de una antena es donde se produce la máxima ganancia. El ancho de apertura de una antena se define como el valor del ángulo entre 2 puntos del patrón de la antena cuyo valor es 3dB abajo del punto de máxima ganancia del patrón de radiación. Otro parámetro muy importante a considerar es el nivel de pico de los lóbulos laterales. Otro parámetros especificado en las antenas es la relación de de la ganancia a, 0 grados y 180 grados de acimut y esto indica que tanta potencia puede transmitir del lado posterior de la antena cuando el objetivo es que toda la potencia lo trasmita en el lado frontal de la antena y esto es muy importante, pues hay ocasiones en que se donduce la dirección de una antena a un determinado ángulo y cuando se hace el análisis se observa que también trasmite del lado contrario; para la planificación de frecuencias es muy importante saber estas especificaciones de las antenas, esta relación, comúnmente, se denomina relación “*Front to back*” del inglés.

2.2.4. Polarización

Como ya se explicó, en el capítulo anterior, la polarización se define como la orientación del plano que contiene el componente del campo eléctrico. En la práctica la mayoría de antenas son de polarización vertical y, por lo tanto, una antena panel vertical transmite y recibe polarización vertical y, de igual forma, si se coloca la antena en posición horizontal, transmitirá y recibirá campos eléctricos horizontales. Otro tipo de polarización que es muy común es la polarización cruzada, en la cual en una misma antena panel hay dos receptores, **o transmisores**, que producen campos eléctricos a 45 grados o sea +45 y -45 grados, este tipo de antena es muy común, puesto que, en muchas ocasiones una radiobase necesita de un transmisor y receptor por separado pero no hay espacio físico para colocar dos antenas.

2.2.5. Impedancia y VSWR

Una antena presenta una impedancia de carga, en la práctica la impedancia incluye las pérdidas resistivas dentro de la antena y otras impedancias complejas, tales como: el cableado y conectores dentro de la antena. La impedancia de una antena es muy importante, ya que, de una buena impedancia depende que se produzca, la máxima transferencia de potencia hacia la antena. Esta se produce cuando la impedancia de salida, de la radiobase celular es igual a la impedancia de entrada de la antena.

Cuando la antena y la radiobase no tienen la misma impedancia, se produce una baja en la eficiencia de potencia transmitida a la antena, porque parte de la señal es reflejada de regreso a la radiobase. La raíz cuadrada de la potencia reflejada a la transmitida es llamada coeficiente de reflexión:

$$|\rho| = \sqrt{\frac{P_r}{P_i}} \quad (\text{Ecuación 39})$$

Esto muestra que el coeficiente de reflexión esta entre 0 y 1. El coeficiente de reflexión puede ser determinado de un circuito, formado por las impedancias de la entrada de la antena y la impedancia de salida de la radiobase:

$$\rho = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (\text{Ecuación 40})$$

La cantidad de potencia que se pierde entre el transmisor de la radiobase y la antena es:

$$P_t = (1 - \rho^2)P_i \quad (\text{Ecuación 41})$$

Así, la pérdida de acoplamiento es:

$$L_p = 1 - \rho^2 \quad (\text{Ecuación 42})$$

Si hay un cable entre la antena y el trasmisor el acoplamiento crea una razón de onda estacionaria de voltaje, *VSWR del inglés*, en el cable. El efecto de un VSWR en un cable es un incremento de las pérdidas del cable.

$$VSWR = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|} \quad (\text{Ecuación 43})$$

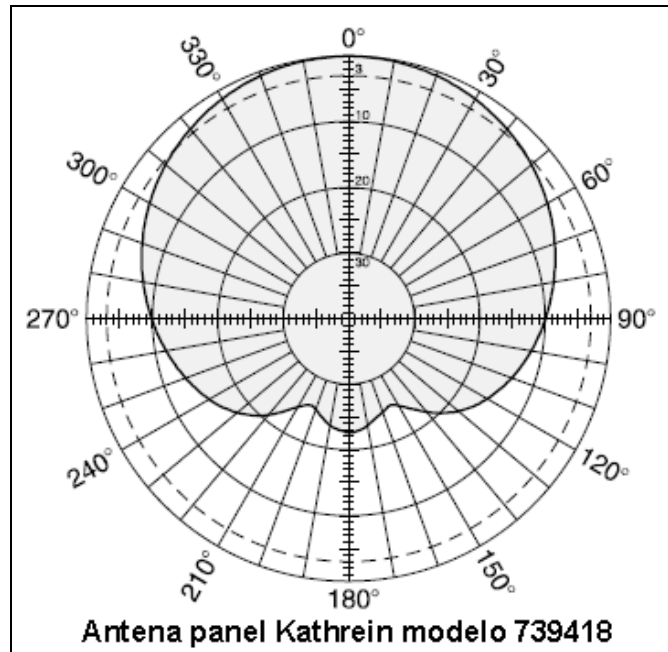
De esta relación, se observa que el mínimo valor de VSWR es 1, lo cual quiere decir que la pérdida en el cable es cero, que en la práctica es imposible ya que siempre hay pérdidas por acoplamiento en los conectores los valores típicos son 1.2 a 1.3 que son los valores aceptados en la industria; por el contrario el máximo valor de VSWR es infinito, esto quiere decir que no hay conexión entre el transmisor a la antena.

2.3. Antenas utilizadas en telefonía celular

La antena más utilizada en telefonía celular es la antena panel, ya que tiene la versatilidad de controlar fácilmente la radiación horizontal y vertical, existen varios tipo de antenas panel, entre ellas están: antena panel de polarización vertical y antena panel de polarización cruzada.

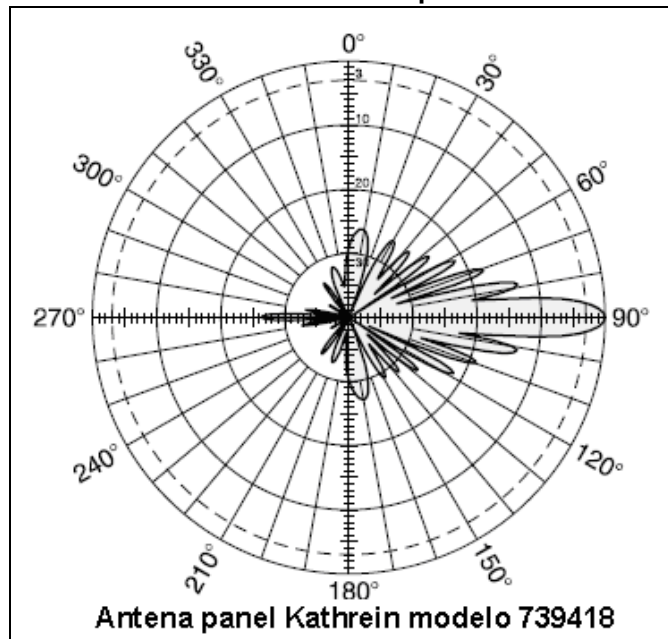
Las características que se deben tomar en cuenta al elegir una antena son: primero, qué se desea cubrir con la antena, teniendo ya el objetivo de cobertura de la antena se elije por su directividad, ganancia, ancho de banda, dimensiones física y revisar, según las especificaciones del fabricante, los patrones de radiación horizontal y vertical.

Figura 7. Patrón de radiación horizontal polarización vertical



Fuente: <http://www.kathrein-scala.com/catalog/739418.pdf>

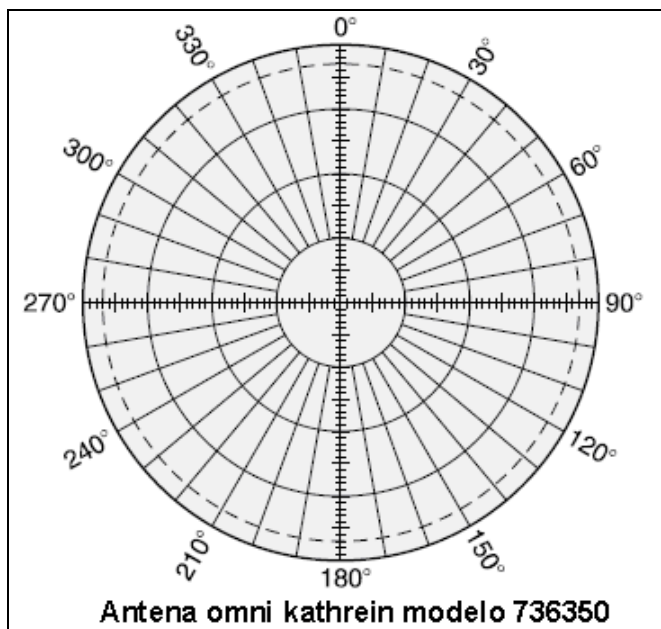
Figura 8. Patrón de radiación vertical polarización vertical



Fuente: <http://www.kathrein-scala.com/catalog/739418.pdf>

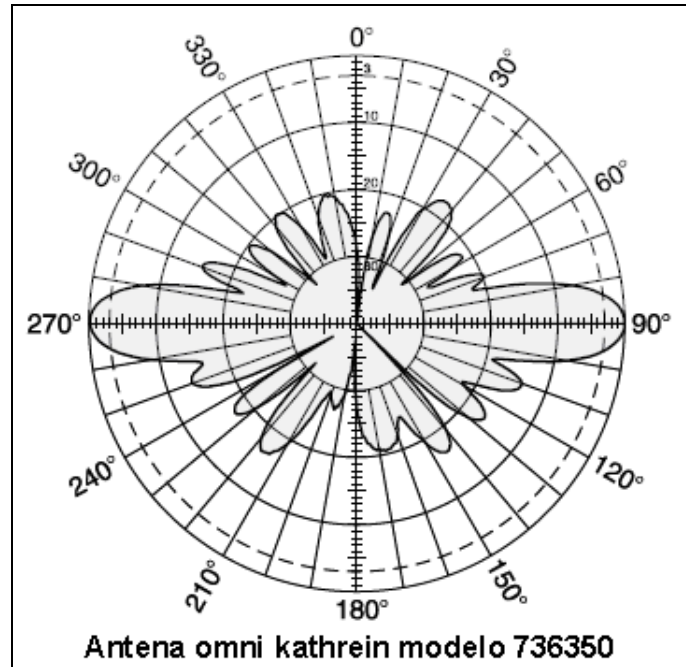
Otro tipo de antena que se utiliza en la industria celular es la antena omni, cuya característica principal es que irradia la potencia de forma igual en los 360 grados de la antena, en contra posición de la antena panel que se pueden conseguir con 40, 60, 70, 90 y 120 grados de apertura horizontal, o sea que la antena omni tiene una apertura horizontal de 360 grados.

Figura 9. Patrón de radiación horizontal polarización vertical



Fuente: <http://www.kathrein-scala.com/catalog/736350.pdf>

Figura 10. Patrón de radiación vertical polarización vertical



Fuente: <http://www.kathrein-scala.com/catalog/736350.pdf>

Este tipo de antenas tiene sus aplicaciones especiales, por ejemplo: cuando una radiobase tiene pocos usuarios, teniendo una antena panel de 60 grados de apertura horizontal y se desea que, la radiobase abarque más usuarios en los 360 grados, se puede utilizar este tipo de antenas, pero hay que pagar un precio que es la calidad de la señal o densidad de potencia que les llega a los usuarios, pues la potencia se irradia igual en los 360 grados.

2.3.1. Inclinación y acimut

La inclinación de una antena o *tilt* (del inglés) no es más que los grados de inclinación que se le coloca a una antena panel, las antenas omnis no se les puede dar inclinación, ya que, el patrón de radiación horizontal es de 360 grados y si se le hace alguna inclinación, una parte de la radiación de la antena estaría dirigida hacia arriba. Por lo tanto, la inclinación sólo se aplica a las antenas paneles; existen dos tipos de inclinación mecánicas y eléctricas, la mecánica es la inclinación física de la antena o sea se mueve todo el patrón de radiación vertical hacia abajo, los valores típicos de inclinaciones mecánicas con de 0 a 12 grados, para lograr esto a las antenas se les instalan un mecanismo especial.

La inclinación eléctrica es cuando se modifica el patrón de radiación vertical de la antena, sin modificar la inclinación mecánica, esto se logra con un mecanismo especial que tiene la antena en la parte de abajo. La inclinación eléctrica modifica el patrón de radiación vertical de la antena modificando la estructura interna del panel, los valores típicos de inclinaciones mecánicas van de 0 a 15 grados, es importante mencionar que no todas las antenas tienen inclinación eléctrica, sólo algunos modelos las tienen y, por consiguiente, son más costosas que las que no las tienen.

El acimut es cuando a la antena se le direcciona el patrón de radiación horizontal, nuevamente. Las antenas omnis no se les puede modificar el acimut puesto que, como se mencionó, su apertura horizontal es de 360 grados; en cambio las antenas paneles si se les puede modificar el acimut, ya que, la apertura horizontal va de 40 grados a 120 grados por lo que se puede mover o dirigir a los 360 grados de una torre de transmisión. El control de los acimuts es muy importante cuando se trata de controlar y disminuir las interferencias.

3. INTRODUCCIÓN A LA RED GSM

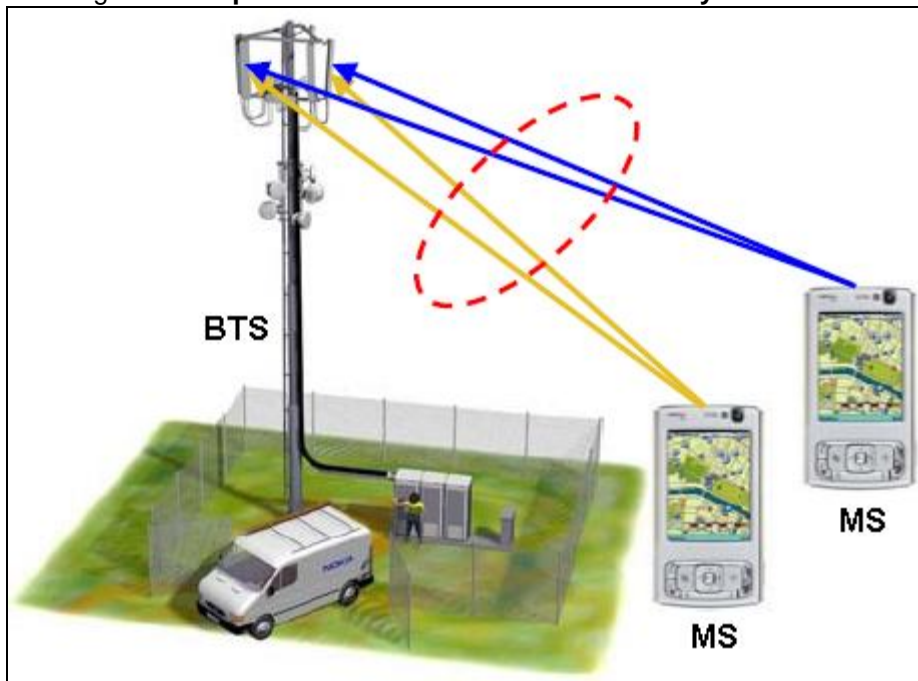
La red GSM es una de las más populares en el mundo, ya que la mayoría de países tienen por lo menos una red GSM. Esta es utilizada, actualmente, como una red celular de voz, es decir, que la mayor parte de la capacidad de la red es utilizada para la comunicación de voz, ya que, otras tecnologías son utilizadas para proporcionar servicios de datos o Internet como la WCDMA

3.1. Estructura de una RED GSM

Básicamente, una red GSM o telefonía móvil GSM es un servicio donde se utilizan equipos móviles o teléfonos que reciben y transmiten ondas electromagnéticas hacia unas antenas que están instaladas en estructuras metálicas llamadas torres de transmisión, las cuales están compuestas por, propiamente, la estructura metálica, en donde se instalan las antenas para la transmisión y recepción de las ondas electromagnéticas provenientes de los móviles, *teléfonos*, y del equipo de radio transmisores y receptores; este equipo puede ser instalado dentro de una caseta o a la interperie según sea el modelo del equipo. También, en la torre se instala la antena de microondas que sirve como enlace a otra torre en donde también hay otra antena que recibe y transmite la señal de la primera antena.

Las antenas de microondas se utilizan para transmitir toda la información recibida de las unidades móviles, *teléfonos* y la envía hasta el centro de procesamiento de datos, en donde cada llamada es enrutada hacia otro móviles que se encuentran en cobertura de otras torres.

Figura 11. Representación de una torre telefónica y los móviles

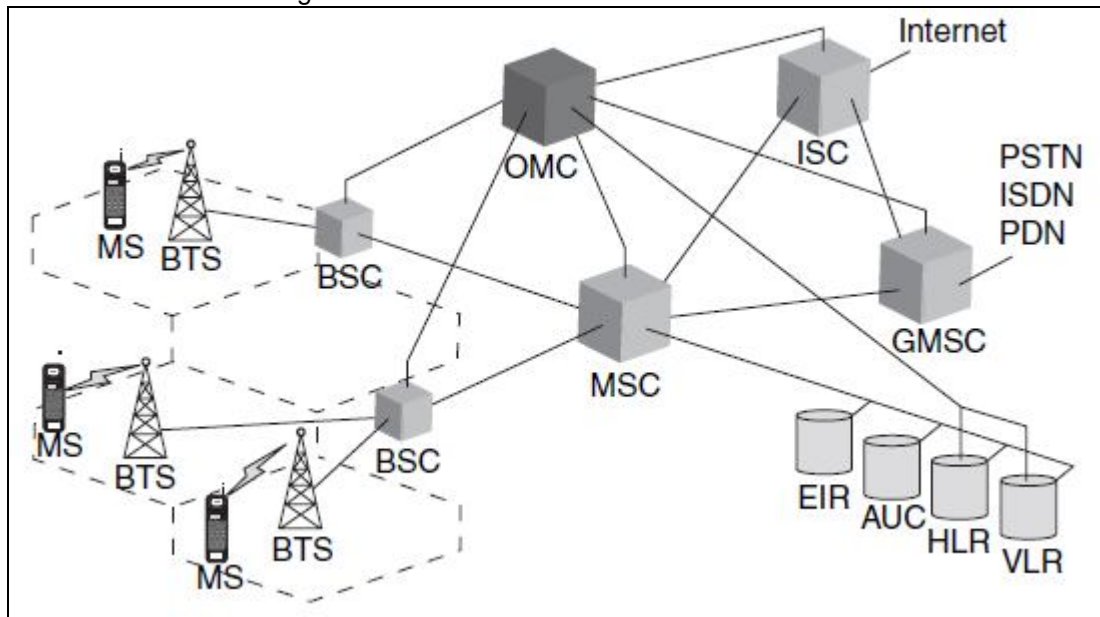


Fuente: www.3gamericas.org. *UMTS EVOLUTION*. Pág 63

Para proporcionar un servicio continuo en toda una región geográfica se tienen que instalar muchas torres de transmisión, la cobertura de servicio de una torre depende de la altura a la cual están instaladas las antenas, topografía del terreno y la frecuencia de las onda electromagnéticas, ya que, donde hay mucha vegetación la propagación de las ondas electromagnéticas se atenúan rápidamente. En general, una variable importante para determinar la cobertura de una torre de GSM es la frecuencia de transmisión, puesto que, a bajas frecuencias por ejemplo 400 Mhz, una torre con una altura h cubre mayor distancia, a diferencia de una que transmite a 1900 Mhz con la misma altura h .

La red celular GSM es llamada una red celular de segunda generación. Los móviles de GSM utilizan codificación digital para comunicarse con las torres de transmisión, contraria a la tecnología AMPS que utiliza modulación análoga para la comunicación con las torres de transmisión.

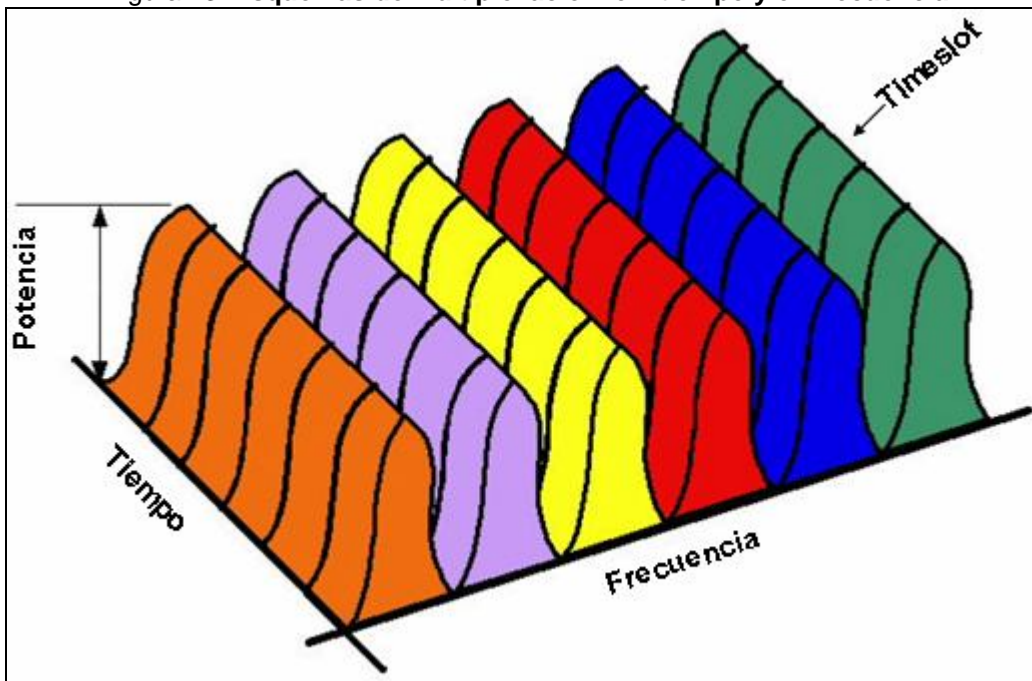
Figura 12. Estructura de una red celular GSM



Fuente: Praphul Chandra. *Bulletproof Wireless Security*. Pág. 100

La red GSM utiliza acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) y acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA), un canal lógico en GSM necesita ser especificado usando la frecuencia de la portadora (FDMA) y el *timeslot* (TDMA). En GSM los canales FDM son de 200 KHz y la división en tiempo de cada canal es de 8 *timeslots*. En GSM hay varias interfases que comienza con la de aire y otras más que llegan hasta el corazón de la red GSM.

Figura 13. Esquemas de multiplexación en tiempo y en frecuencia



Fuente: http://wirelessapplications.com/pdf/lf/FD_TD_CDMA.pdf

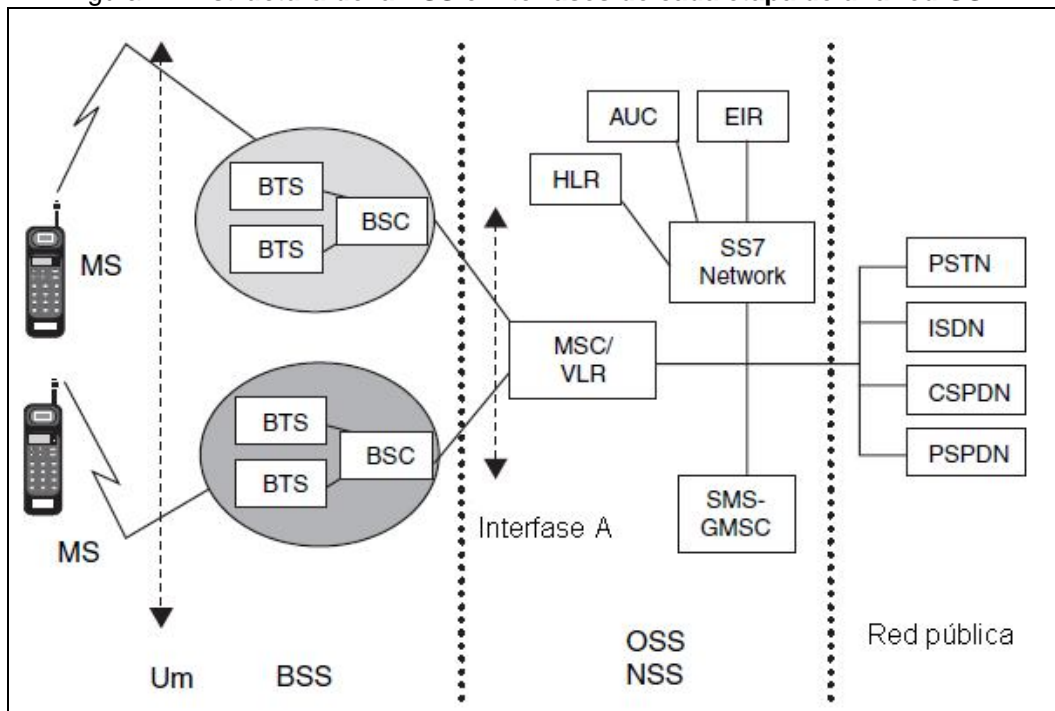
El teléfono celular GSM es el que utiliza el cliente para comunicarse, comúnmente llamando estación móvil o MS, *Mobile Station*. La estación móvil se refiere al dispositivo físico, el radio transmisor y receptor, el procesador de señal digital y el módulo de identidad del abonado o cliente (SIM). El SIM es una de las grandes ideas del estándar de GSM. Es una pequeña tarjeta electrónica que contiene información específica del abonado como el número de identidad, la red que el abonado está autorizado a utilizar, las llaves de encriptación, etc.

La estación móvil se comunica con la estación transmisora receptora base BTS, *Base Transceiver Station*, la cual consiste de un radio transmisor y un radio receptor y es donde llega o termina la comunicación, por medio de ondas electromagnéticas de las estaciones móviles.

Desde la BTS hacia el centro de procesamiento de datos, la comunicación generalmente, ya no es por medio de ondas electromagnéticas, pues se utilizan otros medios como la fibra óptica.

La BTS, como se mencionó, consiste de antenas, radio transmisor y receptor y un enlace a la estación controladora base BSC, *Base Station Controller*. La BTS no es inteligente, todo el control viene del BSC y este es responsable de la asignación de canales y frecuencias, mediciones de las señal del teléfono, *handovers*, *paging*, etc. Cada BSC controla varias BTS y la interfase entre estos dos componentes es llamado interfase A-BIS. El BSC y la BTS juntos constituyen el subsistema de estación base (BSS) del la red GSM. Después del BSS está el MSC que es el núcleo del la red GSM.

Figura 14. Estructura de la BSS e interfases de cada etapa de una red GSM



Fuente: Praphul Chandra. *Bulletproof Wireless Security*. Pág. 99

El MSC es el que enruta las llamadas de un abonado a otro, cada MSC está conectado a otros MSC y, también, se conecta a la red pública de telefonía, el MSC que se conecta a la red pública de telefonía es llamado GMSC, la interfase entre MSC es conocida como interfase E.

LA, Location Area: un LA se define como un grupo de celdas dentro de la red GSM, la localización de un usuario es conocido por el LA en el cual se encuentra. La identificación del LA, en el cual una MS se encuentra actualmente, está guardada en el VLR. Cuando una MS cruza la frontera entre LA, es decir, pasa a otro LA, la MS reporta su nueva localización a la red. La división de la celdas por LA es muy importante para no sobrecargar el MSC, ya que si, es necesario localizar a una MS para una llamada entrante en la red, lo primero que hace el MSC es que busca entre las celdas del LA, en donde se reportó la ultima vez.

Área de servicio de un MSC: el área de servicio de un MSC está creado de un número de LA y representa la zona geográfica de la red controlado por el MSC, es decir, todas las BTS que están conectadas por medio del BSC hacia el MSC.

HLR, Home Location Register: en el HLR está centralizada toda la información de los abonados. Es una base permanente de la información personal de los abonados hasta que el abonado es cancelado, la información almacenada incluye: identificación del abonado, servicios suplementarios del abonado, información de la localización del abonado, información de autenticación del abonado. El HLR puede ser implementado en el mismo nodo de red como el MSC o como una base de datos sola.

Si la capacidad del HLR es excedida por el número máximo de suscriptores se necesitaría colocar otro HLR. El HLR es una parte muy importante de la red GSM, ya que, si la comunicación hacia esa base de datos falla o el mismo HLR falla no se podría acceder o generar ninguna llamada.

El VLR, Visitor Location Register: es una base de datos que contiene información acerca de todos los móviles de los usuarios, los cuales actualmente, están en el área de servicio de un MSC, por lo tanto, hay un VLR por cada MSC. El VLR guarda, temporalmente, la información de todos los móviles que están en el área de servicio de un MSC. El VLR puede ser considerado como un HLR distribuido pues contiene una copia de los datos del HLR, en forma temporal.

Cuando un usuario entra en una nueva área de servicio de un MSC, el VLR conectado al MSC requiere información acerca del usuario del HLR. El HLR manda una copia de la información requerida al VLR y actualiza su localización. Cuando el usuario realiza una llamada, el VLR tendrá la información requerida para efectuar la llamada.

AUC, Authentication Center: la función del AUC es autenticar los intentos de los usuarios para acceder la red. Esta es usada para proteger a la red GSM contra intentos de fraude, ya que, hay muchos tipos de fraude como la clonación de teléfonos donde copian la información de un móvil con la intención de realizar llamadas sin costo afectando al dueño del móvil original. El AUC es una base de datos conectado al HLR al cual provee de los parámetros de autenticación y las llaves de cifrado para asegurar la seguridad de la red GSM.

EIR, *Equipment Identity Register*: el EIR es una base de datos que contiene la información de la identificación de los equipos móviles, el cual ayuda a bloquear las llamadas de los equipos robados, no autorizados, o defectuosos.

BSC, *Base Station Controller*: el BSC administra todas las funciones relacionadas al radio de las BTS de una red GSM. Es un equipo de alta capacidad que provee funciones tales como *handovers* de las unidades móviles, asignación de los canales de radio y la recolección de la configuración de las celdas. Cada MSC puede controlar varios BSC.

