



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

**MÉTODO DE ESTUDIO DE RADIOFRECUENCIA
PARA REPETIDOR CDMA**

Juan Carlos Montenegro Pérez

Asesorado por: Ing. Jorge Álvarez

GUATEMALA, MAYO DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MÉTODO DE ESTUDIO DE RADIOFRECUENCIA PARA REPETIDOR
CDMA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JUAN CARLOS MONTENEGRO PÉREZ

ASESORADO POR: Ing. Jorge Álvarez

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, mayo de 2005

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:

MÉTODO DE ESTUDIO DE RADIOFRECUENCIA PARA REPETIDOR CDMA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha 29 de septiembre de 2002.

Juan Carlos Montenegro Pérez

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodriguez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godinez
EXAMINADOR	Ing. Manuel Barrera
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares Peñate
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

DEDICO ESTA TESIS

A DIOS NUESTRO SEÑOR

Que me da la vida, salud y fuerza para alcanzar mis metas

A MIS PADRES

Gladis Pérez Reyes de Montenegro

Arnoldo Montenegro Rivas

Por darme la oportunidad de forjar un futuro y compartir sus sabios consejos.

A MI ESPOSA

Ana Gabriela Ordoñez Camey

Por su amor y apoyo incondicional.

A MIS HERMANOS

Eduardo, Carlota Jeannette, María Lucrecia y María Isabel.

A MI FAMILIA

En especial a mi tía Luz Adelaida y mi tío Juan Francisco.

Mi abuelito Juan Francisco Pérez Ramírez (Q.E.P.D.).

Mis sobrinos José David, María José, Francisco José y Damaris.

A MI SUEGRA Y CUÑADOS

A MIS AMIGOS

Por su incondicional amistad

Y A LA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

ÍNDICE GENERAL

	Pag.
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	4
GLOSARIO	6
OBJETIVOS	8
RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN	10
1. ENLACE MÓVIL-RADIO BASE	
1.2 Parámetros de enlace	12
1.3 Balance de enlace	13
1.3.1 Potencia efectiva isotrópica radiada	14
1.3.2 Pérdidas por cables y conectores	15
1.3.3 Ganancia de antena	16
1.3.4 Sensibilidad de recepción	17
1.3.5 Tasa de error de trama	18
1.4 Fiabilidad de cobertura	18
1.4.1 Pérdidas por penetración	20
1.4.2 Margen de desvanecimiento	20
1.4.3 Pérdidas en espacio libre	21
1.4.3.1 Reflexión	21
1.4.3.2 Propagación en espacio libre	22
1.5 Ganancia de <i>Handoff</i>	22
1.5.1 <i>Handoff</i>	22
1.5.2 Ganancia de <i>hard handoff</i>	23
1.5.3 Ganancia de <i>soft handoff</i>	24

1.6	Piloto EIRP	25
1.7	Requerimientos de enlace inverso	25
1.8	Margen de interferencia	26
1.9	Enlace sitio de celda – móvil	27
1.9.1	Enlace inverso	27
1.9.2	Balance de enlace inverso	28
1.9.3	Balance de enlace hacia delante	28
2.	GENERALIDADES DEL REPETIDOR CDMA	
2.1	Ortogonalidad	29
2.1.1	Ortogonalidad en enlace inverso	29
2.1.2	Ortogonalidad en el enlace hacia delante	30
2.1.3	Códigos PN	30
2.2	Repetidor CDMA	31
2.3	Tipos de repetidores	33
2.3.1	Repetidor de fibra óptica	33
2.3.2	Repetidor de aire	35
2.4	Configuración de repetidores	37
3.	ANÁLISIS EN RF DE REPETIDOR CDMA	
3.1	Introducción	41
3.2	Estudio de campo	41
3.3	Evaluación del sitio repetidor	42
3.4	Análisis del sitio de celda donador	45
3.4.1	Estadísticas de sitio donador	46
3.4.2	Perfil de línea vista	47
3.5	Estudio de potencia	48
3.5.1	Potencia de enlace	49
3.5.2	Test de aislamiento	52
3.5.3	Aislamiento por separación horizontal	54
3.5.4	Separación vertical de las antenas	55

3.5.5	Factibilidad de enlace	56
3.6	Estudio de propagación	56
3.6.1	Análisis de propagación	56
3.6.2	Propagación del repetidor utilizando divisor de potencia	57
4.	OPTIMIZACIÓN DEL REPETIDOR	
4.1	Introducción	59
4.2	Parámetros de optimización	59
4.2.1	Proceso de optimización	60
4.2.2	<i>Drive test</i> y declaración de vecinos	61
4.3	Análisis de información recolectada	63
4.4	Análisis de desempeño	65
5.	FACTIBILIDAD DE APLICACIÓN DEL MÉTODO	
5.1	Introducción	69
5.2	Análisis de repetidor de Conguaco	70
5.3	Conclusiones	75
5.4	Análisis de repetidor Xenacoj	76
5.4.1	Introducción	76
5.4.2	Estudio de campo	76
5.4.3	Análisis de propagación	77
5.4.4	Optimización	79
5.4.5	Estadísticas de celda donadora Sumpango	80
5.5	Conclusiones	84
6.	ANÁLISIS DE COSTO DE OPORTUNIDAD	
6.1	Introducción	85
6.2	Parámetros de consideración	85
6.3	Ahorro de recursos	88
6.4	Evaluación de costos por error	91
	CONCLUSIONES	96

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

	FIGURAS	Pág.
1	Enlace móvil-radio base	12
2	Pérdidas por cables y conectores	16
3	Margen de desvanecimiento vs. fiabilidad de borde de celda	19
4	Margen de <i>handoff</i>	23
5	Margen de <i>soft handoff</i>	24
6	Margen de interferencia vs. porcentaje de carga	26
7	Sistema con un repetidor CDMA	32
8	Repetidor de fibra óptica	34
9	Sistema de repetidor aéreo	37
10	Configuración dual	38
11	Configuración vertical	38
12	Configuración de antenas duales	39
13	Configuración de repetidores en cascada	40
14	Enlace punto – punto	46
15	Perfil de línea vista	48
16	Alineación perfecta entre sector donador y antena donadora	50
17	Análisis de potencia proporcional de no alineación	51
18	Repetidor en retroalimentación infinita	52
19	Aislamiento por separación horizontal en tanques de agua	54
20	Separación vertical de antenas utilizando escudo de aislamiento	55

Método de Estudio de Radiofrecuencia para Repetidor CDMA

21	Prueba de potencia de señal en la población de Santo Domingo	63
22	Cantidad de intentos de llamadas	66
23	Porcentaje de llamadas completadas	67
24	Porcentaje de llamadas caídas	68
25	Porcentaje de fallas de acceso	68
26	Intentos de llamadas del sitio de celda Jalpatagua	71
27	Procesamiento del sitio de celda Jalpatagua	71
28	Porcentaje de llamadas caídas del sitio de celda Jalpatagua	72
29	Porcentaje de fallas de accesos del sitio de celda Jalpatagua	73
30	<i>Drive test</i> realizado en Conguaco	74
31	Línea vista Sumpango-Xenacoj	78
32	<i>Drive test</i> realizado en Santo Domingo Xenacoj	80
33	Intentos de llamadas del sitio de celda Sumpango	81
34	Porcentaje de procesamiento del sitio de celda Sumpango	82
35	Porcentaje de llamadas caídas del sitio de celda Sumpango	83
36	Porcentajes de fallas de acceso del de celda Sumpango	84
37	Diagrama de flujo del método de estudio de radiofrecuencia para repetidor CDMA	89

GLOSARIO

Aislamiento	El aislamiento entre antenas es la pérdida medida en dB desde el puerto RF I/O de la antena donadora o de servicio al puerto RF I/O de la otra antena.
Antena donadora	Antena ubicada en el sitio repetidor, cuya función es captar la señal piloto de la estación base que será donador.
Canal piloto	Secuencia directa de señal de espectro extendido transmitido continuamente por cada sector de cada estación base CDMA. También provee referencia en momento y fase.
CDMA	Es un concepto de acceso múltiple que se basa en el uso de técnicas de espectro extendido de banda ancha, y que permite la separación de señales que coinciden en tiempo y frecuencia.
Celda donadora	También conocida como estación base donadora, en la cual uno de sus sectores servirá de donador hacia el repetidor.
Celda vecina	Estaciones base cuyos pilotos asociados a los canales de CDMA son probables candidatos para realizar <i>handoff</i> .
dBm	Medición de potencia expresada en términos de su razón (en dB) a un miliwatt.