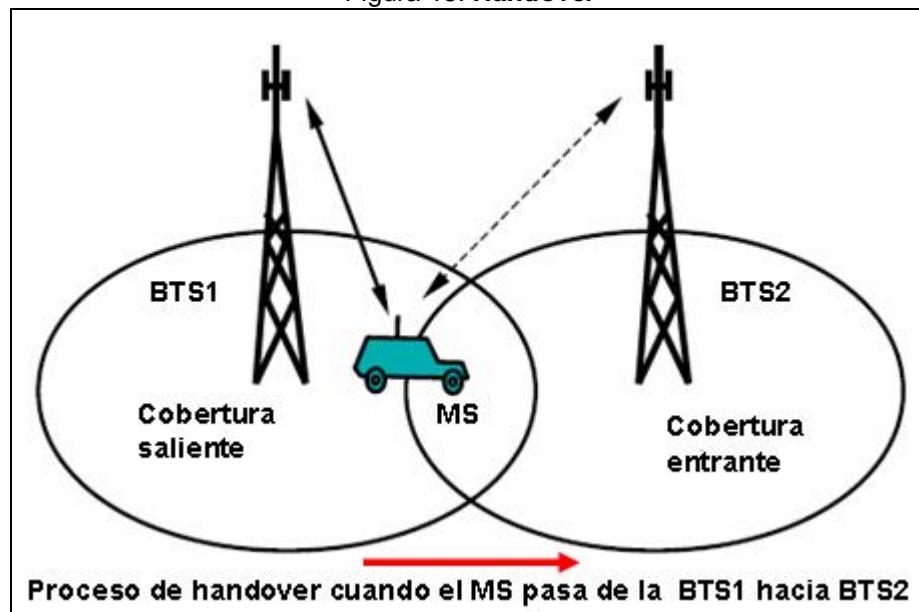
BTS, *Base Transceiver Station*: la BTS controla el enlace de radio hacia la unidad móvil. La BTS está compuesta de los equipos de radio, tales como: los transmisores y receptores y las antenas las cuales son necesarias para transmitir la señal celular u ondas electromagnéticas. Cada BSC puede controlar un grupo de BTS.

MS, *Mobile Station*: una MS es usada por un suscriptor móvil para comunicarse con la red GSM. Existen varios tipos de MS, cada una permite a los suscriptores realizar o recibir una llamada. Existen muchas marcas y tipos de MS y cada una ofrece diferentes funciones agregadas a la MS, pero todas tienen las funciones básicas de hacer o recibir una llamada. En GSM el suscriptor es separado del equipo móvil. Cada información del suscriptor es guardado en una tarjeta inteligente SIM. El SIM puede colocarse en otro equipo móvil GSM, esto brinda la ventaja de seguridad y portabilidad.

Handover: es una de las características básicas de un sistema de telefonía móvil, puesto que, es el proceso que se realiza para tener movilidad en toda la región geográfica, en donde se garantiza servicio de telefonía móvil. El *handover* es el proceso en el cual se tiene una llamada de voz o datos en GSM y cuando se debilita la señal de una BTS a donde esta conectado el móvil, inmediatamente el BSC busca una BTS, que sea mejor candidata para recibir la llamada y, así, evitar que se produzca una desconexión de la llamada por baja señal.

Como se mencionó, el BSC es el que busca la mejor candidata, así mismo, el que da la orden de cambio de BTS, para el usuario este cambio es transparente y sólo en redes mal optimizadas no se realiza, correctamente, este proceso. Por tal motivo, la optimización y la definición correcta de los *handovers* es un trabajo que debe realizarse cuidadosamente para evitar las desconexiones de las llamadas por baja señal.

Figura 15. **Handover**



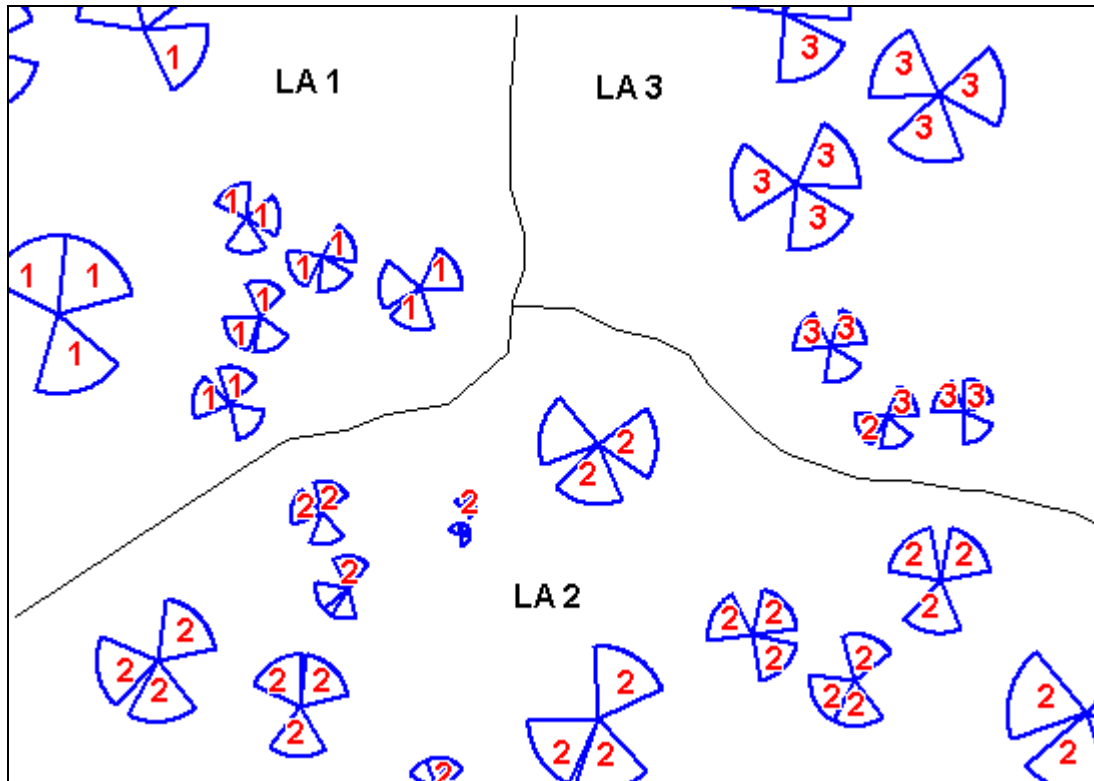
Fuente: QING-AN ZENG and DHARMA P. AGRAWAL. *Handoff in Wireless Mobile Networks*.
Pág. 2

Paging: es el proceso cuando la red GSM busca a un móvil en particular, el proceso comienza cuando un abonado A quiere comunicarse con un abonado B, el abonado A marca el número al que desea llamar, el cual es del abonado B, el requerimiento llega hasta el MSC donde éste MSC busca el móvil del abonado B. El proceso comienza con los datos del VLR que contiene la última ubicación del abonado B, entonces, para que no se comience a buscar en toda la red GSM, las BTS se dividen en LA es decir en grupos pequeños de radiobases como lo muestra la figura 16 y, como se mencionó anteriormente, el móvil B debió notificar al MSC en que LA estaba, por lo tanto, el MSC primero busca en el LA donde el móvil B notificó su ubicación la última vez. En caso de que el móvil B no responde a la llamada en el LA específico, entonces, el MSC lo busca en todos los LA del MSC.

Por lo tanto, el paging en el llamado que se le hace a los móviles para indicarles que tienen una llamada entrante o un mensaje de texto.

Hay varias cosas importantes que se deben especificar; primero: que el MSC busque al móvil en el LA, mandando un mensaje de paging a todos las BTS que conforman el LA en forma simultánea y segundo: que los llamados los hace de acuerdo con los parámetros establecidos en el MSC, por ejemplo en el MSC se pueden colocar los valores de los parámetros, de tal forma que haga una llamada en el LA, si el móvil no contesta, nuevamente, se le hace otra llamada y si esta vez no contesta entonces se hace el llamado a todos los LAs del MSC una sola vez.

Figura 16. BTS divididas en LA para la rápida ubicación de los móviles



Fuente: Gráfica de MapInfo con celdas no reales

Reuso de frecuencias: GSM, como ya se mencionó, utiliza canales de 200 KHz, por lo tanto, para un ancho de banda de 10 Mhz, se tendrían 50 canales GSM, los cuales se tienen que utilizar en forma óptima, para evitar que se tengan interferencias, ya que de lo contrario, se tendría una calidad de señal muy deficiente. En la figura 17 se muestran varias celdas de tres sectores y cada una tiene una frecuencia asignada, se puede ver que en el centro de la gráfica hay una celda que tiene asignadas las frecuencias 62,23 y 44, estas mismas frecuencias las tiene otra celda del grupo.

Figura 17. Reuso de frecuencias en las BTS

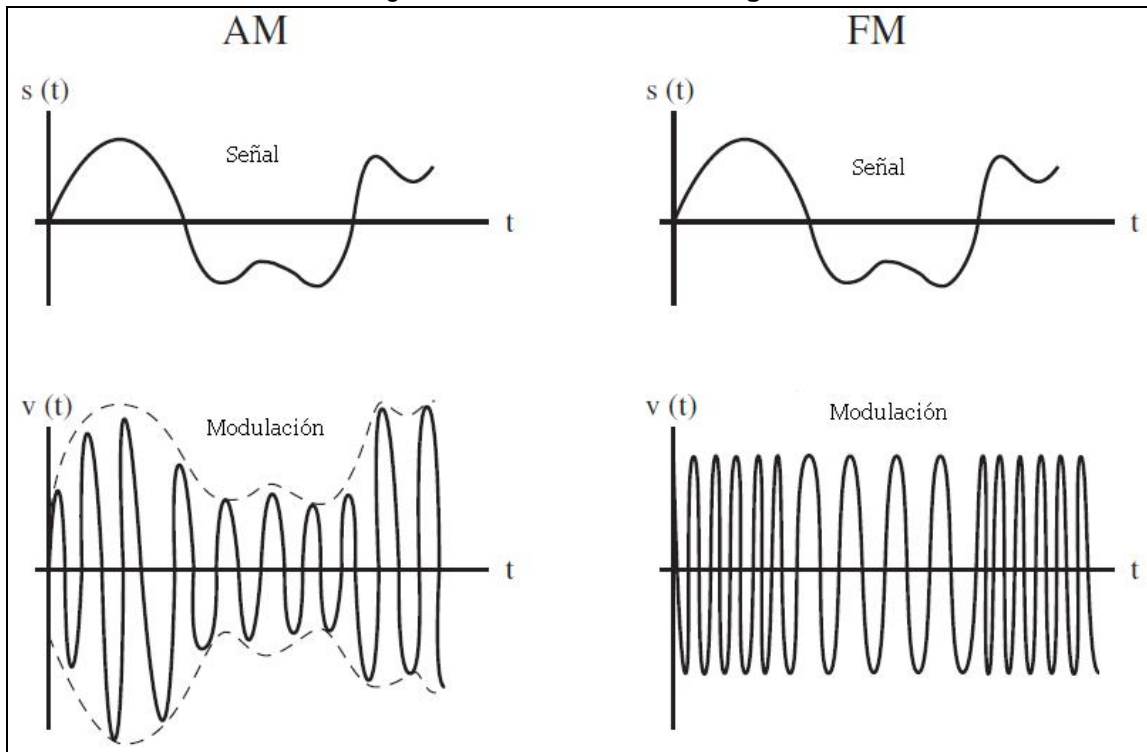


Fuente: Gráfica de MapInfo con celdas no reales

3.2. Tipo de modulación digital utilizada para GSM

Modulación análoga: las modulaciones análogas más comunes son la modulación por amplitud modulada AM y frecuencia modulada FM, como lo muestra la figura 18.

Figura 18. Modulaciones análogas



Fuente: www.digitalengineeringlibrary.com. **CDMA CAPACITY AND QUALITY OPTIMIZATION.**
 Pág 19

En este tipo de modulación se tienen dos señales, la señal que se quiere transmitir y la portadora la cual es la que se modulará. Este proceso es muy simple, consiste en que por medio de la forma de la señal que se quiere transmitir en el caso de AM, se modifica la amplitud de la señal portadora, de acuerdo a la señal que se quiere transmitir y, en el caso de FM, se modifica la frecuencia de la señal portadora, de acuerdo con la amplitud de la señal que se quiere transmitir.

En la modulación digital se utilizan bits para modular la señal portadora. Un bit es la unidad más pequeña de información digital, representado por uno de dos estados 1 o 0. Hay dos enfoques generales para la modulación digital, coherente y no coherente.

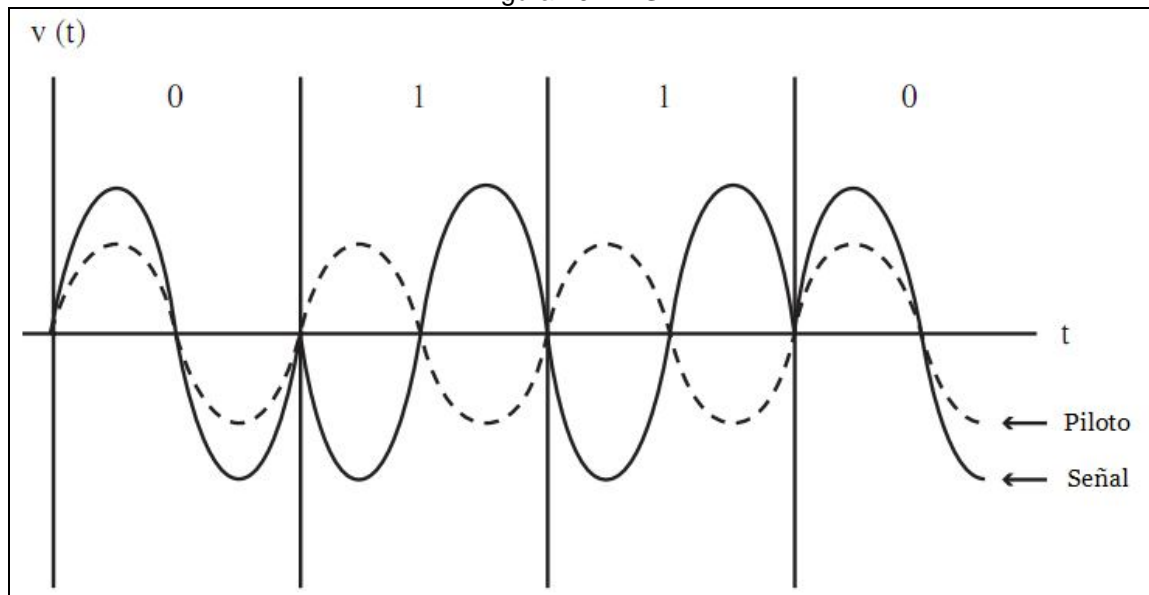
En la modulación coherente se usa un piloto o señal de referencia, una señal piloto es una señal transmitida que es modulada con un patrón conocido enviado por el mismo transmisor. El receptor ya conoce qué esperar en la señal piloto, así puede ajustar sus propios parámetros internos usando el piloto como referencia.

En los sistemas que usan pilotos, la señal es demodulada en el receptor por una comparación de las dos formas de onda, la señal piloto y la señal modulada en un tiempo t .

En la modulación no coherente se usa una sola señal y el demodulador en el receptor nota el cambio de la señal sobre el tiempo.

Una de las modulaciones digitales más simple es un esquema coherente llamado BPSK, *binary phase-shift keying*. La regla es bastante simple: se transmite una sola frecuencia y a un determinado intervalo de tiempo, se transmite la onda en la misma fase que el piloto para el bit 0, en la fase contraria para el bit 1 como lo muestra la figura 19. Cada uno de estos períodos de tiempo predeterminado es llamado un símbolo.

Figura 19. **BPSK**

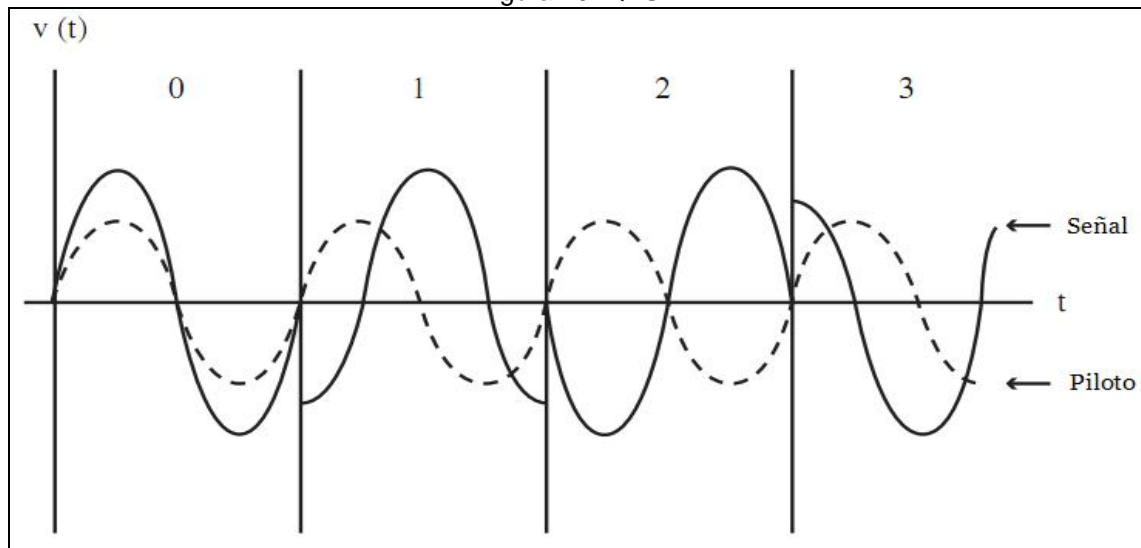


Fuente: www.digitalengineeringlibrary.com. **CDMA CAPACITY AND QUALITY OPTIMIZATION.**
Pág 20

El próximo nivel de sofisticación digital es llamado QPSK. La regla no es tan simple, se transmite una sola frecuencia el mismo que para BPSK, se compara la fase del piloto a determinado intervalo de tiempo lo mismo que para BPSK, pero QPSK permite cuatro relaciones de fases en lugar de 2. Los cuatro cambios de fase son 0, 90, 180, o 270 grados para 0, 1, 2, o 3 como se muestra en la figura 20.

Usando QPSK se pueden enviar 2 bits por símbolo en lugar de solo uno. Se usa otro tipo de gráfica llamado una constelación para describir el esquema de modulación digital como lo muestra la figura 22. Estas gráficas radiales describen la amplitud como la distancia del centro de la gráfica y describen los grados de la fase.

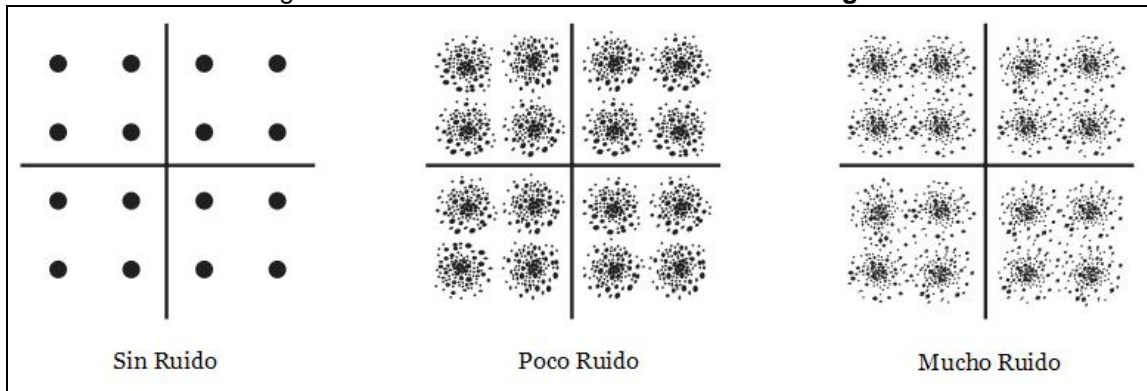
Figura 20. QPSK



Fuente: www.digitalengineeringlibrary.com. **CDMA CAPACITY AND QUALITY OPTIMIZATION.**
Pág 20

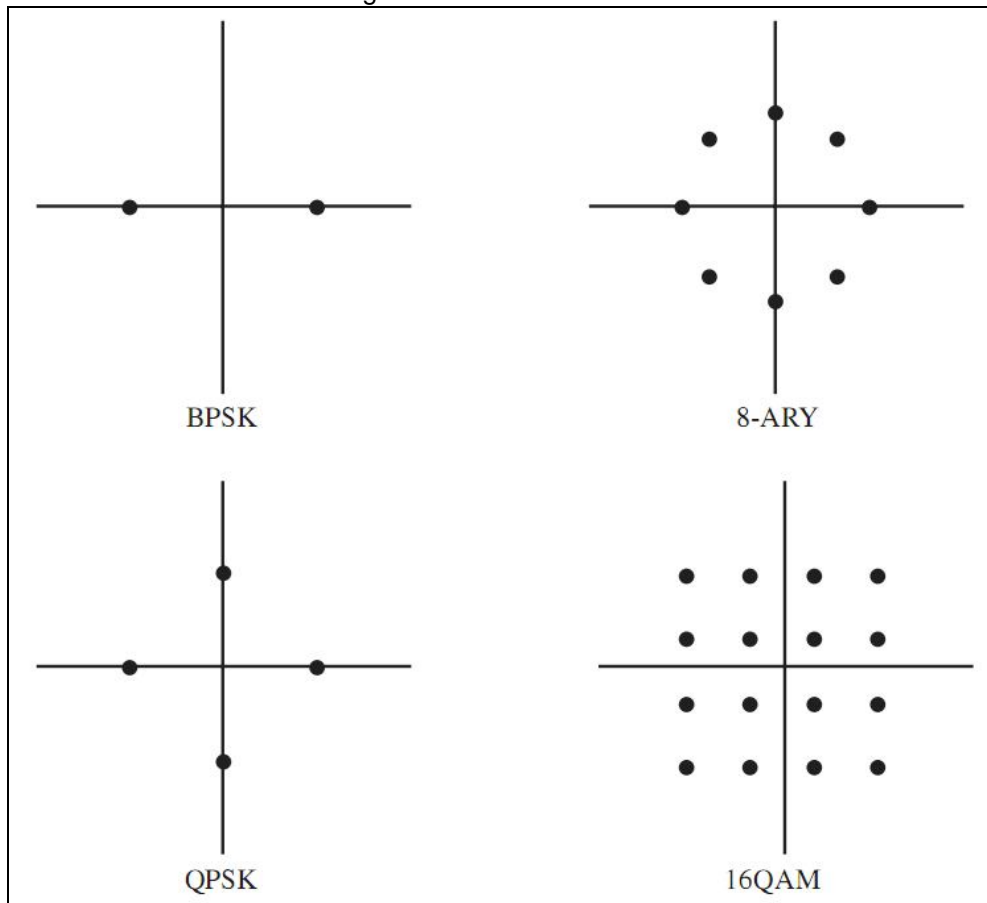
Hay otros esquemas más complejos para poder enviar mayor cantidad de bits estos están representados en la figura 22. El efecto del ruido se observa porque los puntos de la constelación se mueven y, a medida que se produce más ruido, los puntos se mueven más, el ruido puede provenir de cualquier fuente que no sea la propia señal que se quiere transmitir, en la figura 21 se muestran estos efectos.

Figura 21. Efecto del ruido en la modulación digital



Fuente: www.digitalengineeringlibrary.com. **CDMA CAPACITY AND QUALITY OPTIMIZATION.**
Pág 22

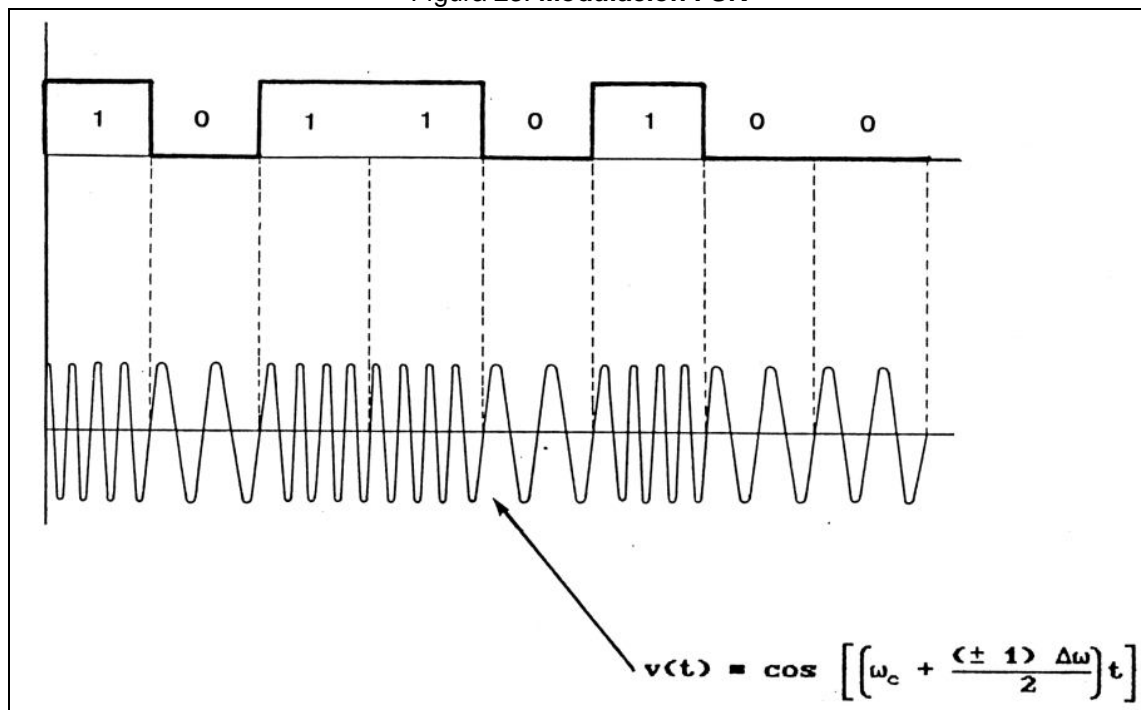
Figura 22. Constelaciones



Fuente: www.digitalengineeringlibrary.com. **CDMA CAPACITY AND QUALITY OPTIMIZATION.**
Pág 21

La modulación en frecuencia de una portadora por una señal digital se denomina modulación por desplazamiento de frecuencia FSK. La modulación FSK, en general, proporciona mayores tasas de error de bitio que las modulaciones PSK. Por esta razón, no se emplea en sistemas digitales de altos regímenes binarios y alta densidad de información. El uso más extendido de la FSK es en bajas velocidades, para modems de transmisión de datos, sobre canales analógicos de anchura de banda vocal.

Figura 23. Modulación FSK

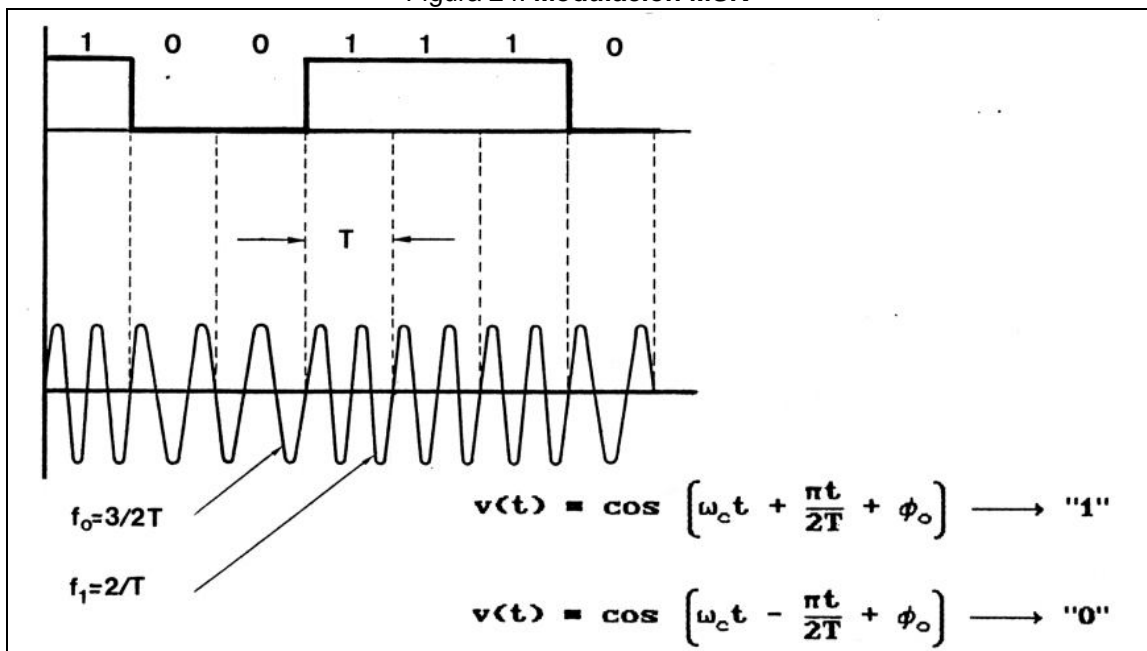


Fuente: http://webpages.ull.es/users/amanza/SCT/S18_Teoria.pdf.

La MSK es, básicamente, una FSK binaria en la que las dos frecuencias escogidas para representar el 1 y 0 lógicos se diferencian exactamente en 180 grados de fase. Esto proporciona una máxima diferencia de fase para una mínima diferencia en frecuencia, facilitando el trabajo del detector de fase del receptor.

La modulación MSK no produce saltos de fase en los puntos de cambio de frecuencia, por lo que pertenece al grupo de técnicas de modulación denominada CPFSK. En la figura 24 se puede ver, esquemáticamente, la modulación MSK. En ella, los ciclos que representan los 1 y los que representan los 0 se diferencian en 180 grados.

Figura 24. Modulación MSK



Fuente: http://webpages.ull.es/users/amanza/SCT/S18_Teoria.pdf.

3.2.1. GMSK

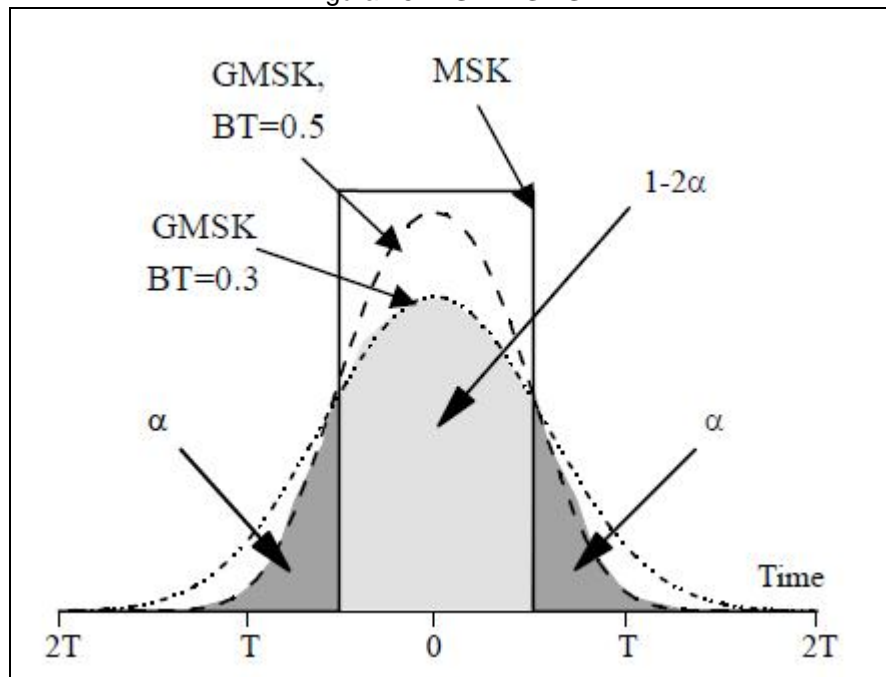
GMSK, *Gaussian Minimum Shift Keying*: es un esquema de modulación en el cual la fase del portador es instantáneamente variado por la señal moduladora o información a transmitir. GMSK difiere de MSK en que un filtro Gaussiano de un apropiado ancho de banda (B) se usa antes de la etapa moduladora.

GMSK es un esquema de modulación binaria simple que se puede ver como derivado de MSK. En GMSK, los lóbulos laterales del espectro de una señal MSK se reducen pasando los datos modulantes a través de un filtro Gaussiano de premodulación. El filtro gaussiano aplanar la trayectoria de fase de la señal MSK y por lo tanto, estabiliza las variaciones de la frecuencia instantánea a través del tiempo. Esto tiene el efecto de reducir, considerablemente, los niveles de los lóbulos laterales en el espectro transmitido.

El filtrado convierte cada dato modulante que ocupa en banda base un período de tiempo T , en una respuesta donde cada símbolo ocupa varios períodos. Sin embargo, dado que esta conformación de pulsos no cambia el modelo de la trayectoria de la fase, GMSK se puede detectar coherentemente como una señal MSK, o no como una señal simple FSK. En la práctica, GMSK es muy atractiva por su excelente eficiencia de potencia y espectral.

El filtro GMSK se puede definir completamente por B , *Ancho de banda* y por la duración de un símbolo en banda base T o equivalentemente por su producto BT . El filtro de premodulación introduce interferencia intersimbólica ISI (*"Inter-Symbol Interference"*, α) en la señal transmitida, pero esta degradación no es grave si el parámetro BT del filtro es mayor de 0.5.

Figura 25. MSK Y GMSK



Fuente: Dr Mike Fitton. *Principles of Digital Modulation. Toshiba Research Europe Limited.*
Pág. 13

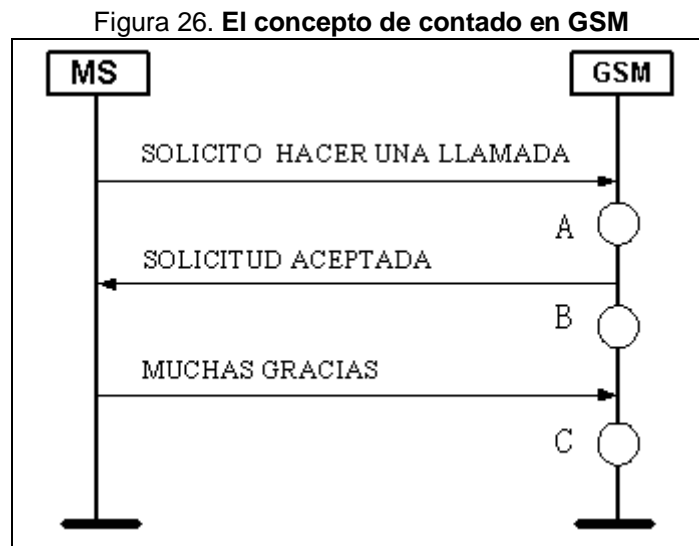
4. INDICADORES DE RED (KPI)

En toda red celular es necesario medir o ver la eficiencia de cada proceso que ocurre en las etapas que conllevan realizar una llamada, por ejemplo del abonado A al abonado B, es decir, medir el número de llamadas exitosas, de llamadas que no se pudieron realizar, de móviles que respondieron al primer *paging*, etc. Existe toda una variedad de procesos que se pueden medir y la forma de cómo se pueden medir es por medio de los KPI.

4.1. El concepto de contador

El contador es una variable que se incrementa o decrementa, según sea el caso, cuando se produce un evento, por ejemplo: cuando un abonado hace una llamada hay una gran cantidad de variables que se incrementan en cada etapa de la llamada, por ejemplo: cuando el abonado presiona la tecla “SEND” hay una variable que se incrementa, cada vez que un abonado intenta realizar una llamada, como en el ejemplo de la figura 26, cuando el móvil solicita hacer una llamada hay un contador A que se incrementa, luego, cuando la red le responde al móvil hay otro contador B que se incrementa después de que la red le da la respuesta al móvil y, finalmente, cuando la red recibe el agradecimiento del móvil hay otro contador C que se incrementa después de recibir el agradecimiento, en resumen esos son los contadores.

El dibujo sólo es para propósitos ilustrativos para comprender lo que es un contador, ya que el proceso de una llamada es más complejo, pero los contadores se incrementa de la forma como se explica en este párrafo, en general, hay una gran cantidad de contadores con nombres específicos, pero todas las marcas de equipo se basan en el estándar de GSM y, por lo tanto, todos los proveedores de equipo deben proporcionar los contadores especificados en el estándar de GSM.



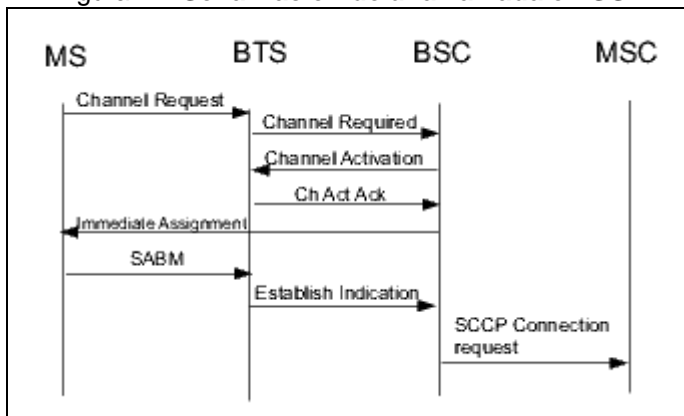
Hay muchos contadores de todos los tipos, contadores de llamadas caídas, de congestión de red, de mala calidad de voz, de paging, etc, los cuales sirven para definir los KPI y, así, medir la percepción que tiene el usuario con respecto a la red GSM, los ingenieros de radio frecuencia trabajan mucho con los contadores ya que por ejemplo si una radiobase tiene muchas llamadas caídas, por medio de los contadores se puede determinar en qué etapa de la llamada se cae la comunicación y ,así, atacar el problema y darle la solución.

4.1.1. Interpretación de los contadores

Los contadores no tienen unidades son sólo valores numéricos que pueden ser enteros o con valores decimales, algunos proveedores pueden proveer los contadores puros con valores enteros, otros proveen el valor ya procesado, es decir, puede ser la división, multiplicación, suma o resta de los contadores.

Para interpretar un contador, primero se tiene que saber cuál es la etapa del proceso que se quiere investigar, por ejemplo en la figura 27 se muestran las etapas que conlleva el proceso de una llamada y dependiendo de cual es la etapa que se quiere investigar se busca los contadores correspondiente a la etapa del proceso. Esto es un trabajo muy laborioso, ya que, se tiene que investigar la documentación respectiva del proveedor del equipo, pero con la documentación adecuada y el trabajo de investigación se logran obtener todos los contadores correspondientes a la etapa del proceso en estudio. En la documentación están todos los contadores y su respectiva interpretación, la forma de trabajo es la misma independiente de la tecnología, ya sea: TDMA, GSM, WCDMA, LTE, ya que, cada vez que se implementan una nueva tecnología, generalmente, los ingenieros lo desconocen, por lo que se tiene que investigar. En resumen, en este campo de las telecomunicaciones, en general en cualquier profesión, constantemente, se tiene que investigar y obtener nuevos conocimientos.

Figura 27. Señalización de una llamada en GSM



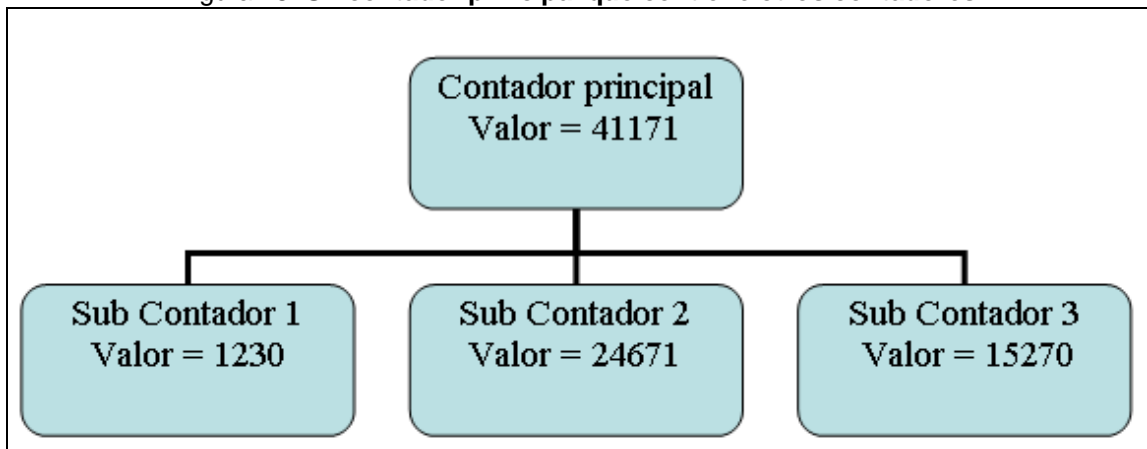
Fuente: ERICSSON. Documentación CPI para BSS R12

4.1.2. Como se trabajan con los contadores

Los contadores son una herramienta muy útil para diagnosticar y solucionar los problemas en una red celular, los ingenieros que se especializan en optimizar una red celular trabajan diariamente con los contadores, los obtienen del sistema, los tabulan, analizan y toman acciones. Como se mencionó anteriormente, hay una gran cantidad de contadores, existen principales y secundarios; los contadores principales se dividen en los secundarios, o sea un grupo de secundarios forman un contador principal.

Por ejemplo: se determinó que existen muchas desconexiones de las llamadas en una radiobase, entonces, se obtienen los contadores de llamadas desconectadas que es un contador principal, pero este contador está subdividido en varios otros contadores, por lo que se tiene que revisar esos sub contadores, tabularlos para saber cual de esos sub contadores contribuye más al contador principal de llamadas desconectadas, por este método se sabe cuál es la causa principal de las llamadas desconectadas y se hacen las correcciones necesarias en la radiobase y con eso se soluciona el problema. En la figura 28, por ejemplo: se ve que el contador que más contribuye al contador principal es el sub contador 2, por lo que se tiene que investigar qué significa el contador 2, esto se logra revisando la documentación disponible, es decir, manuales e información del fabricante.

Figura 28. Un contador principal que contiene otros contadores



4.2. Principales KPI utilizados para medir una red celular

Las fórmulas son una función matemática que se diseñan en el caso de una red celular para que proporcionen una indicación o visualización del comportamiento de todos los procesos que se producen en la red celular. Hay fórmulas estándar de GSM que se utilizan, pero cada equipo de optimización de la red celular define sus propias fórmulas de acuerdo con su propio criterio y necesidad. El resultado del valor de la fórmula es lo que se llama KPI, *Key performance indicator*.

4.2.1. Accesibilidad

La accesibilidad es un KPI que indica el porcentaje de éxito que tuvo el usuario cuando quiso realizar una llamada, este valor va de 0% a 100%; un valor de 0% indica que de todos los intentos que hizo el usuario, ninguna se pudo realizar; una accesibilidad del 100% indica que de todos los intentos que hizo el usuario todos fueron exitosos. El valor óptimo que se desea es 100%, pero en la mayoría de operaciones un valor de más del 99% es muy bueno. Hay ocasiones en que este valor es muy bajo por ejemplo del 60% lo cual es inaceptable, por lo que se tiene que trabajar para subir este valor. Existen varias causas por las cuales fallan los intentos de acceder a una red GSM, entre las cuales están: canales de voz no disponibles en la BTS, canal de control muy saturado por muchos usuario, saturación de llamadas en el MSC, canales de control interferidos etc. En fin si se tiene este problema lo primero que se tiene que hacer es revisar todos los contadores de accesibilidad como se mostró anteriormente.

4.2.1.1. Accesibilidad en TCH

Para propósitos de un ingeniero de RF el estudio de la accesibilidad se puede definir en accesibilidad de TCH y SDCCH. La accesibilidad en TCH indica la capacidad de canales de voz disponibles en la BTS y si se tiene un valor bajo de este KPI, se puede solucionar aumentando la cantidad de radios en la propia BTS o haciendo un trabajo de optimización de coberturas, modificando las inclinaciones y acimuts de las antenas de las BTS que rodean al sitio problemático. En resumen, este KPI muestra que de todos los intentos que se realizaron en la BTS para hacer una llamada, cuántos fueron exitosos al asignarles un canal de voz en la BTS.

$$\% \text{ Accesibilidad en TCH} = \frac{\text{Número de asignaciones en TCH completas}}{\text{Número de intentos de asignación de TCH}} \quad (\text{Ecuación 44})$$

4.2.1.2. Accesibilidad en SDCCH

La otra accesibilidad muy importante es en SDCCH que indica que de todos los intentos de llamadas en la BTS, cuántos fueron rechazados porque no lograron tomar un canal SDCCH. Existen varias causas por la cual la accesibilidad de este KPI podría ser bajo, uno de ellos es que la cantidad de canales SDCCH no sean los suficientes y se tiene entonces que incrementar estos canales, se pueden incrementar en grupos de 8. EL canal SDCCH es el que se encarga de asignar los canales TCH en un sector de la BTS. Entonces, al realizar una llamada primero se le asigna al móvil un canal SDCCH y el canal SDCCH le asigna al móvil un canal TCH.

La cantidad de canales SDCCH en un sector de una BTS depende de la cantidad de usuario que los requieran, hay que hacer un equilibrio entre la cantidad de canales SDCCH y TCH ya que por cada grupo de 8 canales SDCCH se tiene que eliminar un canal TCH (un *timeslot*). La cantidad promedio de canales SDCCH que un sector requiere es de 2 grupos de 8 SDCCH.

$$\% \text{ Accesibilidad en SDCCH} = \frac{\text{Numero de asignaciones exitosas en un canal SDCCH}}{\text{Numero de intentos de llamadas}} \quad (\text{Ecuación 45})$$

4.3. Llamadas caídas

Otro de los KPI muy importante y básico es el de las llamadas caídas, la cual es producida cuando se produce una desconexión de una llamada sin la intervención del usuario. Este KPI mide la eficiencia de la BTS en mantener el canal TCH hasta que el usuario decida terminar el uso del canal. El trabajo del ingeniero de RF es disminuir este KPI, ya que, el valor óptimo es 0% y el peor valor es 100%. Un valor de 100% indica que todos los usuarios que lograron tomar un canal TCH, los mismos se desconectaron antes que el usuario decidiera por él mismo terminar el uso del canal. Un valor de 0% indica que todos los usuario que lograron tomar un canal TCH, la conexión fue terminada hasta que los usuarios quisieron hacerlo.

$$\% \text{ Llamadas caídas} = \frac{\text{Número de llamadas caídas}}{\text{Número de llamadas asignadas en TCH}} \quad (\text{Ecuación 45})$$

4.3.1. Clasificación del tipo de llamadas caídas

Existen varias causas por la cual se pueden producir llamadas caídas entre las cuales se tienen:

Traslape de los tiempos de los *timeslots*: este se produce debido a que como se mencionó, GSM utiliza transmisión TDMA, por lo tanto la información de cada usuario se multiplexa en el tiempo y cuando el móvil del usuario está muy lejos hay retardos que hacen que la información llegue desfasada con respecto al tiempo que le correspondía y llegue en otro momento que le correspondía a otro usuario y, por lo tanto, esa información ya no es coherente y se produce una desconexión del móvil. El rango máximo de una BTS GSM es de 35 km por traslape de los *timeslots*, pero existen procedimientos especiales que hacen que se extienda la cobertura hasta 120 km sin traslape de los *timeslots*.

Bajo nivel de señal: este se produce cuando un móvil está muy lejos, menos de 35 km o 120 km y la señal del móvil llega muy débil hasta la BTS o la señal de la BTS llega muy débil hasta el móvil. Generalmente, es la señal del móvil que llega muy débil hasta la BTS debido a que la MS transmite con baja potencia, mientras que la BTS transmite con mayor potencia.

Mala calidad de señal: esto es debido a que la señal llega con niveles aceptables, pero interferida, esto se puede deber a problemas del plan de frecuencias, donde se utilizan los mismos canales en BTS muy cercanas o por interferencia externa. Actualmente, los bancos y presidios utilizan bloqueadores de señal con los cuales producen una señal con la misma frecuencia que utilizan las BTS.

Caída repentina: esto se produce cuando se tiene buena señal, no hay traslape en los *timeslots*, no hay interferencia pero de repente la llamada se desconecta sin que el usuario lo hiciera. Este, generalmente, es problema de *hardware* en la BTS, o problemas en la transmisión de la información de la BTS hasta el BSC o MSC.

5. INTERFERENCIA

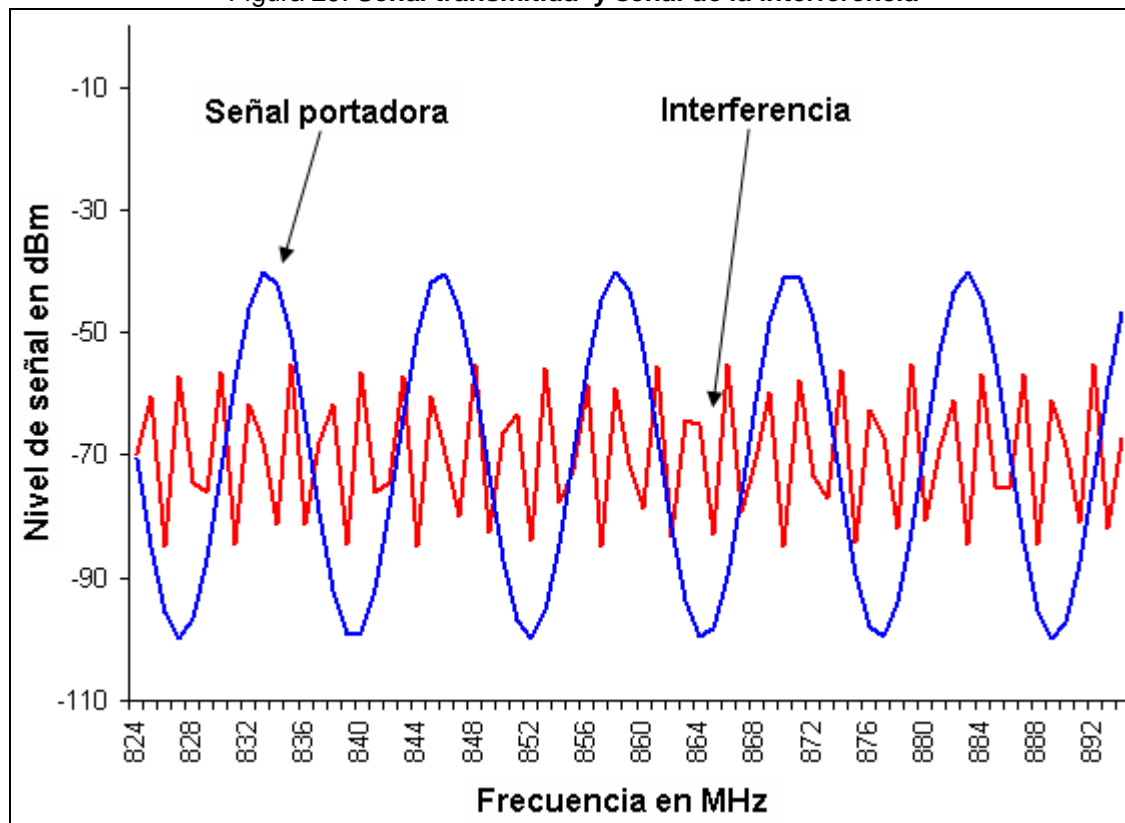
La interferencia electromagnética es una señal muy perjudicial para cualquier sistema que utiliza las ondas electromagnéticas como medio de comunicación, ya sea AMPS, TDMA, GSM, WCDMA, LTE especialmente los últimos dos (WCDMA, LTE), ya que, para proporcionar los servicios de alta velocidad de datos (Internet) necesitan tener un espectro muy limpio de interferencias, porque, a medida que se tiene más interferencia se necesitan más bits de corrección de datos y por lo tanto, la tasa de transmisión disminuye.

5.1. Qué es la interferencia

La interferencia es una señal no deseada que se presenta en el mismo rango de frecuencia en el cual se transmite una señal deseada, como se muestra en la figura 29, donde se observa una señal que se quiere transmitir en el rango de 824 Mhz a 894 Mhz, pero en ese mismo rango de frecuencia existe una señal que interfiere la señal portadora. La relación entre la amplitud de la señal portadora y la señal interferente se llama relación de portadora a interferencia C/I, *Carrier to interference*. Existen varias causas de fuente de interferencia, por ejemplo, cuando se utiliza un equipo bloqueador de señal, esto produce una señal con la misma frecuencia, en donde trabajan las empresas celulares.

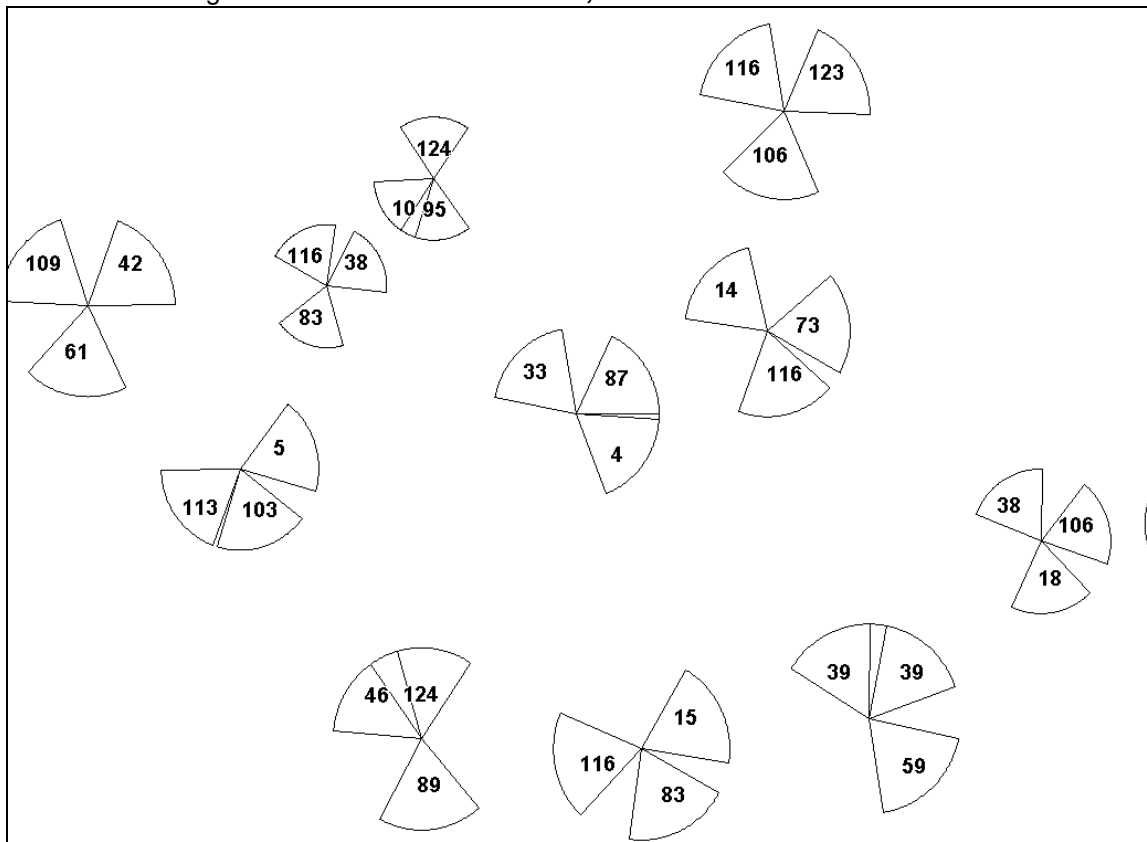
Este capítulo se refiere al estudio de las interferencias producidas por el reuso de frecuencias dentro de la red celular GSM. Los canales de transmisión de un sistema GSM son de 200 KHz y, por ejemplo, si se tuviera todo el espectro disponible por ejemplo el de 900 Mhz banda P, se tendrían 124 canales de 200 KHz cada uno, pero como se necesitan distribuirlos en todas las radiobases de una red GSM, entonces, se necesita realizar el reuso de los canales, como se muestra en la figura 30.

Figura 29. Señal transmitida y señal de la interferencia



En la figura 30 se observa que el canal 116 se reusa varias veces y esto es debido a que en una BTS, no solo se asigna un canal sino varios que pueden ser hasta 8 por sector o más, ya que, se necesita asignarle al canal de control y a los canales de voz. Es por esto que se produce interferencia en una red GSM al reusar las frecuencias.

Figura 30. Reuso de frecuencias, canal 116 tres veces reusado



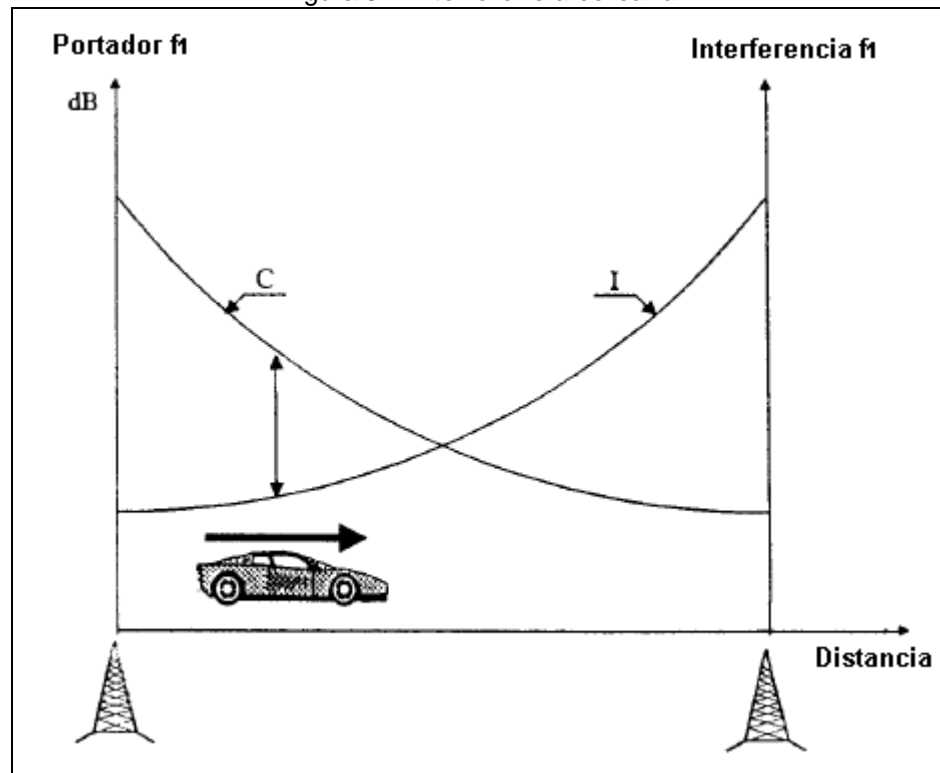
Fuente: **Gráfica de MapInfo con celdas no reales**

5.2. Cuáles son las causas de la interferencia

Como se explicó anteriormente, las causas de la interferencia para este estudio son el reuso de frecuencias en la red GSM y en un mal reuso o mala planificación se pueden asignar frecuencias muy cercanas unas de otras y la relación C/I puede ser muy baja. Por lo tanto, en los casos de una red GSM, las causas principales de interferencia son el mal reuso de los canales, o posiblemente planes de frecuencias muy ajustados, es decir, se tiene poco espectro y, por lo tanto, pocos canales y el ingeniero tiene que hacer un buen trabajo para tratar de evitar, en lo posible los reusos muy cercanos. Existen dos tipos básicos de interferencias cuando se hacen reusos de canales los cuales son: interferencia co-canal e interferencia adyacente.