Método de Estudio de Radiofrecuencia para Repetidor CDMA

<i>Drive testing</i>	Consiste en la recolección de datos de señal de radiofrecuencia, provenientes de estaciones base, mediante el uso de antenas, receptor GPS, equipo celular y computadores, para analizarlos y determinar el comportamiento del sistema.
Falla de acceso	Si el enlace de radio de una llamada falla antes que el móvil envíe el mensaje de conexión completa al servicio, se considera como intento fallido de acceso al sistema.
<i>Handoff</i>	Es el proceso de transferencia de una llamada celular activa de una celda a otra.
Llamada caída	Si el enlace de radio de una llamada falla después que el móvil envíe el mensaje de conexión completa al servicio, se considera como llamada caída.
Modelos de Propagación	Son modelos que se utilizan para predecir pérdidas por trayectoria desde un transmisor a un receptor en RF; modelo de espacio libre, Lee y Hata; dichos modelos difieren en sus metodologías, sin embargo, todos tienen como parámetro crítico la distancia entre el transmisor y el receptor.
Repetidor RF CDMA	Es un equipo de radiofrecuencia pasivo cuya función es extender la cobertura de señal de una estación base hacia regiones de escasa o nula cobertura.
RF	Radio Frecuencia. Energía electromagnética del rango de frecuencia justo por encima de frecuencias audibles.
Sector donador	Sector perteneciente a una estación base donadora, cuya señal piloto será entendida por un repetidor.

OBJETIVOS

GENERALES

1. Presentar generalidades acerca del repetidor CDMA.
2. Mostrar que una planificación adecuada previene el mal empleo de recursos.
3. Elaborar un documento de consulta que sirva de apoyo para otros estudios en telecomunicaciones.

ESPECÍFICOS

1. Presentar información técnica del repetidor CDMA en forma sencilla.
2. Sentar la base para un estudio de radiofrecuencia para repetidor CDMA.
3. Mostrar la ventaja del uso del método propuesto mediante el ahorro de recursos.
4. Demostrar técnica y estadísticamente las diferencias de los resultados finales de un sitio repetidor, con y sin estudio previo.
5. Exponer la importancia de combinar el trabajo de campo con el trabajo administrativo para una planificación adecuada.
6. Brindar las bases para determinar la factibilidad de la instalación de un sitio repetidor.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación consta de 6 capítulos, los cuales se desarrollan conforme a un método de estudio propuesto que permita realizar adecuadamente estudios de radio frecuencia para repetidores celulares PCS. Este documento puede ser aplicable o ser utilizado para estudios de radiofrecuencia de estaciones base celulares PCS o enlaces de microondas.

Los primeros dos capítulos son un resumen de los fundamentos necesarios en CDMA y de repetidores PCS, necesarios para comprender técnicamente el desarrollo del método.

El tercer capítulo se refiere a la parte inicial del método propuesto, esta es la parte de investigación de campo, donde se establecen parámetros iniciales que servirán para evaluar objetivamente la ubicación de un sitio repetidor. También se hace referencia a algunas consideraciones de instalación final y puesta en servicio del repetidor.

El cuarto capítulo explica el proceso de optimización del sitio, luego de puesto en servicio el repetidor. Esta parte es una mezcla de pruebas de potencia en señal celular y posterior análisis estadístico del funcionamiento del equipo en la red celular. El quinto capítulo es una aplicación del método desarrollado en los capítulos anteriores, es una comparación de un sitio repetidor al que no se le realizó un estudio de radiofrecuencia adecuado y las consecuencias que esto representa en el desempeño de la red; por otro lado, se analiza otro sitio repetidor al que se le realiza un estudio adecuado y por consiguiente, su buen desempeño en la red.

La última parte es un análisis de las implicaciones económicas que conlleva el mal desempeño de la red celular dado por un sitio repetidor.