Interferencia co-canal: la interferencia co-canal se produce cuando, exactamente, en un punto de la cobertura de señal de una red GSM llegan dos canales, con la misma frecuencia o sea que existen dos sectores diferentes que tienen los mismos canales, esta interferencia es muy dañina porque ambas señales se interfieren mutuamente. Para que la interferencia co-canal no sea muy dañina se recomienda que la relación C/I de ambas señales sea mayor de 12 dB. Cuando existe interferencia co-canal el problema se observa más en los bordes de cobertura de la celda, ya que, en esa región los niveles de señal son ya muy bajos, por lo que la relación C/I es menos que 12 dB, también, este tipo de interferencia afecta el proceso de *handover* porque los *handovers* se ejecutan en los bordes de cobertura de las celdas y al haber mucha interferencia, el proceso de este puede ser interrumpido y producirse una llamada caída. Para solucionar este tipo de problema se tiene que realizar una resintonización de uno de los sectores o ambos para que no tengan la misma frecuencia.

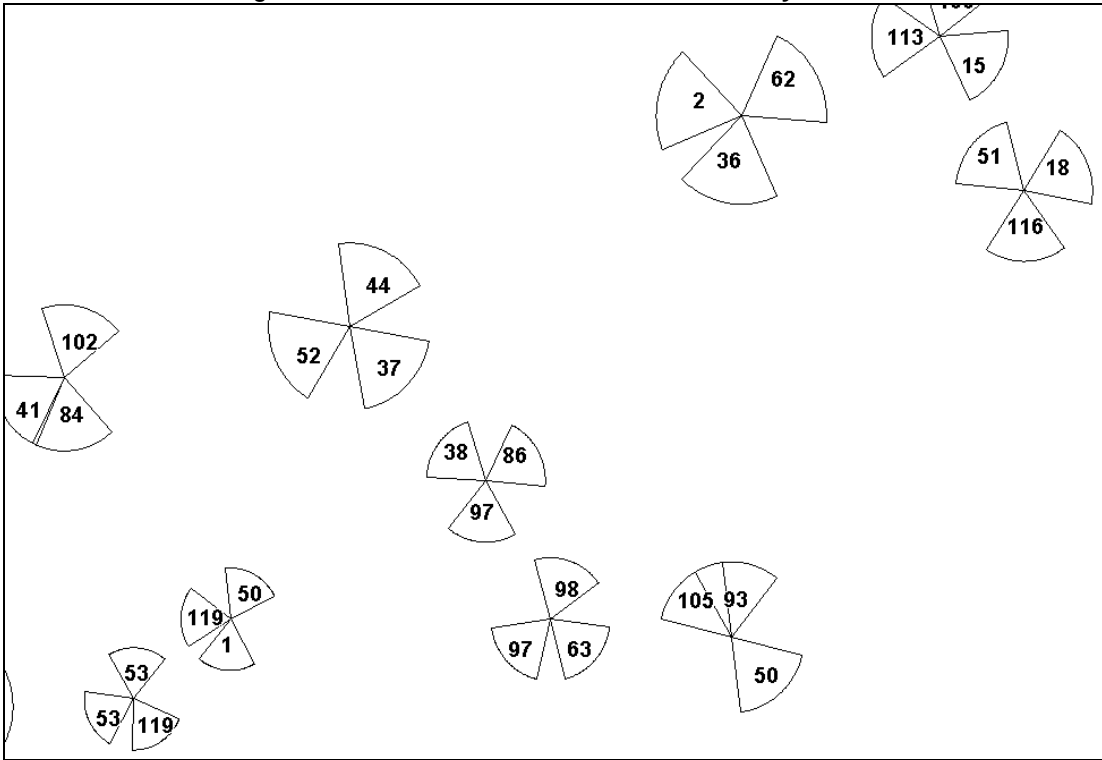
Figura 31. Interferencia co-canal



Fuente: ERICSSON. *GSM SYSTEM SURVEY*. Pág. 217

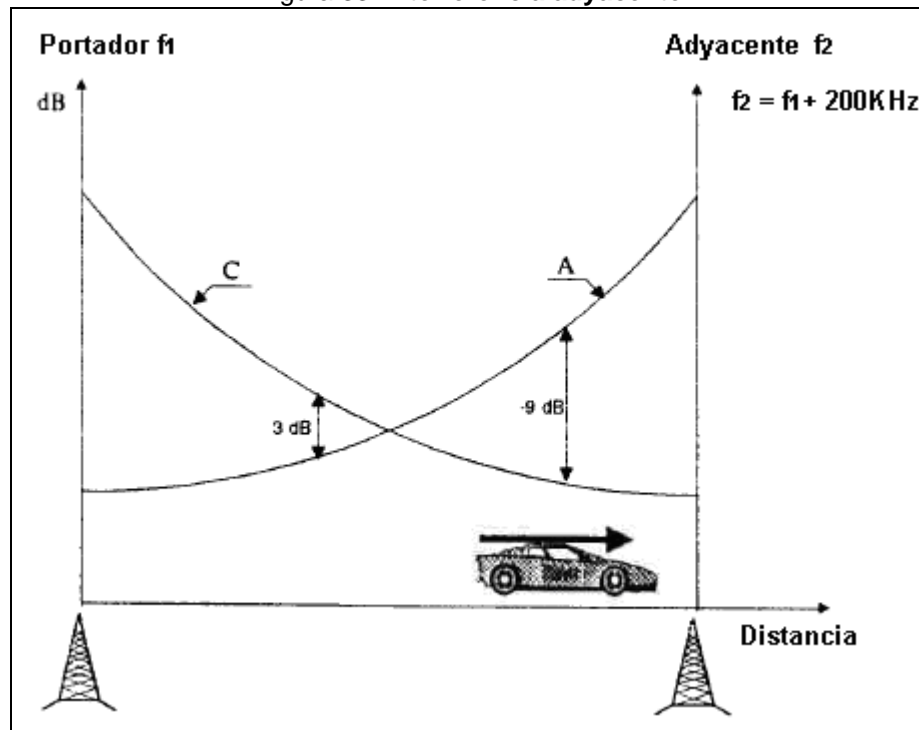
Interferencia adyacente: esta interferencia se produce cuando se utilizan frecuencias adyacentes muy cercanas, por ejemplo, en la figura 32 se puede observar que la frecuencia 37 y 38 son adyacentes; por lo que se pueden interferir mutuamente; este tipo de interferencia se debe evitar para celdas que tienen antenas con acimuts apuntándose mutuamente, puesto que afecta el proceso de *handover*. La relación C/A, *Carrier to adjacent*, debe ser mayor a 3 dB en un plan de frecuencias.

Figura 32. Plan de frecuencias con reuso adyacente



Fuente: Gráfica de MapInfo con celdas no reales

Figura 33. Interferencia adyacente

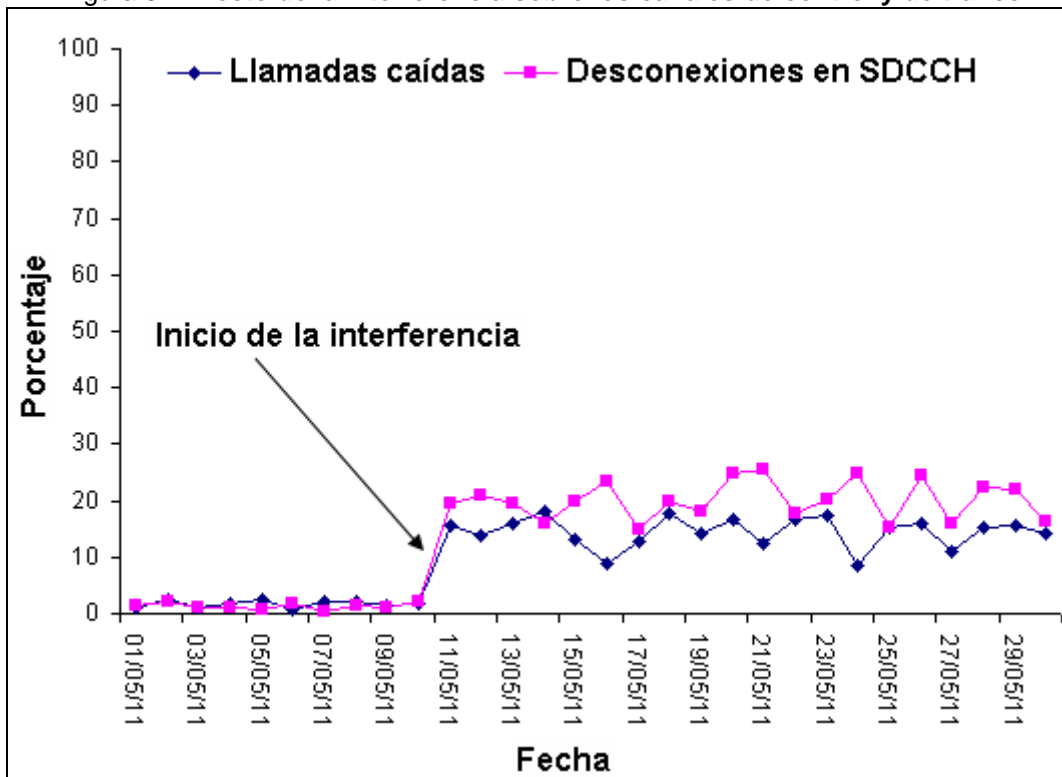


Fuente: ERICSSON. *GSM SYSTEM SURVEY*. Pág. 218

5.3. Cómo afecta la interferencia a los diferentes canales de GSM

En GSM se utilizan dos tipos de canales, lógicos y físicos. Los canales físicos son los que llevan la información de de los lógicos, por lo tanto, un canal físico son los *timeslots* que llevan la información o mensajes. Hay varios canales lógicos de control que van en los canales físicos y, por consiguiente si un canal físico esta interferido, la información que llevan esos canales no se transmite adecuadamente y se pueden producir problemas de accesibilidad y especialmente se observan muchas caídas en las señalización del canal SDCCH. También, los canales de tráfico TCH presentan muchos problemas, pues en este canal lo que se observa, principalmente, son llamadas caídas.

Figura 34. Efecto de la interferencia sobre los canales de control y de tráfico



6. DISEÑO DE PLANES DE FRECUENCIAS PARA GSM

6.1. Espectro disponible

Lo primero o lo básico que se debe saber, al hacer un plan de frecuencias es la cantidad de espectro que se tiene, es decir, el número de canales con los que se dispone, comúnmente se le llama canal a un ARFCN, *Absolute Radio Frequency Channel Number*. Este canal tiene un ancho de banda de 200 KHz en subida y bajada, es decir, tiene 200 KHz para transmitir del móvil a la BTS y, simultáneamente, tiene 200 KHz para transmitir de la BTS al móvil como se observa en la figura 35. En la tabla III se presentan las bandas de frecuencias y el rango de de ARFCN que se tiene en cada banda, en esta tabla se muestran todos los canales disponibles, pero, en cada país, la cantidad de canales que un operador puede tener depende de la disponibilidad que existe en ese país, pues pueden existir más de un operador GSM en dicho país. Por ejemplo, en Guatemala existen varios operadores de telefonía celular y cada operador tiene que pagarle al gobierno por el uso del espectro, sin el cual el operador no podría funcionar.

Las terminologías que un ingeniero utiliza son, generalmente, palabras que se utilizan en inglés, de tal forma que para las frecuencias de subida se denomina *uplink* (*del móvil a la BTS*) y la frecuencia de bajada se le denomina *downlink* (*de la BTS hacia al móvil*) como se muestra en la tabla III y como se mencionó que cada ARFCN en GSM ocupa 200 KHz del espectro.

Por ejemplo, el ARFCN 1 en la banda primaria de 900 MHz, tiene una frecuencia central en el *downlink* de 935.2 MHz y su respectiva frecuencia central en *uplink* es 890.2 MHz.

Tabla III. Bandas de frecuencias para GSM

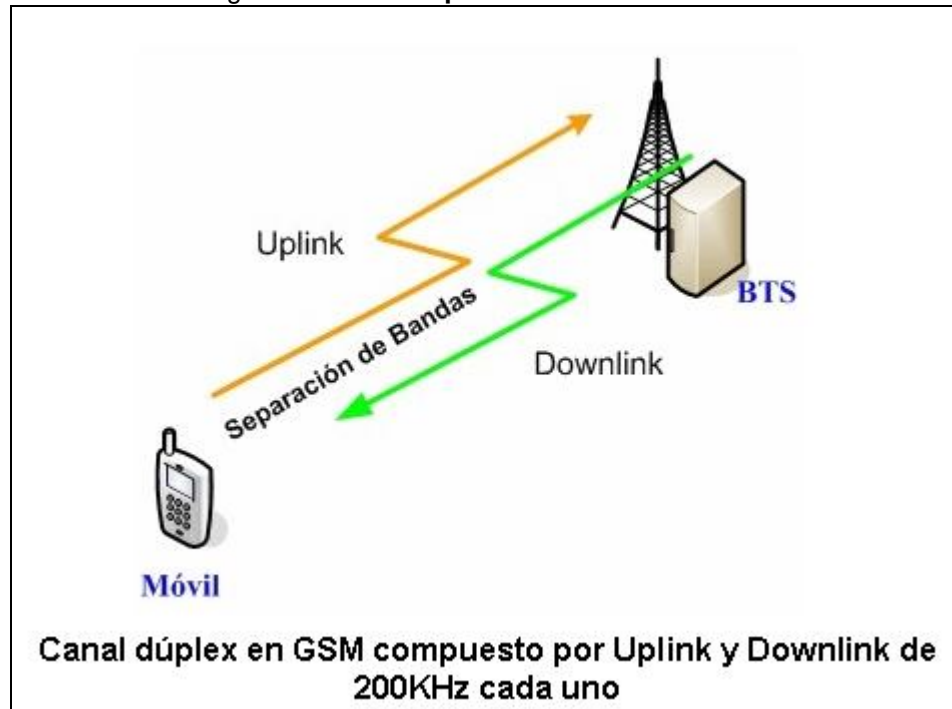
BANDA	Frecuencia en Uplink (MHz)	Frecuencia en Downlink (MHz)	ARFCNs
GSM450	450.4 - 457.6	460.4 - 467.6	259 - 293
GSM480	478.8 - 486	488.8 - 496	306 - 340
GSM750	747 - 762	777 - 792	438 - 511
GSM850	824 - 849	869 - 894	128 - 251
TGSM810	806 - 821	851 - 866	350 - 425
PGSM 900 (Primary GSM)	890 - 915	935 - 960	1 - 124
EGSM 900 (Extended GSM)	880 - 915	925 - 960	0 - 124
EGSM 900 (Extended GSM)	880 - 915	925 - 960	975 - 1023
RGSM 900 (Railways GSM)	876 - 915	921 - 960	0 - 124
RGSM 900 (Railways GSM)	876 - 915	921 - 960	955 - 1023
GSM 1800	1710 - 1785	1805 - 1880	512 - 885
GSM 1900	1850 - 1910	1930 - 1990	512 - 810

Fuente: http://wireless.agilent.com/rfcomms/refdocs/gsmgprs/gen_bse_cell_band.php#BABCEHAJ

6.1.1. Cómo se dividen los canales GSM dentro del espectro

Como se mencionó, cada canal está compuesto por una frecuencia de subida y bajada, por ejemplo, en GSM 900 banda primaria se tienen en total 124 ARFCN, esto quiere decir que se tiene 24.8 MHz de espectro disponible, pero como se sabe que cada canal de 200 KHz tiene su contraparte, también de 200 KHz, entonces, se tiene 24.8 MHz, en el *uplink* y otros 24.8 MHz en el *downlink* y esto está distribuido en el espectro radio eléctrico como lo muestra la tabla III; en total se tienen 25 MHz pero el resto se utiliza como banda de guarda para evitar que las frecuencias adyacentes que se pueden utilizar para otras tecnologías no interfieran con los canales de GSM.

Figura 35. Canal dúplex de 200 KHz cada uno



Fuente: <http://knol.google.com/k/juan-pablo-m%C3%A9ndez/la-interfaz-um-en-gsm/3l3q7cxno42cy/10#>

La intensidad o fuerza de propagación de la onda electromagnética sufre pérdidas en su trayectoria, en el espacio libre sin tomar en cuenta otras pérdidas se puede utilizar la ecuación 46, la cual se deriva del algoritmo llamado Okumura-Hata.

$$L_P = A - 13.82 \times \text{Log}(h_b) + (44.9 - 6.55 \times \text{Log}(h_b)) \times \text{Log}(d) - a(h_m) \text{ [dB]}$$

(Ecuación 46)

Donde:

$$A = 46.3 + 33.9 \times \text{Log}(f). \quad \text{(Ecuación 47)}$$

$$a(h_m) = 3.2 \times (\text{Log}(11.75 \times h_m))^2 - 4.97. \quad \text{(Ecuación 48)}$$

f = frecuencia de la portadora.

h_b = Altura de las antenas de la BTS en metros.

d = Distancia en kilómetros de la BTS.

h_m = Altura del móvil sobre el suelo en metros (1-10mt).

Como se puede observar en esta simple ecuación las pérdidas están en función de la frecuencia de la portadora, es decir, mientras más alta es la frecuencia mayor es la pérdida y, por tal razón, es que la frecuencia de *uplink* (MS a la BTS) siempre está en la parte baja del espectro de la banda, pues la MS transmite con muy baja potencia, en comparación de la BTS que transmite con alta potencia.

En la figura 36 y 37 se muestran las distribuciones de algunos ARFCN (del 1 al 5) de la banda P 900, como se puede observar los canales van consecutivos y cada canal o ARFCN tiene su componente en *uplink* y *downlink* como lo muestran las figuras 36 y 37.

Figura 36. Distribución de ARFCN del 1 al 5 en la banda P 900

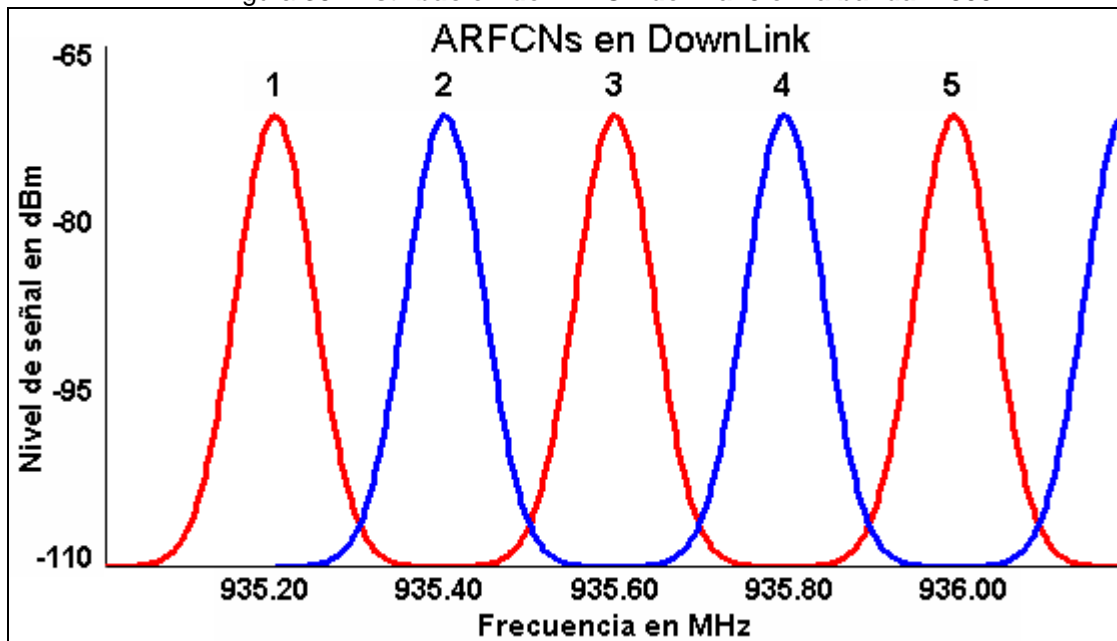
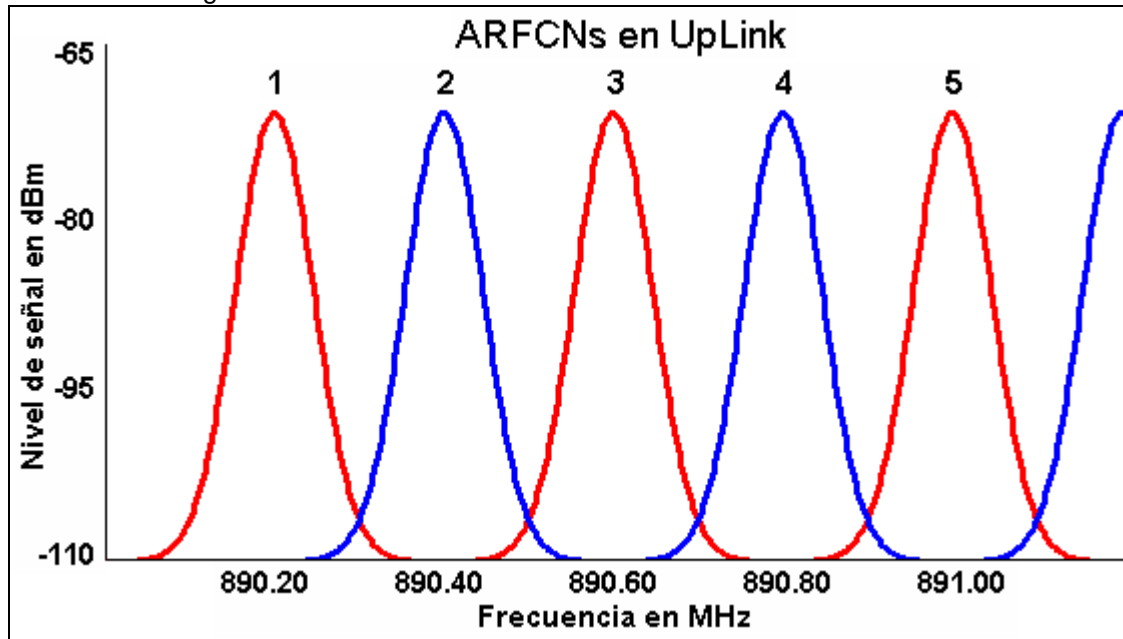


Figura 37. Distribución de ARFCN del 1 al 5 en la banda P 900



6.1.1.1. Cómo calcular la frecuencia y el canal

El cálculo del ARFCN y a las frecuencias que corresponden en *uplink* y *downlink* es algo muy importante, ya que, por ejemplo: si se tienen todos los ARFCN de la banda 1800 y se necesita liberar 5 Mhz en un determinado rango de frecuencia, lo único que se tiene que hacer es liberar o no usar los ARFCN que corresponden al rango de frecuencia que se quiere liberar y esto se puede hacer, si se conoce cuál es la frecuencia que corresponde a un ARFCN. En la tabla IV se muestran las fórmulas que se utilizan para calcular la frecuencia central de cada ARFCN en todas las bandas disponibles para GSM.

Tabla IV. Fórmulas que dan la frecuencia central en las bandas de GSM

BANDA	ARFCNs	Fórmula Uplink (UL) (MHz)	Fórmula Downlink (DL) (MHz)
GSM450	259 - 293	$FUL(n) = 450.6 + 0.2*(n-259)$	$FDL(n) = FUL(n)+10$
GSM480	306 - 340	$FUL(n) = 479 + 0.2*(n-306)$	$FDL(n) = FUL(n)+10$
GSM750	438 - 511	$FUL(n) = 747.2 + 0.2*(n-438)$	$FDL(n) = FUL(n)+30$
GSM850	128 - 251	$FUL(n) = 824.2 + 0.2*(n-128)$	$FDL(n) = FUL(n)+45$
TGSM810	350 - 425	$FUL(n) = 806 + .2*(n-350)$	$FDL(n) = FUL(n)+45$
PGSM 900 (Primary GSM)	1 - 124	$FUL(n) = 890 + 0.2*n$	$FDL(n) = FUL(n)+45$
EGSM 900 (Extended GSM)	0 - 124	$FUL(n) = 890 + 0.2*n$	$FDL(n) = FUL(n)+45$
EGSM 900 (Extended GSM)	975 - 1023	$FUL(n) = 890 + 0.2*(n-1024)$	$FDL(n) = FUL(n)+45$
RGSM 900 (Railways GSM)	0 - 124	$FUL(n) = 890 + 0.2*n$	$FDL(n) = FUL(n)+45$
RGSM 900 (Railways GSM)	955 - 1023	$FUL(n) = 890 + 0.2*(n-1024)$	$FDL(n) = FUL(n)+45$
GSM 1800	512 - 885	$FUL(n) = 1710.2 + 0.2*(n-512)$	$FDL(n) = FUL(n)+95$
GSM 1900	512 - 810	$FUL(n) = 1850.2 + 0.2*(n-512)$	$FDL(n) = FUL(n)+80$

Fuente: http://wireless.agilent.com/rfcomms/refdocs/gsmgprs/gen_bse_cell_band.php#BABCEHAJ

La frecuencia que proporcionan estas fórmulas es la frecuencia central del ARFCN, por lo tanto, si se quiere saber la parte baja de la frecuencia de un ARFCN se tiene que restar 100 KHz a la frecuencia central y si se quiere la parte alta de un ARFCN se tiene que sumar 100 KHz a la frecuencia central.

6.2. Concepto de canales en GSM

El entendimiento de los diferentes tipos de canales que están definidos en GSM es muy útil y es algo del cual se habla mucho en planes de frecuencias.

6.2.1. Canales lógicos

En GSM se definen dos tipos de canales lógicos y físicos, los lógicos, son los canales en los cuales se transmite determinada información, por ejemplo, el mensaje de *paging*, información de sincronización con la radiobase y otros y el canal físico es, por ejemplo: el *timeslot*, en el cual se transmite la información.

6.2.1.1. Canal lógico TCH

Los TCH llevan voz codificada digitalmente o datos y tienen funciones idénticas y formatos tanto para el *downlink* como para el *uplink*.

Los canales de tráfico en GSM pueden ser *full-rate* o *half-rate* y pueden llevar voz digitalizada o datos de usuario. Cuando se transmite a *full-rate*, los datos usan un *timeslot* por trama. Cuando se transmite en *half-rate*, los datos de usuario se transportan en el mismo *timeslot* de tiempo, pero se envían en tramas alternativas.

En el radio destinado para BCCH no puede ir un TCH en el *timeslot* 0, ya que, este *timeslot* está reservado para los canales de control en la mayoría de las tramas. Además, cada trece tramas TCH se envía un canal de control asociado lento (SACCH) o tramas "*idle*". El canal de tráfico TCH *full-rate* transporta información a una velocidad de 22.8 kbps. El canal de tráfico TCH *half-rate* transporta información a una velocidad de 11.4 kbps.

6.2.1.2. Canal de control lógico BCH

El BCH opera en el *downlink* de un ARFCN específico dentro de cada celda y transmite datos sólo en el primer *timeslot* (*timeslot* 0) de algunas tramas GSM. Al contrario que los TCH que son dúplex, los BCH sólo usan el *downlink*. El BCH sirve como un canal guía para cualquier móvil cercano que lo identifique y se enganche a él. El BCH proporciona sincronización para todos los móviles dentro de la celda y es monitoreado ocasionalmente por los móviles de celdas vecinas para recibir datos de potencia y poder realizar las decisiones de *handover*. Aunque los datos BCH se transmiten en *timeslot* 0, los otros siete *slots* de una trama GSM del mismo ARFCN están disponibles para datos TCH, DCCH ó están fijados por ráfagas vacías ("*dummy*").

Dentro de los canales BCH se definen tres tipos de canales separados que tienen acceso al *timeslot* 0 durante varias tramas de la multitrama de control formada por 51 tramas.

Canal de control de "*broadcast*" (BCCH): el BCCH es un canal *downlink* que se usa para enviar información de identificación de celda y de red, así como características operativas de la celda, *estructura actual de canales de control*, *disponibilidad de canales y congestión*.

El BCCH, también, envía una lista de ARFCN de las celdas vecinas para posibles *handovers*. Desde la trama 2 a la 5 de una multitrama de control están contenidos los datos BCCH.

Canal corrector de frecuencia (FCCH): el FCCH es una ráfaga de datos que ocupa el *timeslot* 0 para la primera trama dentro de la multitrama de control y que se repite cada diez tramas. El FCCH permite a cada estación móvil sincronizar su frecuencia interna de oscilación a la frecuencia exacta de la estación base.

Canal de sincronización (SCH): el SCH se envía en el *timeslot* 0 de la trama inmediatamente después del FCCH y se usa para identificar a la estación base servidora mientras que permite a cada móvil la sincronización de las tramas con la estación base. El número de trama (FN) que oscila entre 0 hasta 2715648 se envía con el código de identificación de la estación base (BSIC) durante la ráfaga SCH. El BSIC es asignado, individualmente, a cada BTS en un sistema GSM. Dado que un móvil puede estar hasta a 35 km de la BTS, es necesario, frecuentemente, ajustar la temporización de un usuario móvil particular de forma que la señal recibida en la estación base se sincroniza con el reloj de la estación base.

6.2.1.3. Canal lógico de control CCCH

En aquellos ARFCN reservados para BCH, los canales de control comunes ocupan el *timeslot* 0 de cada trama que no esté ocupada por los BCH o por tramas *idle*. Un CCCH puede estar formado por tres tipos diferentes de canales: el canal de búsqueda (PCH) *downlink*, el canal de acceso aleatorio (RACH) *uplink* y el canal de acceso concedido (AGCH) *downlink*.

Los CCCH son los más comunes dentro de los canales de control y se usan para buscar a los abonados, asignar canales de señalización a los usuarios y recibir contestaciones de los móviles para el servicio.

Canal de búsqueda (PCH): el PCH proporciona señales de búsqueda a todos los móviles de una celda y, avisa a los móviles si se ha producido alguna llamada. El PCH transmite el IMSI, *Identificación de abonado móvil internacional*, del abonado destino, junto con la petición de reconocimiento de la unidad móvil a través de un RACH. Alternativamente, el PCH se puede usar para proporcionar envíos de mensajes tipo ASCII en las celdas, como parte del servicio SMS de GSM.

Canal de acceso aleatorio (RACH): el RACH es un canal *uplink* usado por el móvil para confirmar una búsqueda procedente de un PCH y, también se usa para originar una llamada. El RACH usa un esquema de acceso slotted ALOHA. Todos los móviles deben pedir acceso o responder ante una petición por parte de un PCH dentro del *timeslot* 0 de una trama GSM. En la BTS, cada trama, *incluso la trama idle*, aceptará transmisiones RACH de los móviles durante *timeslot* 0. Para establecer el servicio, la estación base debe responder a la transmisión RACH dándole un canal de tráfico y asignando un canal de control dedicado (SDCCH) para la señalización durante la llamada. Esta conexión se confirma por la estación base a través de un AGCH.

Canal de acceso concedido (AGCH): el AGCH se usa por la estación base para proporcionar un enlace de comunicaciones con el móvil y, lleva datos que ordenan al móvil operar en un canal físico en particular, *en un determinado timeslot y en un ARFCN*, con un canal de control dedicado.

El ACCH es el último mensaje de control enviado por la estación base antes de que el abonado es eliminado del control del canal de control. El ACCH es usado por la estación base para responder a un RACH enviado por una MS en la trama CCCH previa.

6.2.1.4. Canal lógico de control DCCH

Hay tres tipos de canales de control dedicados en GSM. Los canales de tráfico son bidireccionales y tienen el mismo formato y función en el *uplink* y en el *downlink*. Como los TCH, los DCCH pueden existir en cualquier *timeslot* de cualquier ARFCN excepto en el *timeslot* 0 de los ARFCN de los BCH. Los canales de control dedicados (SDCCH) se usan para proporcionar servicios de señalización requeridos por los usuarios. Los canales de control asociados lentos y rápidos (SACCH y FACCH) se usan para supervisar las transmisiones de datos entre la estación móvil y la estación base durante una llamada.

Canales de control dedicados (SDCCH): el SDCCH lleva datos de señalización siguiendo la conexión del móvil con la estación base y, justo antes de la conexión, lo crea la estación base. El SDCCH se asegura que la MS y la estación base permanecen conectados mientras que la estación base y el MSC verifica la unidad de abonado y localiza los recursos para el móvil. El SDCCH se puede pensar como un canal intermedio y temporal que acepta una nueva llamada procedente de un BCH y mantiene el tráfico, mientras que está esperando que la estación base asigne un TCH. El SDCCH se usa para enviar mensajes de autenticación y de alerta, *pero no de voz*. A los SDCCH se les puede asignar su propio canal físico o pueden ocupar el *timeslot* 0 del BCH si la demanda de BCH o CCCH es baja.

Canal de control asociado lento (SACCH): el SACCH está siempre asociado a un canal de tráfico o a un SDCCH y se asigna dentro del mismo canal físico. Por lo tanto, cada ARFCN sistemáticamente lleva datos SACCH para todos sus usuarios actuales. El SACCH lleva información general entre la MS y la BTS. En el *downlink*, el SACCH se usa para enviar información lenta pero regular sobre los cambios de control al móvil, tales como: instrucciones sobre la potencia a transmitir e instrucciones específicas de temporización para cada usuario del ARFCN. En el *uplink*, lleva información acerca de la potencia de la señal recibida y de la calidad del TCH, así como las medidas BCH de las celdas vecinas. El SACCH se transmite durante la decimotercera trama y *la vigesimosexta si se usa half-rate*, de cada multitrama de control y dentro de esta trama, los 8 *slots* se usan para proporcionar datos SACCH a cada uno de los 8 usuarios (o 16) del ARFCN.

Canales de control asociados rápidos (FACCH): el FACCH lleva mensajes urgentes y contienen esencialmente el mismo tipo de información que los SDCCH. Un FACCH se asigna cuando un SDCCH no se ha dedicado para un usuario particular y hay un mensaje urgente, *como una respuesta de handover*. El FACCH gana tiempo de acceso a un *timeslot* "robando" tramas del canal de tráfico al que está asignado. Esto se hace activando dos bits especiales, llamados bits de robo ("*stealing bits*") de una ráfaga TCH. Si se activan los *stealing bits*, el slot sabe que contiene datos FACCH y no un canal de tráfico, para esa trama.

6.2.2. Canales físicos en GSM

Los canales físicos son los *timeslots* en donde se transmiten la información de todos los canales lógicos.

6.2.2.1. Trama TDMA

Los canales de 200 KHz, se dividen en *timeslots* de 0.577 ms de duración, con 8 *timeslots* se forma una trama TDMA de 4.6 ms de duración. Cada 26 o 51 tramas TDMA, se agrupan en multitramas de 120 o 235 ms, dependiendo de si el canal es para tráfico o control. De la misma manera, 51 o 26 multitramas constituyen 1 supertrama de 6.12 segundos. Por último, componiendo 2048 supertramas se forma 1 hipertrama de 3 horas, 28 minutos, 53 segundos y 760 ms de duración.

Una multitrama de 26 tramas (51 por supertrama) con una duración de 120 ms, comprimen 26 tramas TDMA. Esta multitrama se usa para transportar los canales lógicos TCH, SACCH y FACCH.

Una multitrama de 51 tramas (26 por supertrama) con una duración de 235.4 ms, comprimen 51 tramas TDMA. Esta multitrama se usa para transportar los canales lógicos FCCH, SCH, BCCH, CCCH, SDCCH, SACCH y CBCH.

La tasa de transmisión sobre la interfase de aire es de 270.8 kbps. Esto proporciona un periodo de *bit* de 3.692 μ s (48/13 μ s). El intervalo de tiempo de un *timeslot* así corresponde a 156.25 bits. El contenido físico de un *timeslot* se llama ráfaga y hay cinco tipos diferentes, las cuales son:

- ráfaga normal, *NB: Normal Burst*;
- ráfaga de corrección de frecuencia, *FB: Frequency correction burst*;
- ráfaga de sincronización, *SB: Synchronization burst*;
- ráfaga de acceso, *AB: Access burst*;
- ráfaga de relleno, *DB: Dummy burst*.

La ráfaga normal (NB): esta ráfaga es usada para transportar información de canales de tráfico o de control. Para el TCH contiene 114 bits encriptados, e incluye un período o tiempo de guarda de 8.25 bits de duración (30.46 μ s).

La ráfaga de corrección de frecuencia (FB): utilizada por la BTS. Se transmite periódicamente para permitir la sincronización en frecuencia de los móviles. Consiste de bits ceros solamente. La repetición del FB es también llamado canal de corrección de frecuencia (FCCH).

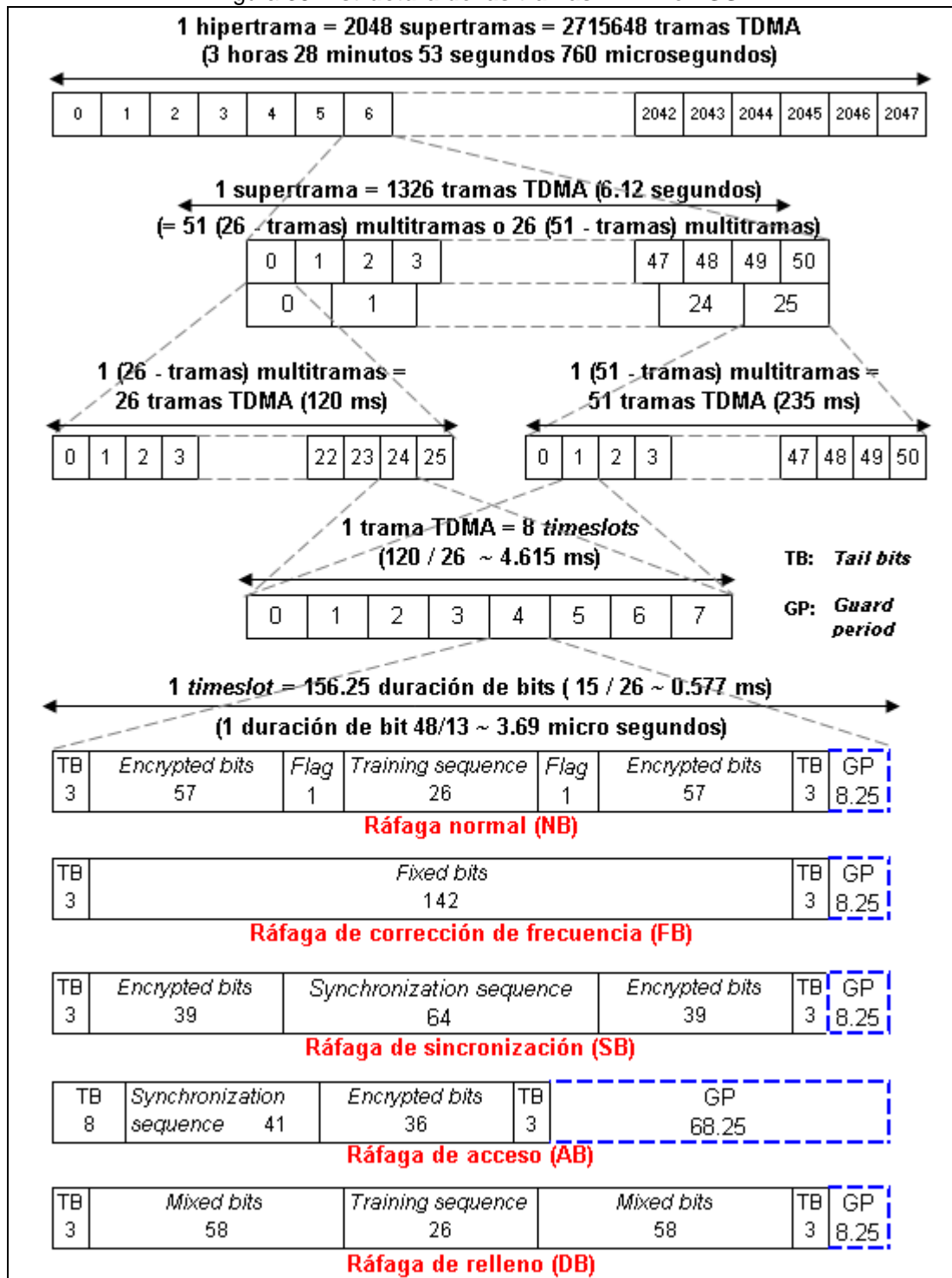
Ráfaga de sincronización (SB): utilizada por la BTS. Se utiliza para la sincronización en el tiempo de lo móviles. Consiste de una secuencia de formación larga y transporta la información del número de trama TDMA (FN) y la información del BSIC. La repetición de la ráfaga de sincronización también es llamada canal de sincronización (SCH).

Ráfaga de acceso (AB): esta ráfaga es utilizada por la MS para el *random access* (acceso a la red) y el acceso por *handover*. Esta caracterizado por período de guarda largo, *68.25 de duración de bit* o *252 μ s*, para atender a la ráfaga de transmisión de una MS que no sabe el *timing advance* en el primer acceso, o en el *handover*. Esto permite una distancia o radio de acceso de 35 km. La ráfaga de acceso es usado en el *Random Acces Channel (RACH)* y en el *Fast Associated Control Channel (FACCH)* en el *handover*.

Ráfaga de relleno (DB): esta ráfaga es transmitida en el ARFCN del BCCH cuando no hay ninguna otra ráfaga que transmitir. Esto quiere decir que la estación base siempre transmite en la frecuencia de la portadora la información del sistema, haciéndolo así es posible para las MS hacer mediciones de potencia de la BTS para determinar cuál BTS podría usarse para un acceso inicial o con la cual podría hacer *handover*. Para lograr esto se define un *dummy page* y un *dummy burst*. El CCCH es remplazado por el *dummy page*, cuando no hay mensajes de *paging* para transmitir. Este *Dummy page* es una búsqueda a MS que no existen. En los otros timeslots que no son usados, se transmite un *dummy burst* con un predefinido set de bits fijos.

La ráfaga normal se compone de una secuencia de 3 bits de inicio, 114 bits encriptados, 2 bits de bandera, 26 bits utilizados por las interferencias, 3 bits de stop y un período de 8.25 bits vacío que es utilizado en la llegada de *timeslots* pertenecientes a la misma trama TDMA que es entrada al modulador GMSK a una velocidad de 270.8 kbit/s. Como el intervalo de bit es 3.69 μ s, la duración de *timeslot* es de $156.25 * 3.69 = 0.577$ ms. Si 8 NB son multiplexadas se obtiene una trama TDMA de: $8 * 0.577 = 4.615$ ms.

Figura 38. Estructura de las tramas TDMA en GSM



Fuente: ERICSSON. **GSM SYSTEM SURVEY**. Pág. 79

El canal físico provee un *timeslot* físico a una velocidad de $114 / 4.615 = 24.7$ kbit/s, que es suficiente para transmitir en TCH/F a 22.8 kbit/s. Incluso existe una capacidad reservada de $24.7 - 22.8 = 1.9$ kbit/s que puede ser explotadas para transmitir información de control asociadas con el canal de tráfico específico.

Los TCH/F tienen un retardo de repetición de 20 ms y un retardo de transmisión de $8 * 4.615 = 36.92$ ms, lo que configura un retardo total de 56.92 ms.

Las tramas TCH/F de los 8 usuarios se multiplexan en multitramas de 24 tramas TDMA, pero la trama número 13, lleva un mensaje de tipo SACCH y la trama número 26 es una trama vacía. De esta forma el envío dura: $26 * 4.615 = 120$ ms, esto reduce el tráfico a $24 * 24.7 / 26 = 22.8$ kbps requeridos por TCH/F, donde $24.7 / 26 = 950$ bps son para SACCH y usa 950 bps en tramas vacías. La trama SACCH tiene 8 *timeslots* para transmitir, las 8 tramas vacías son usadas en canales half, donde 16 usuarios se multiplexan en tramas alternativas para incrementar la capacidad del sistema.

La construcción de la trama SACCH es, ligeramente, distinta de la TCH/F, ya que, sólo 184 bits de control son transmitidos durante 20 ms, en contraste con los 260 bits de voz. La capacidad adicional del canal se usa para acomodar un bloque de 40 bits y otro de 4 bits a cero. El número total de bits es ahora de $(224 + 4) * 2 = 456$ bits, transmitidos mediante 4 tramas consecutivas de 114 bits. Cada una de ellas se acomoda en un nueva multitrama de 120 ms de duración, con un retardo de repetición de $4 * 120 = 480$ ms.

Los mensajes del tipo FACCH se transmiten por el canal físico a través de los bits robados de su propio canal de tráfico. La construcción de la trama FACCH a partir de 184 bits de control es idéntica a la SACCH, pero su trama de 456 bits se mapean en 8 tramas consecutivas de 144 bits de TDMA, como se especifica para TCH/F. Esto se lleva a cabo robando los bits impares de la primeras cuatro y los pares de las cuatro últimas tramas.

La velocidad de la información FACCH es de $184 / 20 = 9.2$ kbps, que se transmite después de concatenar el error de protección a una velocidad de 22.8 kbps. El retardo de repetición es de 20 ms y el retardo de *interleaving* es de $8 * 4.615 = 37$ ms, resultando un total de 57 ms de retardo.

Las tramas TCH/F se amalgaman en una supertrama de $51 * 120 = 6.12$ s, que contiene $26 * 51 = 1326$ TDMA. Si no fuera por la encriptación, no serian necesarios más niveles jerárquicos en las tramas TDMA, ya que, la encriptación usa el número de trama como parámetro en sus algoritmos.

De todas maneras, con 1326 tramas el algoritmo de encriptación no es suficientemente seguro, por tanto 2048 supertramas se concatenan para formar $1326 * 2048 = 2715648$ tramas TDMA que tarda $2048 * 6.122 = 3$ horas 28 minutos 53 segundos y 760 milisegundos.

Los canales BCCH y CCCH de todas las estaciones móviles de una celda determinada, comparten el canal físico proveído por el *timeslot* cero de las portadoras BCCH disponibles en la celda. Todos los BCCH y CCCH son canales símplex que operan en dirección ascendente o descendente. Los canales BCCH y CCCH se mapean en 51 tramas TDMA que tienen una duración de $51 * 4.615 = 235.365$ ms, en lugar de en 26 tramas TDMA que tendrían una duración de 120 ms. Por tanto, 26 tramas constituyen un supertrama con longitud 1326 y 6.12 s de duración.

6.3. Principales parámetros en el diseño de un plan de frecuencias

6.3.1. El BSIC

El BSIC, *Base Station Identity Code*, es un código que se transmite en el canal SCH, *Synchroniztion Channel*, para identificar el NCC, *Network Colour Code* y el BCC, *Base Statio Colour Code*, cada uno el NCC y el BCC toman valores de 0 a 7 y se combinan de la siguiente forma: el BSIC es igual a la combinación NCCBCC es decir, los valores de BSIC son $BSIC = NCC(0-7)BCC(0-7)$ y con esto se puede formar la tabla V.

Tabla V. 64 valores disponibles de BSIC

BSIC NCCBCC		NCC							
		0	1	2	3	4	5	6	7
BCC	0	00	10	20	30	40	50	60	70
	1	01	11	21	31	41	51	61	71
	2	02	12	22	32	42	52	62	72
	3	03	13	23	33	43	53	63	73
	4	04	14	24	34	44	54	64	74
	5	05	15	25	35	45	55	65	75
	6	06	16	26	36	46	56	66	76
	7	07	17	27	37	47	57	67	77

El BSIC le sirve al móvil para identificar una BTS en la red GSM, cuando el móvil encuentra 2 BTS que transmiten con la misma frecuencia de ARFCN, la forma como el móvil logra diferenciar a las dos BTS es por medio del BSIC. Este parámetro es asignado a cada sector de una BTS y la forma de asignación es planificada junto con la asignación del BCCH, por lo tanto, el reuso de la combinación de BCCH Y BSIC debe estar suficientemente lejos para evitar problemas de acceso a las BTS, un mismo valor de BSIC se le pueden asignar a lo diferentes sectores de una BTS o a BTS vecinas siempre y cuando las frecuencias de BCCH no sean iguales o adyacentes.

6.3.2. EI BCCH

El BCCH, *Broadcast control channel*, es un canal *downlink* que se usa para enviar información de identificación de celda y de red, así como características operativas de la celda, *estructura actual de canales de control, disponibilidad de canales y congestión*. El BCCH también envía una lista de canales que están en uso en una celda. Desde la trama 2 a la 5 de una multitrama de control están contenidos los datos BCCH.

El BCCH está siempre colocado en el *timeslot 0* de la trama TDMA de un ARFCN y, entonces, cuando se dice que se va a asignar una frecuencia al BCCH lo que se está haciendo es asignar el ARFCN al radio donde se transmitirá el canal lógico BCCH.

El BCCH transmite el LAI, *Location Area Identity*, la máxima potencia permitida del móvil en la celda y transmite una lista de ARFCN en donde se transmiten los BCCH de las celdas vecinas, esto le sirve al móvil para el proceso de *handover*. La frecuencia del radio (TRX) en donde se transmite el BCCH no puede tener *hopping* o control de potencia, ya que, esta frecuencia es monitoriada por los móviles, constantemente y se lo reportan a la BTS y esta se lo reporta al BSC para varios procesos.

Por tal razón, se deben planificar correctamente los ARFCN de todas las celdas que forman una red GSM. Planificar correctamente quiere decir que los reusos de ARFCN no estén muy cercanos como para provocar interferencia.

6.4. Algoritmos que disminuyen el efecto de la interferencia

6.4.1. DTX

DTX, *Discontinuous transmission*, es un mecanismo que permite al radio transmisor apagarse cuando en una conversación hay pausas. Durante una conversación normal, los participantes se alternan es decir que no hablan al mismo tiempo, así que cada uno deja de hablar cerca de 50% del tiempo. Si el transmisor es apagado mientras no tenga nada que enviar, el consumo de potencia en la unidad móvil disminuye. Menos potencia transmitida genera menos interferencia.

Los beneficios del DTX en uplink y *downlink* son las siguientes.

Uplink

- La batería tarda más en el móvil.
- Reduce la interferencia en el sistema.

Downlink

- Reduce la interferencia en el sistema.
- Reduce el consumo de energía en la BTS, especialmente cuando la BTS está operando con baterías de respaldo.
- Reduce el producto de la íntermodulación del transmisor.

6.4.2. *Frequency Hopping*

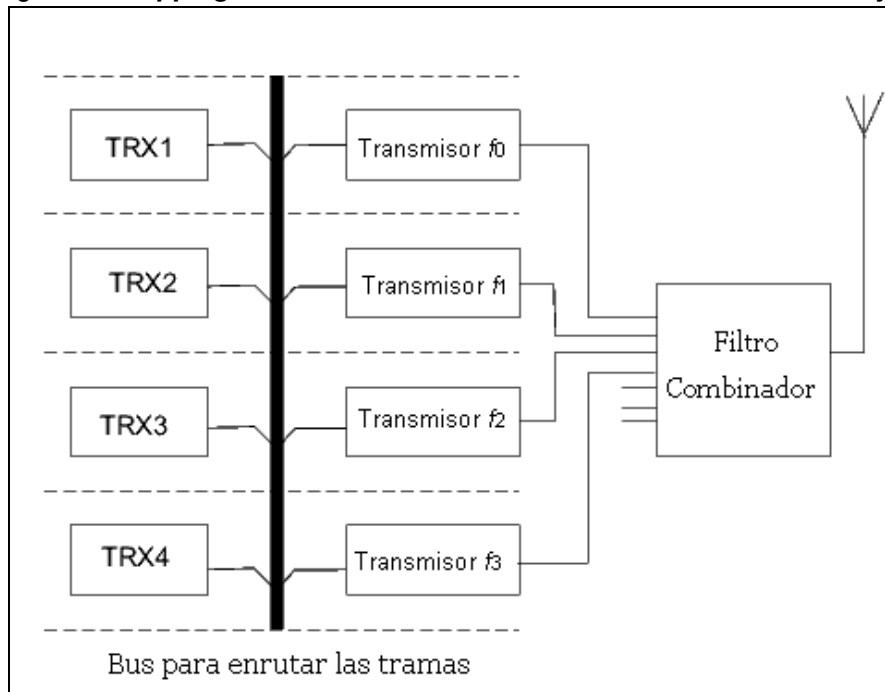
Básicamente, el *frequency hopping* es el cambio constante de ARFCN de los canales TCH de un móvil, es decir, que en un momento dado la comunicación entre el móvil y la BTS utilizan diferentes ARFCN, con esto se logra que los usuario perciban en menor grado la interferencia, por que si algún ARFCN está interferido, sólo un momento muy corto de tiempo es utilizado por el móvil y, seguidamente, cambia a otro que posiblemente no este interferido. El móvil cambia de ARFCN cada trama TDMA es decir 217 veces por segundo.

Hay dos tipos de *frequency hopping* banda base y sintetizado, en el *hopping* banda base a todos los radios de un sector de la BTS se le asigna un ARFCN fijo y es el móvil que va cambiando de radio. La figura 39 muestra este tipo de *frequency hopping*.

En el *hopping* sintetizado a los radios de transmisión de la BTS se les puede asignar varias frecuencias y el radio puede utilizar toda las frecuencias que se le asignaron, es decir, que es el radio el que cambia constantemente de frecuencia y, así, el móvil siempre está en el mismo radio, pero cambiando de frecuencia constantemente o sea 217 veces por segundo.

La ventaja del *hopping* sintetizado sobre el banda base es que al sintetizado se le pueden asignar muchas frecuencias y tener un rendimiento mejor mientras que al banda base sólo se le pueden asignar el número de frecuencia como radio tiene la BTS y esto en comparación con el sintetizado es menos eficiente.

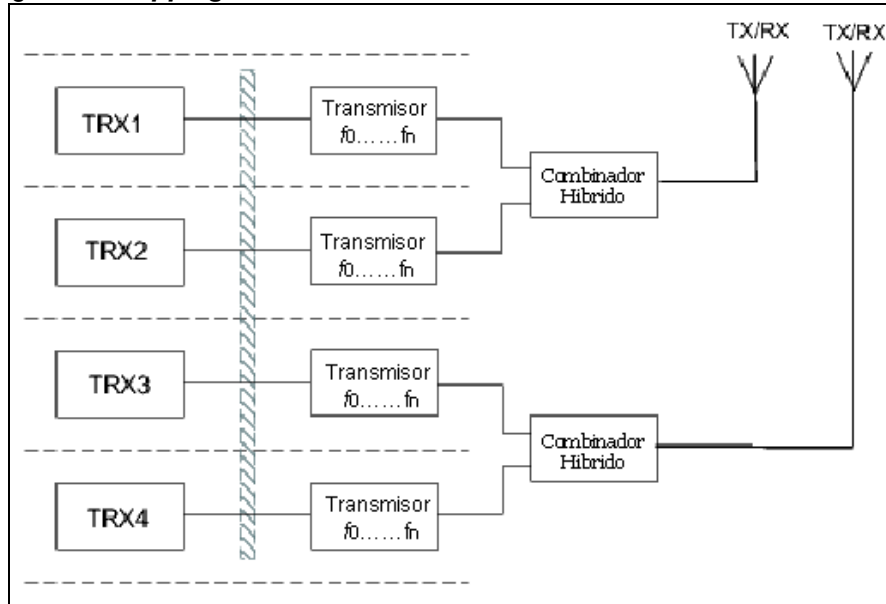
Figura 39. **Hopping** banda base los transmisores tienen frecuencias fijas



Fuente: CPI for BSS R12. **User Description, Radio Network Features**

El *frequency hopping* solo es aplicable a los radios que no tienen el BCCH asignado, es decir, al TRX que tiene asignados los canales de control no se le puede hacer que hagan *hopping*, porque como se mencionó la frecuencia del BCCH tiene que ser fija para que los móviles constantemente los monitoreen para el proceso de *handover*.

Figura 40. **Hopping sintetizado** los transmisores tienen varias frecuencias



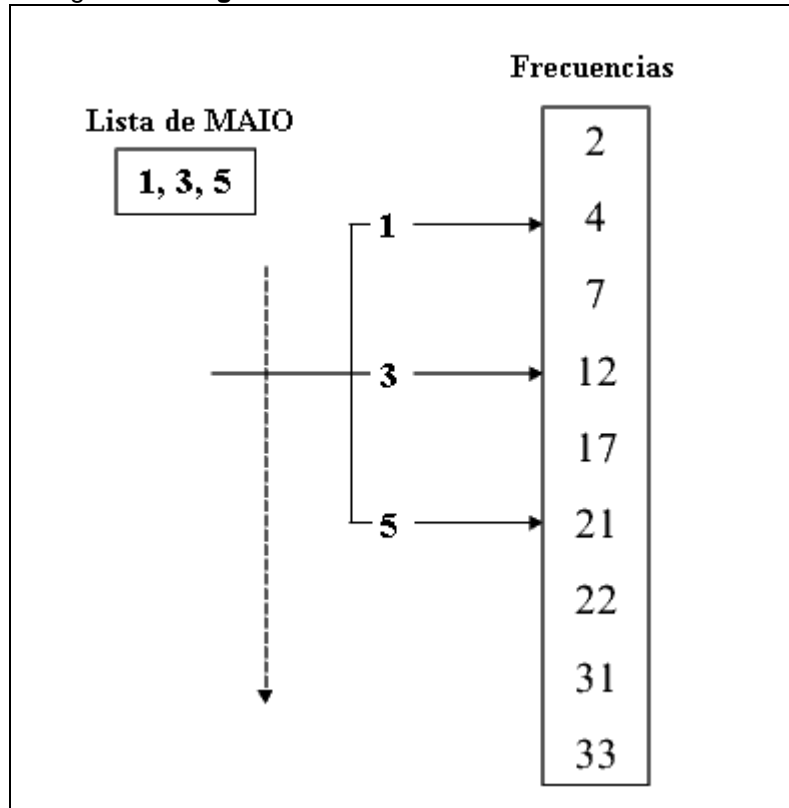
Fuente: CPI for BSS R12. *User Description, Radio Network Features*

6.4.3. MAIO

El MAIO, *Mobile Allocation Index Offset*, es un complemento junto con el HSN, *Hopping Sequence Number*, del *frequency hopping*, estos dos parámetros son colocados a cada sector que tienen *frequency hopping* sintetizado, el proceso es muy simple, por ejemplo, a un sector de una BTS que tiene tres radios solo para TCH se le asigna *hopping* sintetizado y se le asignan las frecuencias 2,4,7,12,17, 21,22, 31 y 33, al radio (TRX) que lleva el BCCH no se toma en cuenta para el *hopping* y, por lo tanto, el sector tiene 4 radios en total, *3 para TCH y 1 para BCCH*. Teniendo ya asignadas las frecuencias a cada TRX con las cuales puede ejecutar el *hopping*, se necesita especificarle a cada radio con qué frecuencia tiene que empezar y el MAIO es, precisamente eso, dada una lista de frecuencias como las del ejemplo, el MAIO le indica a cada TRX con cual frecuencia tiene que empezar, entonces, si se pone un MAIO de 1,3,5 esto quiere decir que al TRX1 (el TRX0 es el del BCCH) le va a asignar la frecuencia 4, al TRX2 le va a asignar la frecuencia 12 y al TRX3 le va a asignar la frecuencia 21. los valores de MAIO pueden ser desde 0 hasta el número de frecuencias asignadas menos 1 para el ejemplo los valores de MAIO posibles son 0,1,2,3,4,5,6,7,8; es decir, a la frecuencia 2 le corresponde el MAIO 0 y a la frecuencia 33 le corresponde el MAIO 8 y la cantidad de MAIO es igual al número de TRX que están en hopping en este caso se tienen 3 TRX y por lo tanto se tienen 3 MAIO.