INTRODUCCIÓN

Todo proyecto debe estar fundamentado sobre la base de un método que permita seguir un camino que ayude a minimizar pérdidas en recursos y a la vez aprovechar al máximo el tiempo y el dinero.

En las telecomunicaciones, si no se cuenta con una planificación adecuada en la que se consideren aspectos de riesgo o dificultad, ya sea por trámites administrativos o negociaciones que requieran mucho tiempo o la consideración de recursos necesarios para la ejecución de cierto trabajo, se pueden presentar a la larga pérdidas en tiempo, que provocan retraso en el avance del proyecto y pérdidas económicas. Por eso se tienen que destinar recursos que no se consideraron originalmente; alterando de esta forma el presupuesto con el cual se contaba en un principio.

Aspectos como los mencionados anteriormente fueron tomados en cuenta para elaborar una serie de pasos que sirvieran de base y orientación para darle seguimiento adecuado al proceso de crecimiento de la red de repetidores dentro del sistema CDMA. Este trabajo se presenta como una opción que permita considerar puntos importantes en la instalación de una red de repetidores; estos van desde teoría básica y trabajo de campo hasta el análisis económico que muestra lo importante de enfocarse en cada parte del desarrollo del proyecto, a fin de optimizar recursos.

1. ENLACE MÓVIL – RADIO BASE

La figura 1 resume lo que ocurre en un ambiente de radiofrecuencia con respecto a la comunicación móvil–sitio de celda o radio base. En el presente capítulo se hace un breve repaso acerca de dicha comunicación, lo que ayudará a comprender aspectos como cobertura de señal, estadísticas de tráfico de llamadas, optimización del repetidor, análisis de propagación, etc. Estos se desarrollarán conforme al método de estudio propuesto.

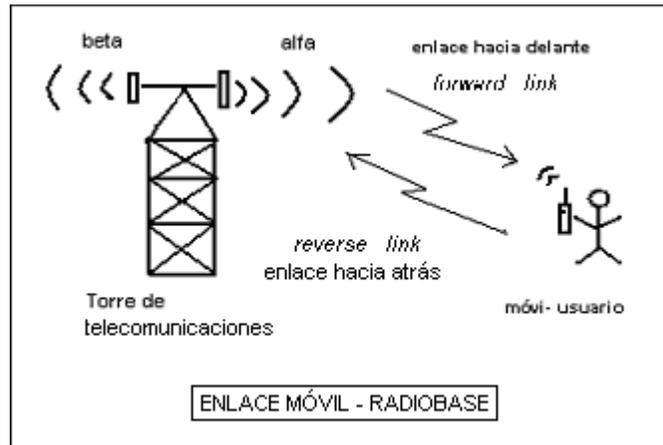
Cuando se hace diseño de red, se debe considerar el análisis de enlace entre el móvil y la radio base (*link budget*), ya que el resultado obtenido permitirá determinar la máxima pérdida por desvanecimiento entre el transmisor y el receptor en un ambiente de RF. También será posible determinar la cobertura aproximada que podría lograr el sitio de celda considerado como donador.

Con un apropiado enlace celda-móvil es posible desplegar una red con el servicio de cobertura deseado. Hacerlo incorrectamente puede provocar niveles inadecuados de cobertura y calidad de voz.

El objetivo primario es asegurar que los enlaces hacia delante (*forward link*) y hacia atrás (*reverse link*) estén balanceados con los mismos márgenes de trayectoria.

En la figura se muestra que el enlace hacia delante se refiere a la comunicación del sitio celda al móvil, y el enlace hacia atrás es la comunicación del móvil hacia la celda.

Figura 1. Enlace móvil-radio base



1.2 Parámetros de enlace

Los parámetros de consideración en un análisis de enlace, tanto hacia delante como hacia atrás o inverso son:

- Potencia Isotrópica Efectiva Radiada (EIRP)
máxima potencia transmitida
pérdidas en cables y conectores
ganancia de antena
- Sensibilidad de desvanecimiento del receptor
- Fiabilidad de cobertura
- Factor de carga
- Ganancia de diversidad de antena
- Ganancia de *soft handoff*
- Tasa de error de trama (FER)
- E_b/N_t , ruido térmico de energía por bit
- Desvanecimiento por trayectoria múltiple

1.3 Balance de enlace

Refiriéndose a la figura 1, en términos generales, existe balance de enlace tanto en trayectoria hacia delante como hacia atrás cuando se cumpla la siguiente ecuación:

$$Tx p - Tx L + Rx g = Rx S \quad (1.1)$$

Donde $Tx p$ es la potencia del transmisor, $Tx L$ son las diferentes pérdidas por enlace en transmisión, $Rx g$ representa las ganancias en recepción y $Rx S$ es la sensibilidad del receptor.