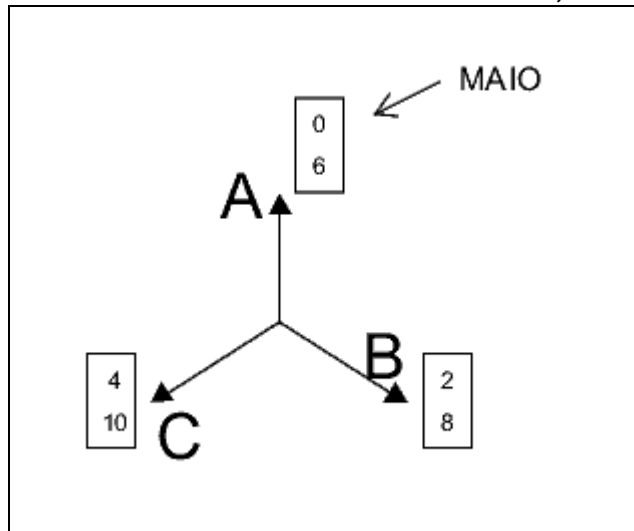
Las frecuencias y los MAIO son asignado a cada sector de una BTS y pueden tener valores diferentes o iguales dependiendo del plan de frecuencias que se este implementando.

Figura 41. Asignación del MAIO en un sector de una BTS



Fuente: CPI for BSS R12. *User Description, Radio Network Features*

Figura 42. Una BTS de 3 sectores con diferentes MAIO, 2 TRX por sector



Fuente: CPI for BSS R12. *User Description, Radio Network Features*

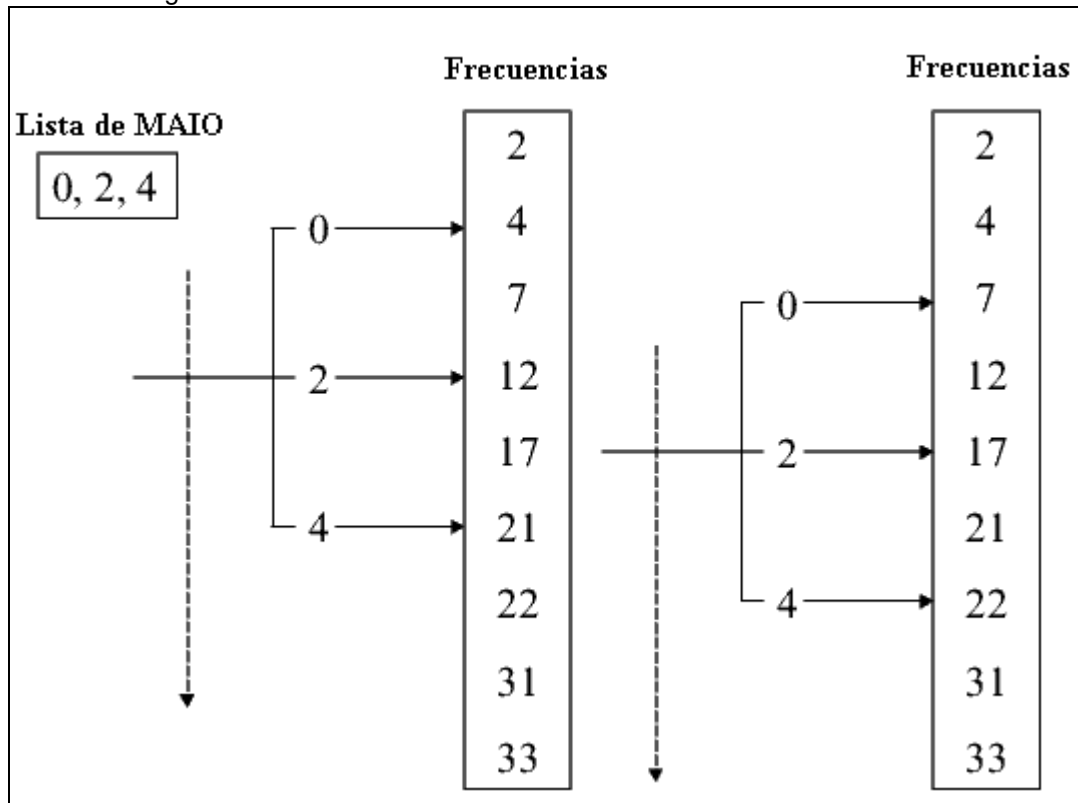
6.4.4. HSN

El HSN, *Hopping Sequence Number*, es la forma cómo se asignan las frecuencias después del punto inicial, cuando se pone en servicio una BTS las frecuencias de cada TRX están especificadas por el MAIO, pero como las frecuencias están, constantemente, cambiando el HSN le indica al sector que frecuencia debe asignarle a cada TRX en la siguiente trama TDMA del sector.

Los valores de HSN van de 0 a 63 el valor 0 corresponde a una secuencia consecutiva, es decir, del ejemplo anterior la primera vez comienzan con las frecuencias 4,12,21 la siguiente vez con 7,17,22 y la tercera vez con 12,21,31 y la cuarta vez en 17,22,33 y nuevamente comienza con 2,7,17 y se repite el ciclo.

Como se puede ver las frecuencias de los TRX se mueven con el mismo *offset*, es decir, se mueven los tres teniendo la misma distancia de posiciones como al principio y esto es aplicable a todas las secuencias del 1 al 63 que ya no son secuenciales sino pseudo aleatorios y cada uno de los HSN del 1 al 63 tienen una secuencia única que no se repite y es, totalmente, pseudo aleatoria, pero todas las frecuencias o posiciones de MAIO conservan la misma diferencia de posiciones en cualquier otra posición que estén.

Figura 43. Movimiento de las frecuencias de acuerdo con el HSN



Fuente: CPI for BSS R12. *User Description, Radio Network Features*

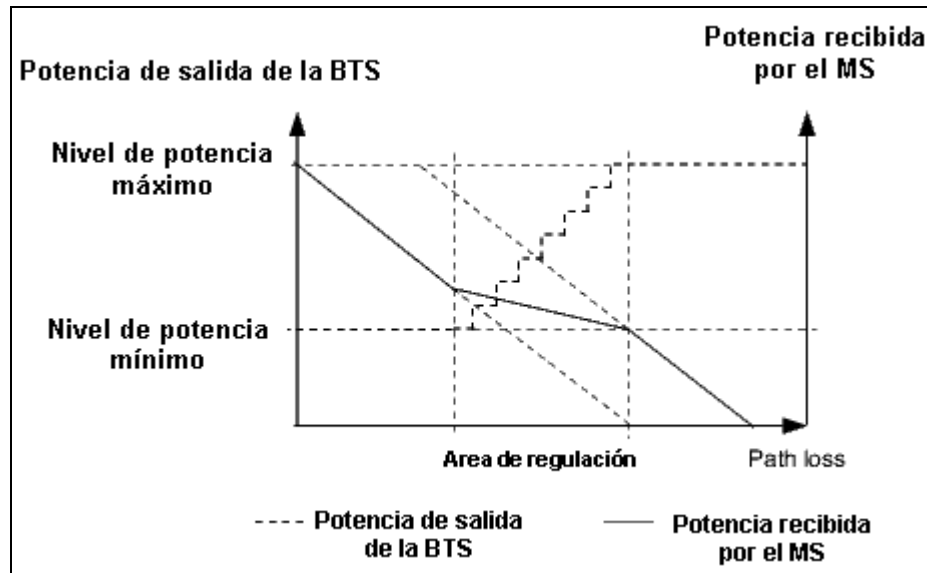
6.4.5. Control de potencia de la BTS

El objetivo del control de potencia de la BTS es incrementar el número de MS con un buen nivel de C/I. Cuando se usa el control de potencia en todas las BTS de la red GSM, la cantidad total de potencia radiada es menor comparado con la potencia radiada si no se usara el control de potencia. Esto implica que la interferencia co-canal y adyacente se reduce, ya que, las MS con bajo nivel de señal o mala calidad usan la máxima potencia disponible de la BTS, un nivel de interferencia reducido implica aumentar el C/I de estas conexiones, por el contrario el C/I es reducido para las conexiones con alto nivel de señal y buena calidad, ya que esas conexiones experimentan una reducida potencia de salida de la BTS. La reducción del C/I no afecta la calidad de la conversación de estas conexiones ya que ellos tienen un margen de muy baja tolerancia de C/I.

En la figura 44 se muestra la potencia de salida de la BTS y el nivel de señal en el MS versus el *path loss* entre la BTS y una MS. Una BTS sólo puede transmitir estrictamente ciertos niveles de potencia como se ilustra en la figura. Cuando una conexión tiene bajo *path loss*, *pérdida*, la BTS transmite a su nivel más bajo posible. Aunque la MS recibe una señal que excede el valor deseado, la BTS no puede reducir su potencia de salida aun más. Por el contrario, cuando una conexión experimenta un alto *path loss*, la BTS trasmite a su máxima potencia permitida por la celda. La potencia no puede ser incrementada aun si la señal recibida en la MS es baja.

Cuando se toma en cuenta la calidad (RxQual) la potencia de salida es regulada según el caso bajando y subiendo la potencia dependiendo de la calidad recibida. La potencia de salida de la BTS varía entonces de acuerdo con la calidad medida por la MS. Cuando una MS tiene buena calidad de señal, la BTS baja su potencia de salida y cuando una MS tiene baja calidad la BTS aumenta su potencia de salida. El control de potencia sólo es aplicable a los radios destinados para TCH, el radio que lleva el BCCH no debe utilizar el control de potencia. Durante una llamada la MS mide el nivel de señal del *downlink* y la calidad. Estas mediciones son enviadas a la BTS en el reporte de medición y de allí al BSC donde el resultado de los mensajes es usado para calcular el nuevo nivel de potencia. El período de tiempo mínimo entre dos órdenes de potencia consecutivas es un período de SACCH (480ms) y pueden ser múltiplos de este valor. La BTS puede cambiar su potencia a nivel de *timeslots*. La resolución de la potencia de salida esta dando en pasos de 2 dB:

Figura 44. Regulación de potencia de la BTS



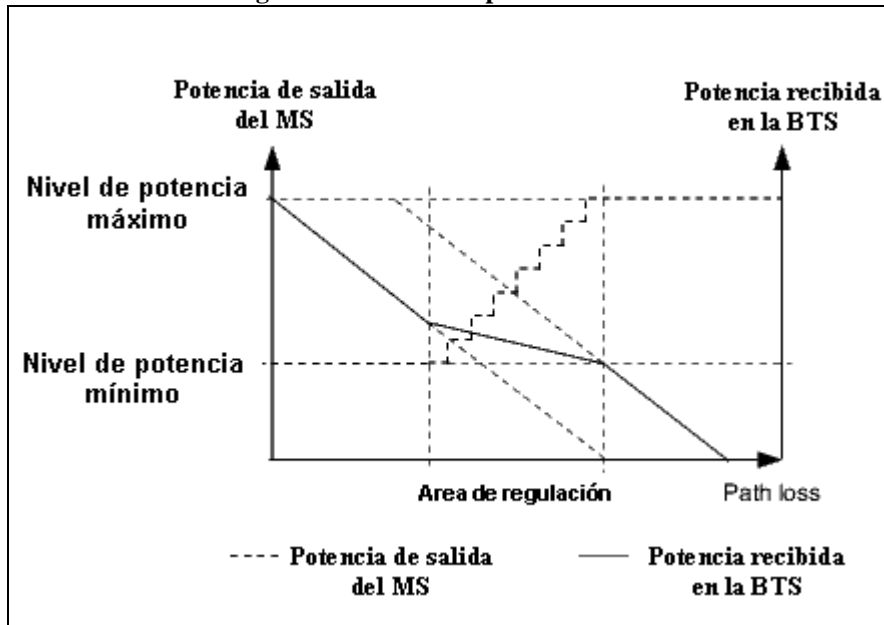
Fuente: CPI for BSS R12. *User Description, Radio Network Features*

6.4.6. Control de potencia de la MS

El objetivo del control de potencia en la MS es ajustar la potencia de salida de la MS de tal forma que en la BTS se reciba un nivel de señal deseado. El nivel de señal deseado depende, sin embargo del *path loss* y la calidad. Cuando una conexión a la BTS tiene bajo *path loss* y buena calidad, la MS transmite a su nivel más bajo posible. Aunque la BTS recibe un nivel de señal que excede el valor deseado, la MS no puede reducir su potencia de salida aun más, por el contrario cuando la BTS experimenta un alto *path loss* la MS transmite a su nivel más alto posible. La potencia no puede ser incrementada aun si la señal recibida en la BTS es baja. Cuando la calidad es tomada en cuenta, la potencia de salida es regulada según sea el caso bajando o subiendo dependiendo del la calidad recibida. La potencia del MS entonces varía con la calidad medida por la BTS. Cuando la BTS tiene buena calidad la MS envía un mensaje de baja potencia y cuando la BTS tiene mala calidad envía un mensaje de alta potencia. Durante una llamada, la BTS mide el nivel de señal del *uplink* y la calidad. Estas mediciones son entonces agregadas al reporte de medición y enviado al BSC y es donde con los valores del reporte de medición se calcula la nueva potencia para la MS.

El período de tiempo mínimo entre dos órdenes de cambio de potencia es igual a un período de SACCH. Cada cambio está dando en unidades de 2 dB.

Figura 45. Control de potencia del MS



Fuente: CPI for BSS R12. *User Description, Radio Network Features*

6.5. Diseño de planes de frecuencias

Con todo lo estudiado, anteriormente, ya se tienen casi todas las herramientas con las cuales se puede diseñar un plan de frecuencias. Con todos los conceptos estudiados, no se dificultará el entendimiento de lo que en este capítulo se estará tratando.

Para el diseño de un plan de frecuencias se debe seguir un orden lógico y saber exactamente con que se cuenta y que se quiere realizar, para iniciar un plan de frecuencias se deben saber los siguientes datos.

Rango de frecuencia de operación: primero se tiene que saber cuál es el rango de frecuencia con la que se cuenta, porque, como ya se mencionó anteriormente, puede ser que, no se cuenta con todo el rango de frecuencias disponibles en una banda determinada y se tiene que trabajar, eficientemente, con lo que se proporciona. Conociendo el rango de frecuencia se puede calcular cuáles son los ARFCN que se pueden utilizar.

Posiciones geográficas de las celdas: esto es importante, ya que, se diseña el plan de frecuencia con base en las distancias de una celda a otra teniendo el cuidado de no utilizar un reuso muy malo. Para esto se necesitan las coordenadas de GPS de todos los sitios a trabajar.

Cantidad de radios de todo el sistema: es necesario saber la cantidad de radios de las celdas, porque en ellos es donde se distribuyen todas las frecuencias o ARFCN disponibles.

En una BTS hay canales de tráfico y canales de control; una BTS está compuesta por sectores, es decir, en un sitio puede haber una BTS con 1,2,3,4,5 y hasta 6 sectores, para cada sector se le asignan canales de tráfico y canales de control y para hacer esto al sector se le colocan radios físicos y se configura cuál es el radio que llevará el BCCH y cuáles son los radios que llevarán los TCH, *canales de tráfico de voz o datos*, para el BCCH sólo se utiliza un radio físico y para los TCH se pueden utilizar varios dependiendo de la demanda de los usuarios. En el radio que lleva el BCCH también pueden ir canales de tráfico, ya que un radio tiene ocho *timeslots* y el BCCH utiliza sólo un *timeslot* y otro para los canales SDCCH, es decir, que de los ocho *timeslots*, uno es para el BCCH otro para un SDCCH y los restantes seis *timeslots* se pueden utilizar para TCH. El canal SDCCH también se puede configurar más de uno y depende de la demanda de los usuarios y pueden ir en cualquier *timeslot* de cualquier radios excepto el destinado para el BCCH que ocupa el *timeslot 0*, los *timeslots* van de 0 -7 *timeslots*.

Como se mencionó anteriormente, en un sector de una BTS hay canales de tráfico y canales de control, pues el primer paso para un plan de frecuencias es hacer el plan de frecuencias para el BCCH, es decir, asignar los ARFCN para todos los BCCH de todos los sectores de una red GSM. EL siguiente paso es asignar los BSIC a todos los BCCH de la red GSM, el siguiente paso es calcular las frecuencias para los TCH es decir asignarles ARFCN para todos los radios que llevan, exclusivamente, los TCH de todas las celdas, la cantidad de ARFCN depende de la cantidad de radios utilizados por el sector y el tipo de *hopping*, banda base o sintetizado, junto con las frecuencias de *hopping* se calculan los valores de MAIO Y HSN. En resumen, para realizar un plan de frecuencias se deben seguir estos pasos:

- ✓ asignar los ARFCN para los BCCH;
- ✓ asignar los BSIC para los ARFCN de los BCCH;
- ✓ asignar los ARFCN para los radios que llevan solo TCH Y SDCCH;
- ✓ asignar el MAIO;
- ✓ asignar el HSN;
- ✓ implementar los cambios;
- ✓ correcciones finales.

Es importante mencionar que un plan de frecuencias, incluso realizado por programas de *software*, requiere de ajustes finos o correcciones posteriores, ya que cuando se implementa un plan de frecuencias, sólo hasta cuando la red ya tenga usuarios o cursando tráfico, es cuando se pueden ver las fallas y corregirlas.

También, es importante mencionar que un plan de frecuencias no es perpetuo, siempre hay que hacer modificaciones completas o parciales, es decir, implementar otro nuevo plan de frecuencias ya que por el comportamiento de los usuarios, por ejemplo en lugares donde antes no habían muchos usuarios y ahora por cualquier causa hay más usuarios, también por la puesta en servicio de nuevas BTS, por ampliaciones de radio, básicamente estas son las causas principales por las cuales se realizarían cambios en el plan de frecuencias.

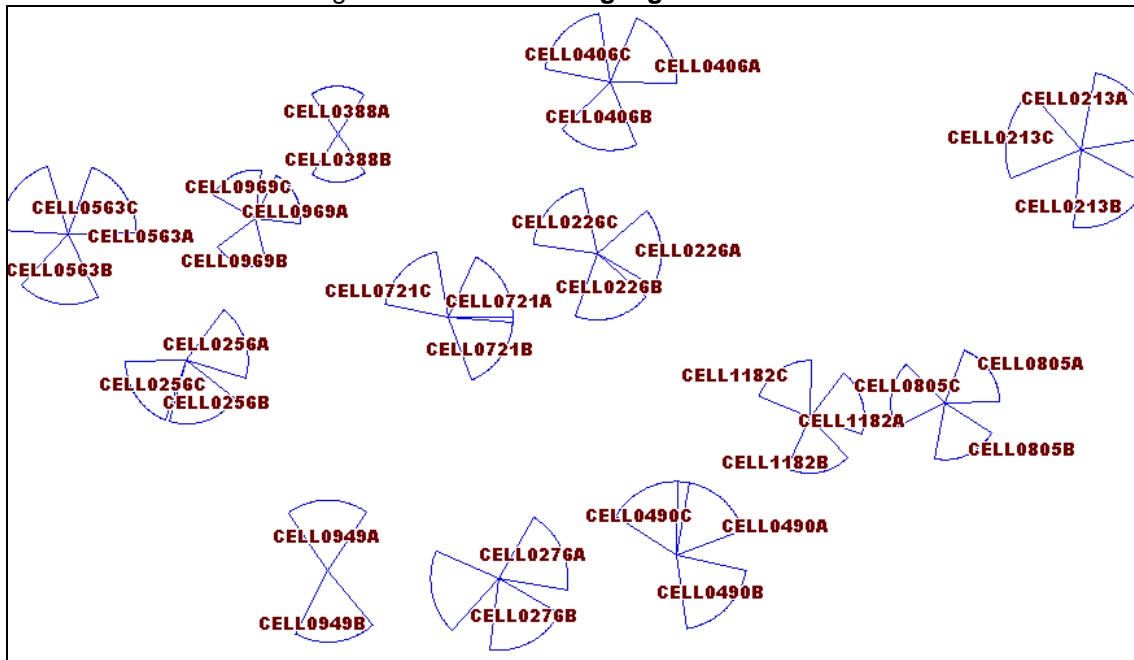
6.5.1. Reuso de los ARFCN para los BCCH

La forma de asignar los ARFCN para los BCCH es de la siguiente forma: primero se tiene que saber cuál es el rango de frecuencias, por ejemplo, se proporciona el rango de frecuencias del 890-903 MHz y del 935-948 MHz y al revisar la tabla III y IV se determina que los ARFCN disponibles son del 1 al 65 de la banda 900 o sea que se tienen 65 ARFCN para las celdas, lo primero que se tiene que hacer es separar un grupo de ARFCN para BCCH y otro grupo para TCH, para determinar la cantidad de ARFCN para BCCH lo que se tiene que hacer es asignar ARFCN a un grupo de celdas de tal forma que al reusar nuevamente las frecuencias estas no se interfieran, esto requiere de un conocimiento de la topografía del terreno y se pueden utilizar mapas digitales que son útiles para ver las inclinaciones de los terrenos. Para realizar este trabajo se tienen que tomar ciertas consideraciones.

- ✓ En un mismo sitio no se pueden dejar ARFCN adyacentes mucho menos co-canales.
- ✓ Sectores que se miran directamente de diferentes BTS tampoco se pueden dejar co-canales, en casos extremos se pueden dejar adyacentes.
- ✓ La separación mínima en un sitio de los ARFCN para BCCH es 1 es decir si se utiliza el ARFCN 1 se debe utilizar el ARFCN 3 para el otro sector y el ARFCN 5 para el tercer sector.
- ✓ Un sector **X** que tiene *handover* con otro sector **Y** y otro sector **Z** los sectores **Y** y **Z** no deben tener el mismo ARFCN, aunque los sectores **Y** y **Z** no se interfieran esto es a lo que se le llama *handover* co-canal de 2º orden.

Como se pueden observar, hay varias reglas que entran en juego y es por esto que la planeación de un plan de frecuencias es bastante laboriosa. Teniendo en cuenta las anteriores reglas se asignan los ARFCN para los BCCH en la primera celda, generalmente las celdas son de tres sectores y se toma una celda como base para iniciar el trabajo. En la figura 46 se toma como base la celda CELL0721 que es de tres sectores identificados por CELL0721A, CELL0721B y CELL0721C, se puede empezar con cualquier celda. Se comienza utilizando los primeros ARFCN disponibles, por lo que se comienza asignando el 1 al primer sector CELL0721A, 3 al segundo sector CELL0721B, y 5 al tercer sector CELL0721C. Luego se continúa con la siguiente celda que puede ser cualquiera que lo rodea, por ejemplo, CELL0226; también se puede comenzar con cualquier sector de esta celda, se comienza haciendo una asignación mental o se apunta en un cuaderno lo siguiente, al sector CELL0226B se le puede asignar el ARFCN 1? y se mira que el sector CELL0721A ya lo tiene por lo que quedarían co-canales y, por lo tanto, no se puede utilizar y se sigue, se le puede asignar el 2?, tampoco porque quedarían adyacentes, se le puede asignar el 3?, tampoco por que la celda CELL0721B ya lo tiene y quedarían co-canales muy cercanos y además violaría la regla número 4 descrita, anteriormente, de los *handovers* co-canales y se sigue se le puede asignar el 4?, es posible, pero quedarían frecuencias adyacentes muy cercanos como se esta iniciando se debe tratar de no dejarlos y, se continúa se le puede asignar el 5? tampoco porque quedarían co-canales muy cercanos con CELL0721C y se continúa se le puede asignar el 6? y la respuesta es sí, porque el 6 no está siendo utilizado aún por ningún sector y el adyacente cercano es el sector CELL0721C, pero está radiando en direcciones casi opuestas, por lo que no se deben interferir mutuamente.

Figura 46. Distribución geográfica de BTS

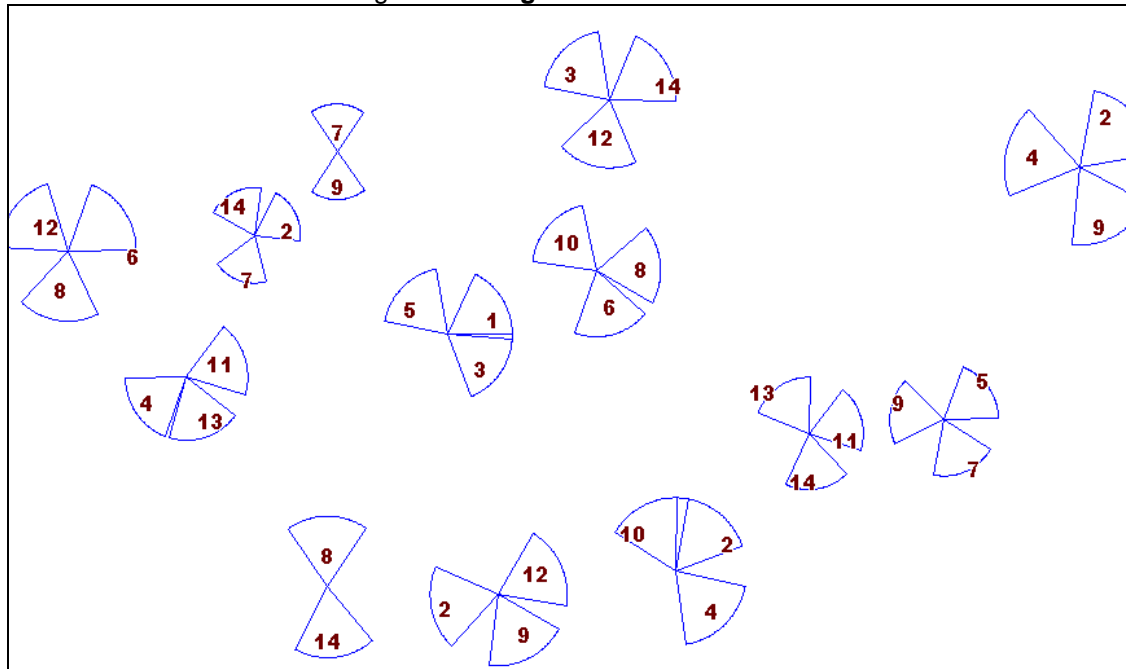


Fuente: **Gráfica de MapInfo con celdas no reales**

Y siguiendo este procedimiento se logra asignar a todos los sectores de las celdas los ARFCN respectivos para los BCCH como lo muestra la figura 47, es importante hacer un esfuerzo para no utilizar muchos ARFCN para BCCH por que se debe tomar en cuenta que se les tiene que asignar también a los TCH.

Otro aspecto importante es que para obtener un buen plan de BCCH, el cual satisface todas las reglas, se tiene que trabajar mucho pues al terminar se observa que hay muchos co-canales, se pueden borrar todos y empezar nuevamente asignando a otros sectores, o trabajar únicamente los sectores que quedaron co-canales, es por eso que en una planeación manual como se ha hecho se debe utilizar papel, borrador y lápiz.

Figura 47. Asignación de los BCCH



Fuente: Gráfica de MapInfo con celdas no reales

6.5.2. Reuso de los BSIC

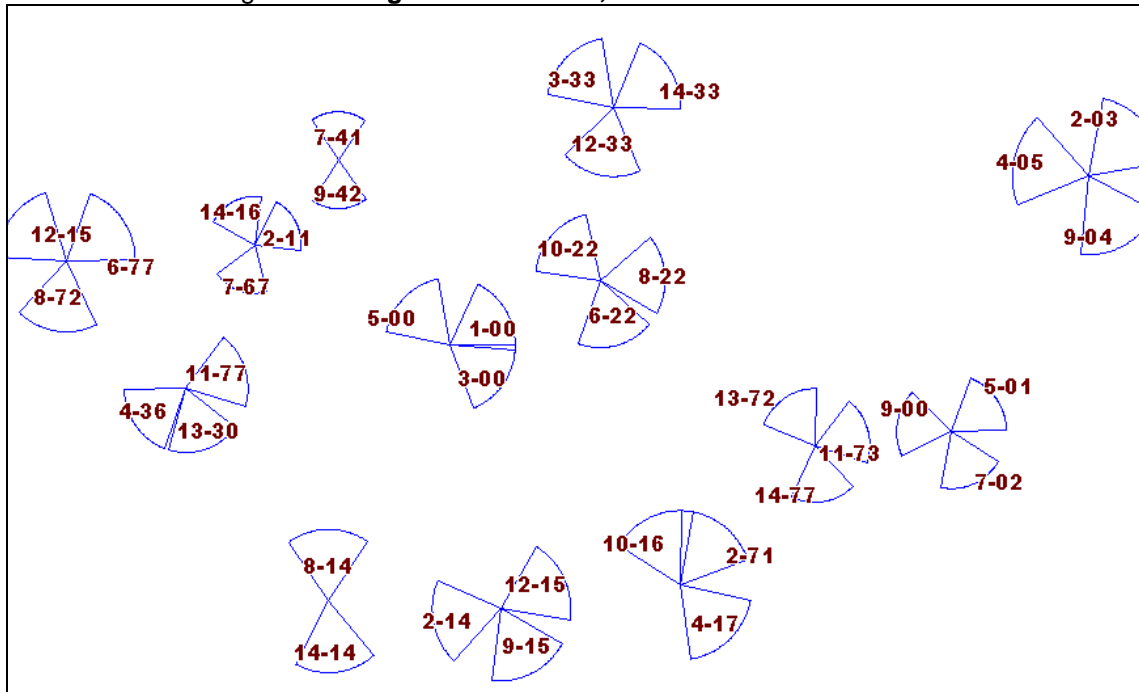
Como ya se presentó en la sección 6.3.1, hay 64 valores de BSIC con los cuales se puede trabajar, si es que están disponibles todos, ya que, hay lugares donde el operador sólo puede usar cierto valor de NCC.

Para el BSIC se tienen que seguir estas reglas, teniendo el plan de frecuencias de BCCH ahora se procede a asignarles los BSIC.

- ✓ La combinación BCCH Y BSIC no debe ser igual en el sistema GSM, es decir, no se debe repetir esa combinación. E en la práctica si se repite pero tienen que estar alejados para que en ningún punto puedan interferirse.
- ✓ Si los ARFCN son diferentes y no adyacentes pueden utilizar el mismo valor de BSIC, esto indica que en una celda por ejemplo de tres sectores, los sectores de la celda pueden utilizar el mismo BSIC, ya que no son adyacentes.
- ✓ Si se tienen valores de ARFCN iguales para BCCH en BTS cercanos deben utilizarse diferentes valores de BSIC.
- ✓ Si dos sectores tiene frecuencias adyacentes y tiene *handover*, deben utilizar diferentes valores de BSIC.

Teniendo en cuenta estas reglas, se asignan los BSIC para las BTS del ejemplo anterior y se obtiene la figura 48, en donde se muestra la combinación BCCH-BSIC, como se observa a las frecuencias co-canales se le puso diferentes valores de BSIC y a los que no son adyacentes se les puede poner el mismo valor.

Figura 48. Asignación de BSIC, combinación BCCH-BSIC



Fuente: Gráfica de MapInfo con celdas no reales

6.5.3. El concepto de *channel group*

El *channel group*, *Grupo de canales*, es muy útil para la asignación del *frequency hopping*, el método consiste en reunir un grupo de radios TRX y a ese grupo de radios se les asigna un identificador y cuando es referente al grupo de radios, solo basta con referirse al valor del identificador, del mismo modo si le quiere asignar frecuencias al grupo de radios, sólo basta con asignarle frecuencias al *channel group*, es decir, no se tiene que asignar frecuencias a cada TRX, sólo basta con asignarle frecuencias al *channel group* que identifica al grupo de TRX.

Tabla VI. **Distribución de los TRX por *channel groups***

BTS				
CHANNEL GROUP	CANAL	SECTOR A	SECTOR B	SECTOR C
0	BCCH	TRX0	TRX0	TRX0
1	TCH	TRX1	TRX1	TRX1
		TRX2	TRX2	TRX2
		TRX3	TRX3	TRX3
2	TCH	TRX4	TRX4	TRX4
		TRX5	TRX5	TRX5
		TRX6	TRX6	TRX6
		TRX7	TRX7	TRX7

En la tabla VI se muestra la forma de distribución de una BTS de tres sectores, SECTOR A, SECTOR B y SECTOR C y cada sector en este caso tiene ocho radios o TRX, la cantidad de TRX que puede tener una BTS depende del modelo de la BTS.

En este caso son ocho TRX por sector y un TRX tiene ocho *timeslots*, también, en cada sector se tiene que definir un TRX para el BCCH, es decir, el TRX que transmite el canal BCCH y se tienen que definir los TRX que se utilizan como canales de tráfico.

Se puede utilizar cualquier TRX para el BCCH, es más sólo se tiene que definir que el *channel group* cero tiene un sólo radio, el *channel group* 1 tiene 3 radios y el *channel group* 2 tiene 4 radios, como se muestra en la tabla VI. En esta tabla se indica que el TRX 0 es el del BCCH pero no necesariamente como se mencionó antes, puede ser cualquiera. Entonces se define que el *channel group* cero es el del BCCH y por lo tanto a este no se le puede definir *frequency hopping* ni control de potencia, en cambio al *channel group* uno y dos que son los de tráfico si se les puede definir *hopping* y control de potencia.

6.5.4. Cómo utilizar el *frequency hopping*

Luego de conocer un *channel group*, se asignan frecuencias o ARFCN a los *channel groups* para que trabajen con *frequency hopping*. En un sector puede haber varios *channel groups* y depende de la estrategia que se utiliza generalmente, se le asignan hasta 4 TRX a un *channel group* y el mínimo de TRX para un *channel group* es uno.

La cantidad de ARFCN que se le pueden asignar a un *channel group* depende de la cantidad de TRX que tenga asignados, en la tabla VII se muestran las cantidades de ARFCN recomendados para el número de TRX que existen en un *channel group*.

Se pueden definir otros tipos de reglas de asignación, como lo muestra la tabla VIII e incluso otras mas; todo depende de la experiencia y condiciones de tráfico de la red GSM, lo importante es no asignar una cantidad muy grande, de tal forma, que después ya no se tenga otras opciones de combinaciones de frecuencias, ya que, precisamente eso es lo que se hace, con las frecuencias restantes que no se utilizan para BCCH, se utilizan para formar grupo de ARFCN de 4,5,6,7,8,9,10 o más y estos grupos se asignan a cada *channel group*.

Tabla VII. Estrategia recomendada para asignar los ARFCN para los TCH

Número de TRXs	Número de ARFCNs
1	4
2	5
3	6
4	7

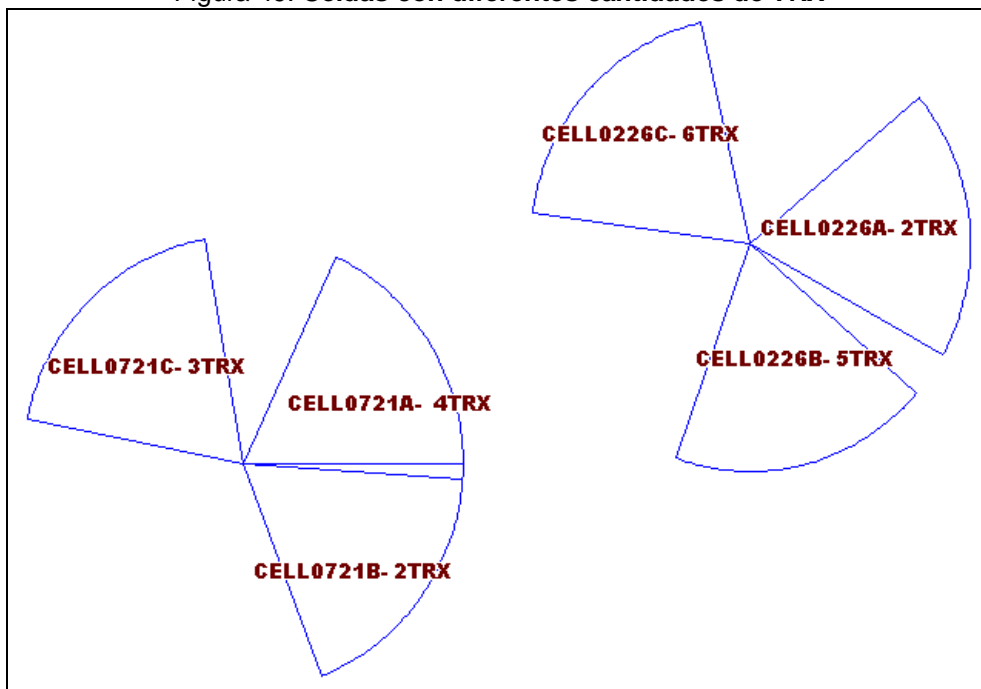
Tabla VIII. Otra forma de asignar el *hopping*

Número de TRXs	Número de ARFCNs
1	3
2	4
3	5
4	8

6.5.4.1. Formación de los grupos de ARFCN para los *channel groups*

Para comprender cómo se forman los grupos de frecuencias para los *channel groups* se basará en la figura 49, en donde se muestran 2 celdas de 3 sectores cada uno y sus respectivas cantidades de TRX por sector, como se sabe, por ejemplo, el sector CELL0721C tiene 3 TRX pero uno es del BCCH y los otros dos son de tráfico.

Figura 49. Celdas con diferentes cantidades de TRX



Fuente: Gráfica de MapInfo con celdas no reales

Del ejemplo anterior, se tienen 65 ARFCN, de los cuales se utilizaron 14 para los BCCH y, entonces, se tienen los ARFCN del 15 al 65 para TCH y con esto se forman los grupos de la siguiente forma.

- ✓ Las frecuencias de *hopping* se trabajan en conjunto con el MAIO y el HSN.
- ✓ En todos los sectores de una celda la asignación de frecuencias, MAIO y HSN deben asignarse de tal forma que se sincronicen y en ningún momento, los TRX de todos los sectores utilicen la misma frecuencia o frecuencias adyacentes.
- ✓ La anterior regla dice que en una celda se pueden asignar las mismas frecuencias a todos los sectores y para evitar que los TRX utilicen la misma frecuencia al mismo tiempo, se asignan correctamente los MAIO en cada sector.
- ✓ Es preferible que en una celda todos los sectores tengan el mismo valor de HSN, aunque es permitido que todos los sectores puedan tener valores diferentes de HSN.
- ✓ En un sector se pueden asignar frecuencias adyacentes.
- ✓ En todos los sectores no deben haber frecuencias iguales a los de los BCCH pero si pueden haber frecuencias adyacentes a los BCCH.
- ✓ En un sector la separación mínima es de 400 KHz, esto quiere decir que por ejemplo, al mismo tiempo se pueden utilizar el ARFCN 17 y 20, no así 17 Y 18 o 17 y 19, aunque, generalmente, esto depende de las especificaciones del equipo.

Teniendo como base estas reglas se comienza con el sector CELL0721C que tiene 2 TRX de voz o de tráfico, para esto se utiliza la tabla VII y, entonces, se tiene que asignar 5 ARFCN.

Al sector CELL0721C se desea asignar los ARFCN 15, 16, 17, 18 Y 19 y se ponen las mismas frecuencias a los tres sectores de esta celda, como se muestra en la tabla IX.

6.5.4.2. Asignación del MAIO

Se sabe que la cantidad de MAIO depende de la cantidad de TRX, por lo tanto, para el sector A se le asigna el MAIO de la siguiente forma.

- ✓ Los MAIO deben asignarse de tal forma que los TRX no utilicen las mismas frecuencias o sea que no haya co-canal entre los diferentes sectores de una celda.
- ✓ Los MAIO deben asignarse de tal forma que en todos los sectores los TRX no utilicen frecuencias adyacentes al mismo tiempo.
- ✓ La separación mínima en la asignación entre 2 MAIO consecutivos debe ser por lo menos 2 ARFCN esto quiere decir que si se utiliza el ARFCN 15 se tiene que utilizar el ARFCN 18 para el siguiente MAIO.

Tabla IX. ARFCN para los tres sectores de una BTS

SECTOR	TRXs	ARFCNs					
		15	16	17	18	19	20
CELL0721A	3	15	16	17	18	19	20
CELL0721B	1	15	16	17	18		
CELL0721C	2	15	16	17	18	19	

Teniendo en cuenta las anteriores reglas, se asignan los MAIO a estos sectores, se comienza con el sector A y se le asignan los valores 0, 2, 4 y se observa que en el sector A se viola una ley de la separación de ARFCN y, también se observa que a los sectores B y C no se les pueden asignar los MAIO sin violar las anteriores reglas. Entonces, lo que se tiene que hacer es asignar otras frecuencias a los sectores A, B y C para cumplir todas las reglas de la asignación de frecuencias y MAIO.

Tabla X. Configuración adecuada de MAIO y ARFCN en cada sector

SECTOR	Número de TRXs sin el BCCH	TIPO	POSICIONES POSIBLES DE MAIOs					
			0	1	2	3	4	5
CELL0721A	3	MAIO	0		2		4	
		ARFCN	15	18	21	24	27	30
CELL0721B	1	MAIO		1				
		ARFCN	31	32	33	34		
CELL0721C	2	MAIO	0				4	
		ARFCN	35	37	39	42	44	

En la tabla X se muestra una de muchas opciones que se podrían utilizar para cumplir todas las reglas de asignación de frecuencias y MAIO; la asignación de ARFCN para los TRX de los tres sectores no son co-canales ni adyacentes, entonces, como se puede ver, el MAIO es la asignación de los ARFCN para los TRX en los sectores.

6.5.4.3. Asignación de los HSN

Como se explicó anteriormente, los HSN se asignan de tal forma que en un grupo de BTS, los HSN se repitan pero muy lejos para evitar que dos celdas con el mismo HSN se puedan interferir si tuvieran la misma combinación de ARFCN y MAIO. Los HSN deben asignarse por BTS y no por sector, ya que, no se sabe si en algún momento, dos TRX utilizarán frecuencias adyacentes o co-canales, aunque el período sería muy corto, ya que se sabe que son 217 cambios por segundo.

Al asignar un HSN por BTS, es decir, que a los tres sectores de una BTS se le asignan el mismo HSN se está asegurando que no habrá choques de frecuencias, ya que los tres sectores de una BTS están sincronizados en tiempo.

Para sincronizar un grupo de BTS es necesario que se sincronicen por medio de GPS, pero en general en una red GSM las BTS no están sincronizadas, es decir, el reloj de una BTS es independiente de otra BTS y, por lo tanto, el tiempo cero de una BTS no, necesariamente, es el tiempo cero de otra BTS; por lo tanto mientras una BTS1 está en su tiempo T0, otra BTS2 está en otro tiempo totalmente desconocido por la BTS2.

Por lo tanto, la sincronización de MAIO y HSN no es posible en dos o más radiobases diferentes. Pero esto no quiere decir que hay problemas de choques entre dos BTS diferentes y en general al usar diferentes valores de HSN, la afectación de los choques de frecuencias o co-canales al mismo tiempo no es perjudicial porque son 217 cambios por segundo, lo que se tiene que hacer es tratar de utilizar diferentes frecuencias de *hopping* en los sectores de las BTS esto quiere decir formar grupo diferentes y hacer la asignación como se hizo para los BCCH.

6.6. Ejemplo de planes de frecuencias

Ahora que ya se sabe cómo realizar un plan de frecuencias, se diseñan los siguientes planes, en los cuales se hace todo desde la asignación de BCCH, BSIC, *Hopping*, MAIO y HSN.

6.6.1. Reuso variable

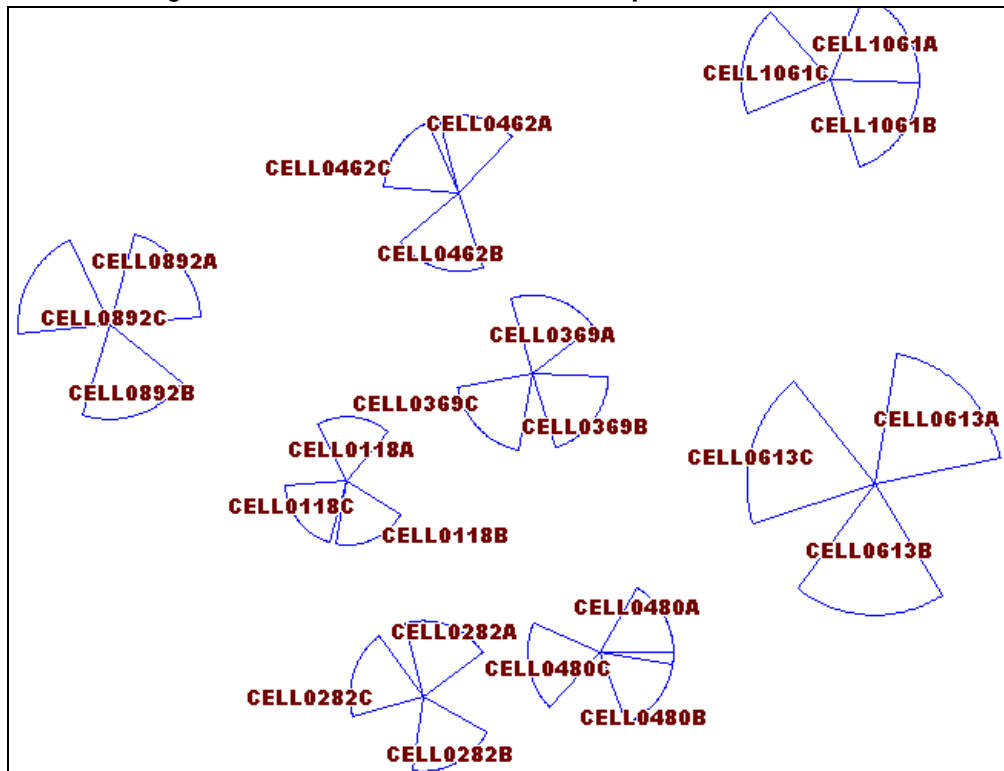
El reuso variable se refiere a que no se tiene ningún orden en la asignación de frecuencias para BCCH y tampoco para TCH, se asignan las combinaciones de frecuencias, según las condiciones del entorno de radio frecuencia.

Las BTS trabajan en la banda de 1800 y sólo se tienen disponibles los ARFCN del 512 al 550 o sea que en total son 39 ARFCN para las celdas y todas las BTS tienen tres radios por sector incluyendo el del BCCH, sólo está disponible el NCC = 0 para el BSIC.

Se comienza asignando los ARFCN para todos los sitios que en total son 24 sectores pero no se utilizarán 24 ARFCN, sino que, como se sabe, se tienen que reusar los ARFCN, de los 39 ARFCN se puede utilizar los primeros, los últimos, o cualquier rango dentro de los 39. Para este caso se utilizan los últimos. Se comienza asignando a todos los sectores los BCCH y se toma como base la celda CELL1061, al sector A se le pone el 550 al B 548 y al C 546 siguiendo el procedimiento ya aprendido, se asignan todos los BCCH a todos los sectores como se muestra en la figura 51.

Ahora se asignan los BSIC para todos estos sectores, como se sabe que sólo se tiene el NCC = 0, los BSIC son, por lo tanto: 01, 02, 03, 04, 05, 06 y 07 por lo que se siguen las reglas de asignación de BSIC y así, se obtiene la figura 52.

Figura 50. Distribución de celdas GSM para reuso variable



Fuente: Gráfica de MapInfo con celdas no reales

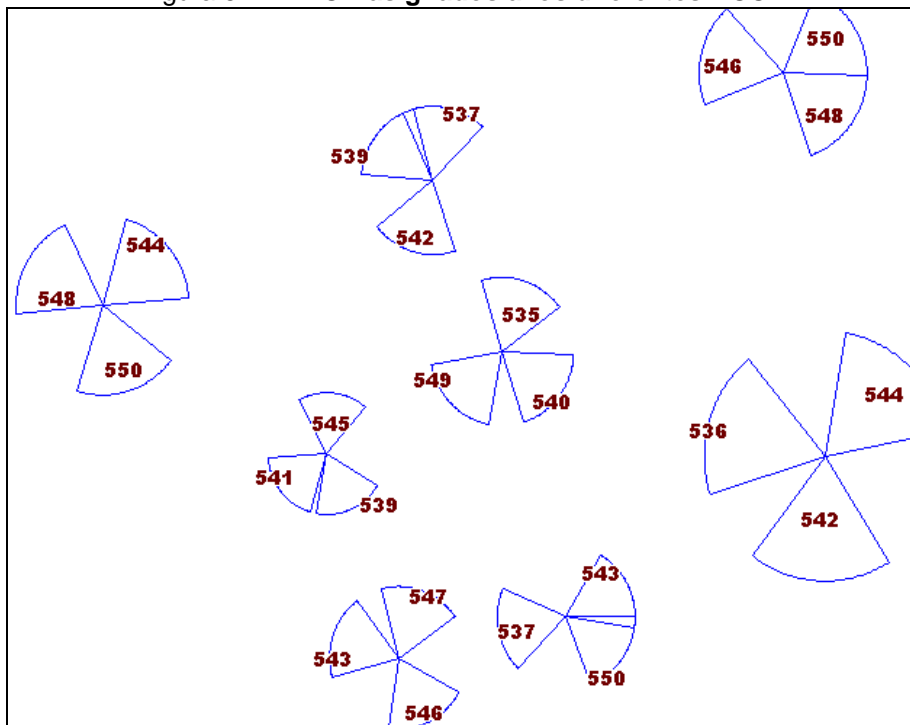
Ahora se asignan las frecuencias de *hopping*, de los 39 ARFCN, ya se utilizaron 16 para BCCH, por lo que sólo quedan 23 ARFCN para *hopping* que son los ARFCN del 512 al 534, lo que se hace es crear listas de *hopping* para cada sitio y, en cada sector, se asignan diferentes combinaciones de frecuencias para cada sector.

Siguiendo las reglas de formación del grupo de frecuencias y las reglas de MAIO, se forma la tabla XI, en la cual se pueden observar que se hicieron varias listas de frecuencias, utilizando las que se tenían, es decir, se están reusando.

Para cada sector se asigna diferente lista y si se tiene que utilizar la misma lista en otro sector, se hará pero teniendo el cuidado de que los sectores no se interfieran y, además, se utilizan diferentes valores de HSN para esos sectores.

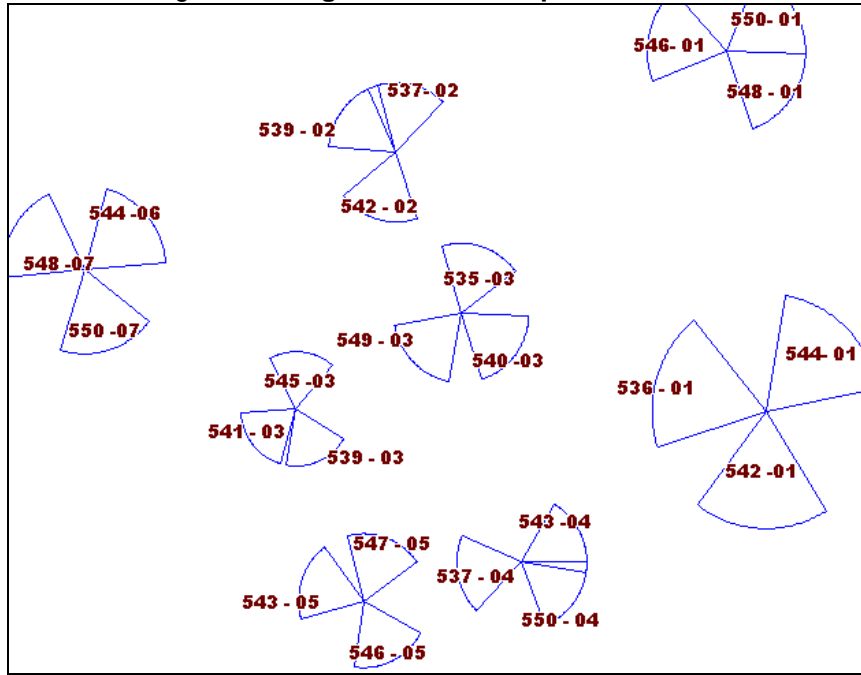
Para la asignación de HSN, sólo se tiene que asignar un número del 1 al 63 para cada sector y si se reutiliza, será para diferentes listas, en resumen, la combinación lista de *HOPPING* - HSN no debe repetirse muy cerca de otro sitio que tiene la misma combinación. Sólo se puede utilizar el mismo HSN, en sitio vecinos si tienen listas de frecuencias totalmente diferentes.

Figura 51. ARFCN asignados a los diferentes BCCH



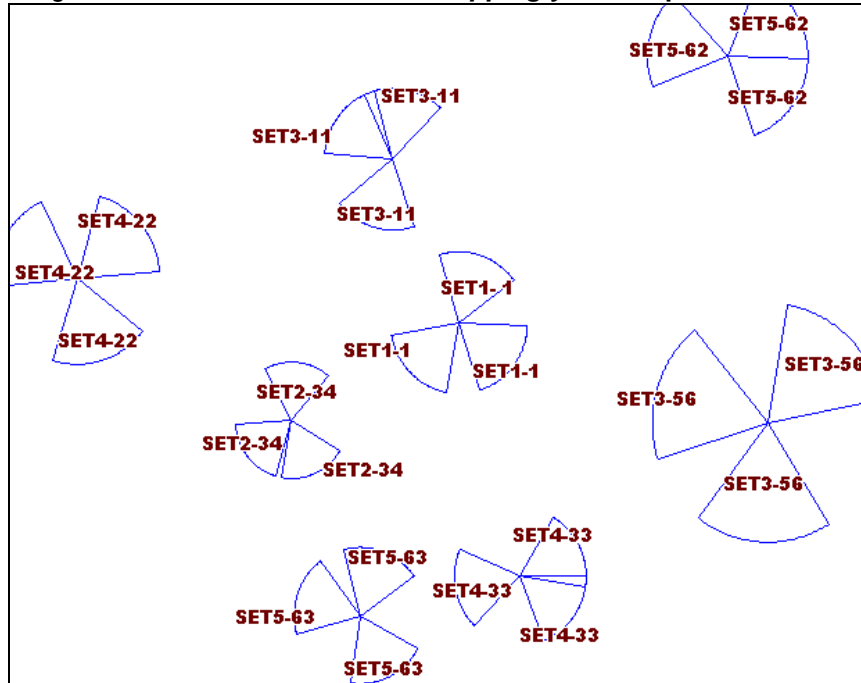
Fuente: Gráfica de MapInfo con celdas no reales

Figura 52. Asignación de BSIC para los BCCH



Fuente: Gráfica de MapInfo con celdas no reales

Figura 53. Set de frecuencias de hopping y el HSN para cada sitio



Fuente: Gráfica de MapInfo con celdas no reales

Tabla XI. Formación de grupos de frecuencias para hopping

Celdas con mismo SET		TIPO	MAIOs y ARFCNs para TCHs				SET
CELL0369A	CELL0480A	MAIO	0		2		SET 1
		ARFCN	512	514	516	518	
CELL0369B	CELL0480B	MAIO		1		3	
		ARFCN	519	521	523	525	
CELL0369C	CELL0480C	MAIO		1		3	
		ARFCN	526	528	530	532	
CELL0118A		MAIO	0		2		SET 2
		ARFCN	513	515	517	519	
CELL0118B		MAIO		1		3	
		ARFCN	520	522	524	526	
CELL0118C		MAIO		1		3	
		ARFCN	527	529	531	533	
CELL0462A	CELL613A	MAIO	0	1			SET 3
		ARFCN	524	527	530	533	
CELL0462B	CELL613B	MAIO			2	3	
		ARFCN	525	528	531	534	
CELL0462C	CELL613C	MAIO		1	2		
		ARFCN	526	529	532	512	
CELL0892A		MAIO	0	1			SET 4
		ARFCN	512	515	518	521	
CELL0892B		MAIO			2	3	
		ARFCN	513	516	519	522	
CELL0892C		MAIO		1	2		
		ARFCN	514	517	520	523	
CELL0282A	CELL1061A	MAIO		1	2		SET 5
		ARFCN	514	517	520	523	
CELL0282B	CELL1061B	MAIO	0	1			
		ARFCN	524	527	530	533	
CELL0282C	CELL1061C	MAIO			2	3	
		ARFCN	525	528	531	534	

En la figura 53 se puede ver las asignaciones del set de frecuencias y el respectivo HSN.

6.6.2. Reuso fijo

Para el reuso variable se trató de formar los grupos de frecuencias casi exclusivamente para cada sector, evitando usar las frecuencias muy cercanas, pero este tipo de asignación se vuelve un trabajo muy grande cuando son cientos de sectores y sólo se pueden hacer por medio de un programa de computadora.

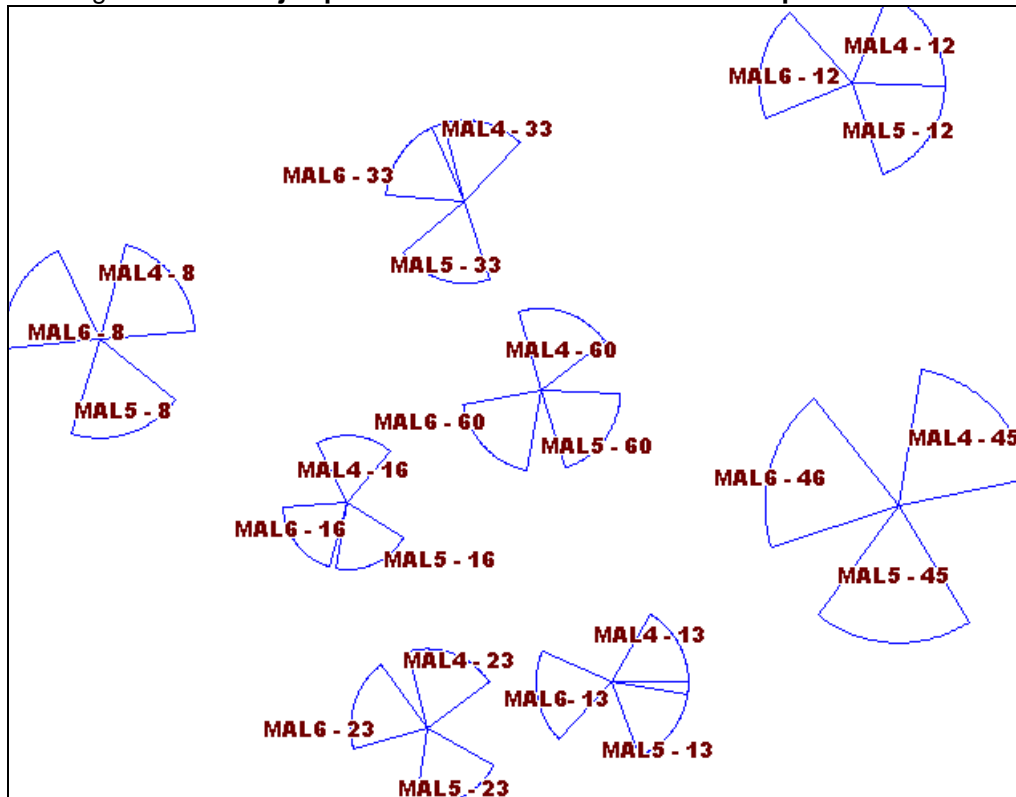
Para el reuso fijo se forman grupos de frecuencias dependiendo de la cantidad de radios que tenga el sector, es decir, se toman todas los ARFCN y se forman grupos llamados MAL, *Mobile Allocation List*, que por ejemplo de los 23 ARFCN, se forman las listas de la tabla XII, en la cual se muestran 12 MALs que se pueden utilizar no importando que BTS sea, la única condición es que se asigne el MAL al sector que corresponde de acuerdo con la cantidad de TRX que tiene.