Esta ecuación debe cumplirse tanto para las trayectorias de enlace hacia delante como enlace inverso. Dicha ecuación indica que para asegurar buen enlace de comunicación debe existir suficiente potencia de transmisión disponible para resistir las pérdidas incurridas entre el transmisor y el receptor; esto para que la señal sea suficiente en el receptor.

Esta ecuación es básica para el análisis del enlace. Expandiendo la ecuación (1.1) para mostrar los parámetros que intervienen en ella se tiene:

$$Tx \text{ Potencia EIRP} - L_{\text{despliegue}} - L_{\text{penetración}} - L_{\text{sombra}} - L_{\text{desvanecimiento}} + G_{Rx \text{ antenna}} = Rx \text{ sensibilidad} \quad (1.2)$$

Donde EIRP representa la máxima potencia radiada del amplificador de potencia disponible de un transmisor en dirección de la máxima ganancia de antena; $L_{\text{despliegue}}$ y $L_{\text{penetración}}$ representan pérdidas por propagación; L_{sombra} representa pérdidas por distancia; y $L_{\text{desvanecimiento}}$ representa pérdidas debidas a interferencias constructivas y destructivas de ondas de radio.

Por lo tanto, la potencia de salida de la antena transmisora (EIRP), la sensibilidad del receptor Rx y la ganancia de la antena receptora G_{Rx} determinan la máxima pérdida de trayectoria entre el transmisor y el receptor.

La señal de RF es atenuada por:

- Rápido desvanecimiento de señal por múltiple trayectoria
- Sombra por obstrucción en trayectorias de RF
- Pérdidas de penetración debidas a edificios y vehículos

Entonces, la máxima pérdida de potencia de trayectoria RF se puede derivar de los factores de propagación:

$$\text{Máxima pérdida por trayectoria} = T_{\text{pot}} E_{\text{IRP}} - R_{\text{sensibilidad}} + G_{\text{Rx}} \text{antena} \quad (1.3)$$

Relacionado con las pérdidas del ambiente RF:

$$\text{Máxima pérdida por trayectoria} = L_{\text{despliegue}} + L_{\text{penetración}} + L_{\text{sombras}} + L_{\text{desvanecimiento}} \quad (1.4)$$

Esta ecuación se utiliza para determinar cobertura de señal directamente utilizando cualquier modelo de propagación (Hata, Cost231 u otros), según se elija para diseñar la red.

1.3.1 Potencia efectiva isotrópica radiada (EIRP)

En cualquier sistema de comunicación, este es un parámetro crítico, C/N (*carrier to noise*, por sus siglas en ingles, en CDMA), que es la razón de señal-ruido en el receptor. Este parámetro compara potencia de señal con potencia de ruido en el canal.

Esta ecuación de enlace calcula la razón C/N utilizando varios parámetros del sistema de comunicación:

$$C/N = (EIRP) L_p G_r / N$$

Donde EIRP es la potencia efectiva isotrópica radiada desde la antena transmisora; L_p son las pérdidas por propagación en el canal; G_r es la ganancia de la antena receptora, y N es la potencia efectiva de ruido. Entonces, al despejar la potencia efectiva radiada, se tiene:

$$EIRP = PtLcGt$$

Donde P_t es la potencia a la salida del amplificador de potencia del transmisor, L_c son las pérdidas de cables y conectores entre la potencia del amplificador y la antena transmisora, y G_t es la ganancia de la antena transmisora.