La anterior estrategia es útil cuando se tienen que asignar frecuencias a cientos o hasta miles de sectores, ya que, fácilmente se puede hacer, pero tiene una desventaja, no es el óptimo y es menos eficiente que el reuso variable.

Tabla XII. MALs para la asignación fija de frecuencias para las BTS

MAL	SECTOR	TRX	LITA DE FRECUENCIAS								MAIO				
			512	515	518	521									
MAL1	A	1	512	515	518	521						0			
MAL2	B	1	513	516	519	522						2			
MAL3	C	1	514	517	520	523						0			
MAL4	A	2	512	515	518	521	524					0	1		
MAL5	B	2	513	516	519	522	525					2	3		
MAL6	C	2	514	517	520	523	526					0	1		
MAL7	A	3	512	515	518	521	524	527				0	1	2	
MAL8	B	3	513	516	519	522	525	528				2	3	4	
MAL9	C	3	514	517	520	523	526	529				0	1	2	
MAL10	A	4	512	515	518	521	524	527	530	533		0	1	2	3
MAL11	B	4	513	516	519	522	525	528	531	534		2	3	4	5
MAL12	C	4	514	517	520	523	526	529	532			0	1	2	3

Figura 54. MAL fijos para cada sector con HSN diferente para cada sitio



Fuente: Gráfica de MapInfo con celdas no reales

Haciendo la asignación respectiva se obtiene la figura 54, donde se muestra que todos los sectores A tiene el MAL4, todos los sectores B tiene MAL5 y todos los sectores C tienen el MAL6, la forma para evitar que los MAL4, MAL5 y MAL6 se interfieran, es asignándoles los HSN diferente a cada sector, con esto, se logra que no se interfieran mucho aunque si habrá interferencia y, como se mencionó, esta forma de asignación es deficiente con respecto al primero.

7. EQUILIBRO EN LA ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS

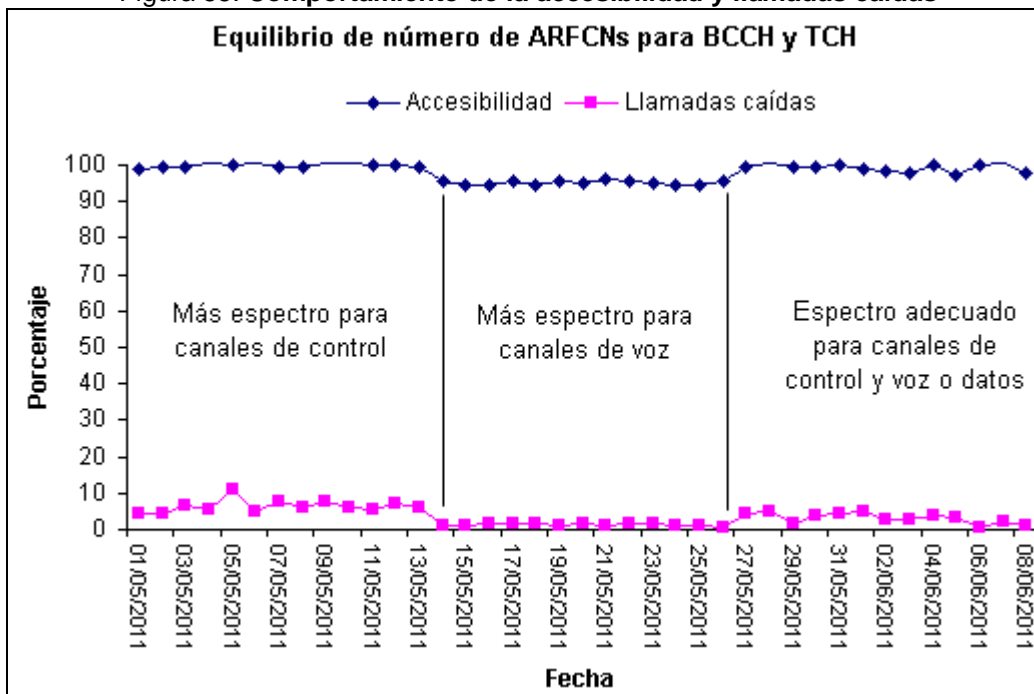
Como se ha observado, la cantidad de ARFCN del que se dispone, aunque se tengan todos los canales de la respectiva banda, no son suficientes para una red grande, ya que, generalmente, las redes GSM están compuestas por cientos de BTS que pueden ser 1, 2, 3 o más sectores, por lo tanto, el reuso de los ARFCN tanto para los canales de control como para los canales de voz deben ser eficientemente. Por tal motivo, es indispensable tener un criterio para definir cual es la cantidad óptima de ARFCN para canales de control.

7.1. Cuándo los canales de control tienen más espectro

Como se explicó en los capítulos anteriores, la interferencia afecta tanto a los canales de control como a los de voz (TCH). Cuando se le asigna un gran espectro a los canales de control, el reuso de los ARFCN disminuye, por lo tanto, disminuye la interferencia y, por consiguiente, el usuario puede acceder a la red GSM casi en cualquier condición de niveles de señal, *siempre que haya cobertura*, es decir, los usuarios que tiene bajos niveles de señal tendrán un buen nivel de C/I y C/A por que los reusos no son muy cercanos.

Cuando se le asigna mucho espectro a los canales de control, queda poco espectro para los canales de voz y, por consiguiente, el reuso de los ARFCN para TCH es muy alto y, por lo tanto, se tendrá una relación C/I y C/A muy bajo y después que la BTS le asigne el canal TCH al usuario; este tendrá problemas con la calidad de la llamada y el usuario sólo podrá tener una buena calidad de llamada cuando tenga buenos niveles de señal y los usuario que están en baja cobertura de señal, es decir, malos valores de potencia de la BTS, tendrán muchas llamadas caídas por mala calidad de señal o mucha interferencia.

Figura 55. Comportamiento de la accesibilidad y llamadas caídas



7.2. Cuándo los canales de voz tienen más espectro

Si a un plan de frecuencias se le asigna más espectro, a los canales de voz sucede todo lo contrario del caso anterior, debido a que los canales de control tienen poco espectro, por lo tanto, pocos ARFCN y el reuso será más cercano, debido a esto la interfaz de aire o canal tendrá una relación C/I y C/A muy bajo y, que es lo mismo, mucha interferencia haciendo que los usuarios que están en baja cobertura tengan problemas para acceder a una BTS o celda, sólo los que tiene una buena relación C/I podrán acceder a la celdas casi sin problemas.

Debido a que los canales de voz tiene más espectro, la calidad de una llamada o datos, estará mejor, *la mejoría depende de la cantidad de ARFCN*, es decir, una vez pasada la etapa de acceso cuando la celda le asigna un canal de voz al móvil del usuario, este canal tendrá muy poca interferencia por que los reusos no son muy cercanos, el resultado de esto los muestra la figura 55.

7.3. Equilibrio óptimo de espectro para canales de voz y control

Como se muestra en la figura 55, se debe tener un equilibrio para la cantidad de canales de control y de voz, pero para hacer esto se deben tener en cuenta varios aspectos.

- ✓ Cuáles son los índices o KPI que se requieren.
- ✓ Cantidad de sectores en la red.
- ✓ Cantidad de tráfico que maneja la red GSM.
- ✓ Cantidad de ARFCN disponibles.

Los valores óptimos de los KPI en el caso de la accesibilidad es 100 y para las llamadas caídas es cero, como se mencionó, pero puede ser que en la organización o los que dirigen la red GSM no tengan valores muy exigentes; por ejemplo, podría ser que el valor aceptado para la accesibilidad es 98% y para las llamadas caídas es 2%, por lo que si ya se tienen estos valores no es necesario hacer cambios para mejorar los KPI.

Es importante tener en cuenta la cantidad de sectores en la red por que si se tienen pocos sectores no se tendrán problemas para diseñar el plan de frecuencias. Por el contrario, si se tienen muchos sectores, cientos y hasta miles se tiene que hacer mucho trabajo para tener una red GSM con KPI aceptables.

La cantidad de tráfico que maneja una red GSM influye en la calidad de los KPI de la red, ya que, si no se tienen muchos usuarios no se generará mucha interferencia y, por lo tanto, los KPI estarán en los valores aceptables, pero cuando hay muchos usuarios y en muchos casos congestión en las radiobases la cantidad de interferencia que se genera es mucha y se tendrán KPI con valores no aceptables y se tendrá que trabajar mucho para mejorarlos.

No existe una fórmula que diga cuál es la cantidad adecuada de ARFCN para los canales de control, ya que, generalmente, se trabaja primero con los canales de control como se mostró en los capítulos anteriores. También en la accesibilidad influyen otros aspectos como la congestión y baja señal y por lo tanto, se puede llegar a un punto en que aunque se aumentan más los canales de control, la accesibilidad ya no mejora.

Como se observó en el capítulo anterior, se comienza trabajando con los canales de control y reutilizarlos lo más que se pueda o es lo mismo no utilizar muchos ARFCN para canales de control y utilizar el resto para canales de voz, después de que la red esté activa, es decir, con usuarios reales es cuando se pueden medir los KPI que, depende de la cantidad de usuarios o tráfico que maneja la red, posiblemente, en una red joven al no tener muchos usuarios se tendrán KPI con valores aceptables, pero, una vez que la red empieza a manejar más tráfico, los KPI se deteriorarán, por lo que, en el caso de que la accesibilidad está mal, se hace otro plan de frecuencias para BCCH agregando más ARFCN.

Para mejorar la accesibilidad se tienen que agregar más ARFCN, a la lista de ARFCN para BCCH que ya se tiene, se recomienda agregar pocos, es decir, por ejemplo se agregan 2 ARFCN más para los BCCH y con la nueva lista, se hace el plan de frecuencias y se mide los KPI, si aún se tiene mal la accesibilidad se pueden agregar otros 2 ARFCN y medir nuevamente los KPI, hasta llegar a un punto donde no se logran mejoras con más ARFCN

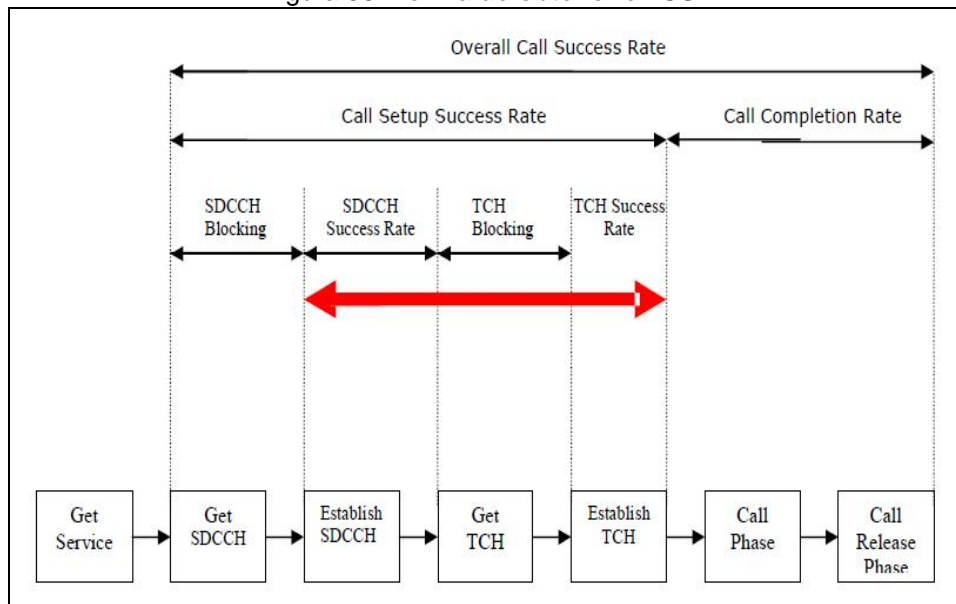
Al hacer el plan de frecuencias para BCCH, se obtienen cantidad típicas de ARFCN de, 14, 15, 17, 20 que son los mínimos para iniciar una red y, a partir de esos ir en aumento hasta obtener los valores de KPI deseados, tanto para la accesibilidad y la caída de llamadas.

8. KPI QUE MEJORAN AL REALIZAR UN BUEN PLAN

8.1. CSR

EL CSR, *Call Success Rate*, es un KPI que toma en cuenta otros KPI y por lo tanto, es un indicativo de la calidad de servicio que se le da al usuario. Como se puede ver en la figura 56, el CSR es una multiplicación de todo los KPI que tienen que ver desde que el usuario genera una llamada hasta que el usuario deja de usar la red y termina la conexión. Por consiguiente, si alguno de estos KPI no tienen valores aceptables el valor de CSR tampoco tendrá valores aceptables. Por lo tanto, para mejora el CSR cuyo valor va de 0% a 100% y 100% es el valor óptimo, es necesario trabajar y mejorar todos los procesos que conlleva realizar una llamada o conexión de datos, para que el cliente este satisfecho con el servicio. En el CSR están incluidos las accesibilidades y las llamadas caídas y, también, las desconexiones en SDCCH, así como los diferentes bloqueos de los servicios, tanto de canales de control como de voz.

Figura 56. Forma de obtener el CSR



Fuente: White paper. **Get a Grip On Your Network**

8.2. SDCCH drop

El TRX que lleva el BCCH tiene ocho *timeslots* y el *timeslot* cero está ocupado por el BCCH, existe una configuración que puede ser que en el *timeslot* cero pueda existir una combinación BCCH Y cuatro SDCCH denotado por SDCCH/4 y también pueden estar otros 8 SDCCH en los *timeslots* diferente de cero del TRX que lleva el BCCH; también, por demanda, se pueden poner canales de control SDCCH en cualquiera de los *timeslots* de los TRX destinados, exclusivamente para TCH. Ocho SDCCH solo ocupan 1 *timeslot* del TRX. Por lo tanto, en un TRX de 8 *timeslots* se puede tener 64 SDCCH o 8 canales TCH. Ocho SDCCH se denotan por SDCCH/8 y la cantidad máxima depende de la cantidad de TRX que tiene el sector y depende de la licencia para el uso de los mismos vendido por el fabricante.

Debido a que el SDCCH puede estar en el TRX del BCCH y los TRX de TCH, estos canales de control son afectados por la interferencia. Por lo tanto, si hay un desbalance en la planeación de ARFCN, este KPI se verá seriamente afectado y debido a la interferencia que experimentan no podrán completar su función que es asignar un canal TCH al usuario y, por lo tanto, se produce un evento de desconexión en SDCCH, pero, también la accesibilidad en SDCCH se verá afectada por la misma interferencia.

Tabla XIII. Una configuración típica para BCCH y SDCCH

TRX	Timeslots							
	0	1	2	3	4	5	6	7
TRX0	BCCH	TCH	SDCCH	TCH	TCH	TCH	TCH	TCH
TRX1	SDCCH	TCH	TCH	TCH	TCH	TCH	TCH	TCH
TRX2	SDCCH	TCH	TCH	TCH	TCH	TCH	TCH	TCH
TRX3	SDCCH	TCH	TCH	TCH	TCH	TCH	TCH	TCH

8.3. TCH drop

Este es uno de los KPI que mejor refleja el éxito de un buen plan de frecuencias, ya que, al implementar un buen plan de frecuencias disminuye la interferencia y, por ende, mejoran los desempeños de los *handovers* y disminuyen las llamadas caídas por mala calidad de la señal.

Como se puede ver en la tabla XIII todos los TRX tienen canales TCH o de tráfico y por consiguiente si el TRX del BCCH no tiene interferencia, pero los otros TRX si, sólo los usuarios que están en el TRX del BCCH tendrán una buena calidad, pero el resto que son la mayoría tendrán muy mala calidad.

De lo demostrado en esta sección se concluye: es muy importante hacer un buen plan de frecuencias para que todos los ARFCN, tanto destinados para BCCH como para TCH no tengan interferencia.

9. SOFTWARE DE PLANEACIÓN DE FRECUENCIAS

En la actualidad, debido al gran número de celdas que tiene una red GSM y para facilitar el trabajo del ingeniero, existen varios programas para computadora que pueden ejecutar un plan automático de frecuencias, se encuentran desde los que utilizan algoritmos simples hasta los que utilizan algoritmos complejos, pero cada uno tiene su propia forma y algoritmo propio para trabajar. Pero, de cualquier manera, estos programas necesitan de ingenieros expertos en el tema de planeación de frecuencias, ya que, no cualquiera puede utilizarlos porque se necesita conocer varios parámetros que en los capítulos anteriores se han tratado, como por ejemplo: la forma de asignar los BCCH, el *HOPPING*, MAIO, HSN y, en general, todo acerca de planeación de frecuencias. También el resultado de estos programas tiene que ser analizado por los ingenieros para ver si tiene lógica y hacer sugerencias si se ven problemas en el plan. Además el resultado de estos programas aunque tiene un resultado excelente, a veces hay que hacer ajustes manuales en casos especiales, pero son ajustes finos que realiza el ingeniero, en general, el resultado es muy bueno. Esto no indica que no se lleve a cabo el planeamiento manual, casi siempre este debe realizarse, cuando se necesita realizar un plan de frecuencias para expansiones de TRX o implementación de un nuevo sitio.

9.1. Programas que utilizan predicciones de coberturas

Algunos programas de computadora utilizan predicciones de cobertura de BTS para realizar un plan automático de frecuencias, las predicciones de cobertura son básicamente eso, predicciones que dan los niveles de potencia con la cual llegan los sectores de las BTS en cualquier punto en un determinado rango de distancia. Para que estos programas funcionen correctamente se le debe ingresar los siguientes datos.

- ✓ Configuración de los sitios, altura, modelo de antena, acimut, inclinación de antena y coordenadas geográficas de las antenas.
- ✓ Los archivos de patrones de radiación de los modelos de antenas que utilizan los sitios; estos patrones de radiación son archivos que los proporciona el fabricante de las antenas.
- ✓ Mapa de alturas del terreno de donde se quiere realizar el plan.
- ✓ Configuración de la capacidad del sitio, cuantos TRX tiene cada sector.
- ✓ Tráfico que maneja cada sector.
- ✓ La estrategia de colocación de frecuencias.
- ✓ La base de datos con las diferentes capas (BCCH, TCH) y los conjuntos de ARFCN requeridos para cada celda.
- ✓ Matriz de costo, con los costos de separación de los ARFCN especificados, *intra-cell*, *intra-sitio*, *handovers con ARFCN adyacentes*.
- ✓ Tabla de interferencia.
- ✓ *Handovers* y sus reglas de excepciones.

La matriz de costo no es de costo monetario, sino es una matriz a la que se le asignan valores y estos valores, los valores la degradación que sufriría el plan si se aplicará la restricción asociada al costo, por ejemplo, dejar frecuencias co-canales en los BCCH de un sitio tiene un costo muy elevado. El costo total para el plan es:

- ✓ La suma de los costos asociados al no cumplir las restricciones de separación entre los ARFCN.
- ✓ La cantidad de interferencia, *Área y/o tráfico*, en la red como derivado de la tabla de interferencia

La tabla de interferencia acumula la interferencia que resultaría si todas las celdas en la red les fueran colocadas el mismo ARFCN o adyacente. La tabla de interferencia puede acumular valores en términos de área o tráfico, usando los datos de cobertura y tráfico. Para crear una tabla de interferencia debe haber una predicción de mejor servidora y, a partir de eso, se calcula la relación C/I de la mejor servidora contra las otras señales que llegan a ese punto.

Algunos de estos programas generan la matriz de interferencia de ellos mismo, en caso de que el programa no lo pudiera realizar, se tiene que generar la matriz de interferencia con algún otro programa y, luego, importarlo al programa donde se realizará la planeación automática de frecuencias. En estos casos ya no se tienen que ingresar los siguientes datos que sirve para calcular la matriz de interferencia:

- ✓ Configuración de los sitios, altura, modelo de antena, acimut, inclinación de antena y coordenadas geográficas de las antenas.
- ✓ Los archivos de patrones de radiación de los modelos de antenas que utilizan los sitios, estos patrones de radiación son archivos que los proporciona el fabricante de las antenas.
- ✓ Mapa de alturas del terreno de donde se quiere realizar el plan.

El resultado de estos programas depende de lo que se le ingresa, ya que si se le ingresan mal los valores o colocarles malos valores en la matriz de costos dará un mal resultado. Es decir para tener buenos resultados se tienen que ingresar todos los valores correctamente y realizar varias pruebas para ver cual de todos los resultados se ve mejor.

Para generar la matriz de interferencia estos programas utilizan las predicciones de cobertura y calculan con que potencia llegan a cada punto de un mapa y de esa forma calculan la relación C/I.

9.2. Programas de utilizan estadísticas móviles

Otros programas utilizan estadísticas móviles para realizar planes de frecuencias, en general todos las redes GSM, además de los contadores, acumula datos como el nivel de potencia con la cual se conectan los móviles (MS), el nivel de señal que recibe la BTS de los móviles, el nivel de señal que reciben los móviles de las BTS (RxLev), la calidad de la señal recibida (RxQual), la mejor candidata para *handover*, el tráfico de cada sector. Todos estos valores son acumulados en unos archivos tipo binarios. A estos programas es necesario ingresarles los siguientes datos.

- ✓ Coordenadas geográficas de todos los sitios.
- ✓ Acimut de todos los sitios.
- ✓ Configuración de todos los sitios, cantidad de TRX.
- ✓ Archivo binario (BAR)
- ✓ Archivo binario (MRR)
- ✓ Tráfico de cada sector.
- ✓ Rango de ARFCN para BCCH.
- ✓ Rango de ARFCN para TCH.
- ✓ Estrategia de asignación, TRX+2, TRX+3 etc.
- ✓ Restricciones de asignación, *BCCH co-canales*, *handovers co-canales*, *frecuencias adyacentes*.
- ✓ Matriz de costos si incumple las restricciones.

Los algoritmos que utilizan estos programas consiste en que analiza todos los sectores se les asigna frecuencias a todos y el grado de interferencia que calcula que debe dejarle a cada sector, además de otros parámetros, toma en cuenta la cantidad de tráfico que maneja el sector. Es decir, que a un sector que maneja muy poco tráfico tiene bajo peso y un sector que tiene mucho tráfico tiene más peso y, por lo tanto, tratará de dejar un mejor plan al sector que tiene más tráfico que al que tiene menos.

La forma de cómo calcular la interferencia es que a un MS que está conectado a una BTS, también le llegan señales de otras BTS con las cuales no está conectado y calculan la relación de C/I de la señal principal o sea la BTS con la que está enganchado la MS contra todas las demás señales. Es decir, que, por ejemplo, a una BTS de 2 sectores, se calcula la relación C/I del sector 1 sobre el sector 2, si el móvil está conectado al sector 1, aunque no tengan la misma frecuencia.

Esta relación C/I resultaría si tuvieran la misma frecuencia, para hacerlo estos programas necesitan el BCCH y BSIC para identificar a cada sector y por lo tanto esta combinación tiene que ser única en el sistema.

El resultado final de estos programas es muy bueno, aunque tienen que ser analizados por ingenieros expertos para ver si es aplicable a la red GSM. Estos programas tienen muchas opciones con las cuales se puede trabajar, se pueden asignar frecuencias por *channel group*, por sector y otros y el resultado puede ser implementado inmediatamente, ya que, generan archivos de texto que son fácilmente aplicables a la red sin ninguna modificación. Los pasos que, generalmente, siguen estos programas son:

- ✓ importar los datos
- ✓ modelar
- ✓ optimizar

Archivo binario BAR, BA list Recording: este archivo contiene información de todos los sectores y los niveles de señal que les llegan de otros sectores, este archivo es utilizado por los programas para crear un modelo en la optimización de frecuencias.

Archivo binario MRR, Measurement Result Recording: este archivo contiene información de RxLev, RxQual y tráfico y, también, es utilizado por estos programas para crear un modelo y predecir la posible mala calidad que podría tener un sector. RxLev es la potencia recibida por el móvil en dBm y RxQual es la calidad de la señal recibida y los valores van de 0-7 un valor 0 significa que tiene una excelente calidad y valor 7 significa que tiene una calidad muy mala y esta muy interferida. Los valores aceptables de RxQual son de cero a cuatro y los valores malos van de cinco a siete.

Los archivos BAR Y MRR son la herramienta principal de estos programas y sin los cuales no funcionarían, por lo tanto, estos archivos tienen que ser recolectados adecuadamente, estos archivos tienen que ser programados para que se generen, para que estos programas den un buen resultado, los archivos BAR y MRR se tienen que recolectar en un mínimo de 5 días, estos archivos utilizan el BCCH y BSIC para determinar el sector, por lo que no es recomendable cambiar estos valores durante los período de recolección, tampoco deben de haber problemas en la red. En resumen, estos archivos deben ser recolectados en condiciones normales de la red.

Los archivos MRR y BAR tienen que ser programados para su recolección, se debe definir el tiempo que deben recolectarse, generalmente se programan para que empiecen a recolectar datos en las hora de alto tráfico.

CONCLUSIONES

1. La teoría básica de la propagación de las ondas electromagnéticas es un tema que el ingeniero de planeación de frecuencias debe saber.
2. Un ingeniero de planeación de frecuencias debe conocer los diferentes términos que definen una antena, como el tipo de polarización y patrón de radiación.
3. Utilizar una cantidad mínima de frecuencias (ARFCN) para los canales de control para obtener un valor de accesibilidad establecido.
4. Los algoritmos o “*features*” ayudan a disminuir el efecto dañino de la interferencia en una red GSM.
5. El “*frequency hopping*” sintetizado es mejor que el de banda base, por que se le pueden colocar más de una frecuencia por radio (TRX) mientras que el de banda base solo se le puede colocar una frecuencia por radio.
6. El conocimiento de la topografía del terreno es importante al realizar un plan de frecuencias.
7. Una planeación de frecuencias de reuso variable es mejor que el reuso fijo, porque en el reuso variable se produce menos interferencia.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un plan de frecuencias, tomando en cuenta los sitios nuevos que están proyectados a corto plazo, para que entren en servicio con las frecuencias apropiadas.
2. Revisar todas las estadísticas de los sitios, después del cambio de las frecuencias, para corregir problemas del nuevo plan implementado.
3. Asignar el mismo valor de HSN para todos los sectores de una radio base.
4. Se debe realizar un plan de frecuencias global en la red GSM por lo menos cada 6 meses, ya que, el comportamiento de los usuarios cambia.
5. Limitar el uso de las antenas de patrón de radiación horizontal de 360°, ya que, con estas antenas es difícil el control de las interferencias.
6. El cambio de frecuencias se debe realizar en las horas de bajo tráfico, porque afecta la calidad del servicio mientras se cambian las frecuencias.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bernhard H. Walke, Stefan Mangold, Lars Berlemann. **IEEE 802 Wireless Systems**. John Wiley & Sons Ltd, 2006.
2. Digital Engineering Library. **CDMA CAPACITY AND QUALITY OPTIMIZATION**. The McGraw-Hill Companies, 2004.
3. ERICSSON. **GSM SYSTEM SURVEY**. *Student text*, 2005.
4. ERICSSON. **GSM RADIO NETWORK FEATURES**. *Ericsson Telecommunication*, 2002.
5. ERICSSON. **GSM CELL PLANNING PRINCIPLES 2**. *Ericsson Radio System AB*, 2003.
6. John S. Seybold. **INTRODUCTION TO RF PROPAGATION**. John Wiley & Sons, Inc, 2005.
7. Mehmet BEYAZ. **About Network Performance Monitoring & Benchmarking In a Fast Changing Environment**. TTG Uluslararsi, LTD, 2006.
8. Peter Stavroulakis. **Interference Analysis and Reduction for Wireless Systems**. ARTECH HOUSE, INC. 2003.
9. Praphul Chandra. **Bulletproof Wireless Security GSM, UMTS, 802.11 and Ad Hoc Security**. Elsevier Inc. 2005.
10. Riaz Esmailzadeh. **Broadband Wireless Communications Business**. John Wiley & Sons, Ltd, 2006.

E-GRAFÍA

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/hernandez_c_a/capitulo3.pdf. Consultado en: mayo 2010.

<http://www.answermath.com/Electricity/z-electrostatica-18.htm>. Consultado en: mayo 2010.

<http://www.kathrein-scala.com/catalog/84010109.pdf>. Consultado en: mayo 2010.

http://webpages.ull.es/users/amanza/SCT/S18_Teoria.pdf. Consultado en mayo: 2010.

<http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/pm-phase-modulation/what-is-gmsk-gaussian-minimum-shift-keying-tutorial.php>. Consultado en: mayo 2010.

http://wireless.agilent.com/rfcomms/refdocs/gsmgprs/gen_bse_cell_band.php#BABCEHAJ. Consultado en: mayo 2010.

<http://www.fortunecity.com/millennium/berkeley/85/gsm/index.htm>. Consultado en: mayo 2010.