1.3.2 Pérdidas por cables y conectores

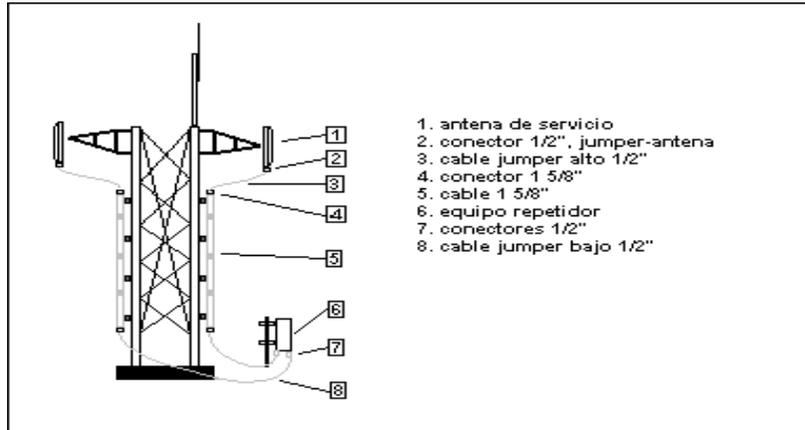
La pérdida de cable es dependiente de la longitud y composición del cable entre el puerto de la antena y la terminal de radio. Las pérdidas también dependen de la frecuencia de operación; por ejemplo, para el caso del repetidor, se aplica en las guías de onda tanto de ½ pulgada como para los cables de 1 5/8 de pulgada.

Dada la altura de la antena, cable y las especificaciones del *jumper* (cable que conecta la guía de 1 5/8" con la antena de servicio), se puede calcular la pérdida total entre el puerto de amplificador y el puerto de la antena tal como se observa en la figura 2, la cual muestra cómo están colocados los cables en la torre de telecomunicaciones.

Referido únicamente a pérdidas de cable en dB:

$$\begin{aligned} P_{\text{cable}}(\text{dB}) = & \text{atenuación de cable}(\text{dB/m}) \times \text{largo de cable}(m) \\ & + \text{atenuación de jumper}(\text{dB/m}) \times \text{largo de cable}(m) \\ & + \text{pérdidas de inserción por par de conectores} \times \text{número de pares} \\ & + \text{pérdidas por protectores de transitorios} \end{aligned}$$

Figura 2. Pérdidas por cables y conectores



En una torre de telecomunicaciones la cantidad de cables de guías de onda, de medida de 1 5/8", depende de su configuración; las pruebas de pérdidas en los cables se realizan mediante un barrido, conocido como *sweep test*, utilizando un analizador de espectro, un generador de señal y cargas de simulación.

1.3.3 Ganancia de antena $G(\varphi, \theta)$

Esta es la razón de intensidad de radiación en una dirección dada. La ganancia de una antena está relacionada con la directividad y también forma parte de la eficiencia de la antena.

La ganancia de potencia de la antena esta definida como 4π veces la razón de la intensidad de radiación en la dirección de la potencia aceptada por la antena de un transmisor. Esto es:

$$G(\varphi, \theta) = \eta D(\varphi, \theta)$$

En donde D es la directividad,

$$D = \frac{4\pi U_{max}}{P} = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} S(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi}$$

D medido en la dirección específica (θ, φ) .

La ganancia de la antena está expresada con respecto al patrón de radiación isotrópica, el cual está medido en dBi. En los sistemas de comunicación inalámbrica usualmente se utiliza alta directividad y alta ganancia de antena porque las señales pueden sufrir severos niveles de desvanecimiento.

1.3.4 Sensibilidad de recepción

La sensibilidad de un receptor, esto es, el mínimo nivel de señal que un receptor puede recuperar y todavía proveer una operación aceptable, es una cantidad basada en la energía por bit a razón de ruido (E_b/N_0), figura de ruido (NF), razón de datos (R) y densidad de ruido térmico:

$$S(\text{dBm}) = E_b/N_0 + NF + 10\text{Log}R + 10\text{Log}(KT)$$

Energía por bit/ Densidad de ruido

Los sistemas digitales requieren calidad en sus mediciones tanto en dominio análogo como digital. La forma de onda RF modulada es una señal análoga caracterizada por la razón de señal a ruido (S/N). Una vez recibida, la señal es demodulada y se convierte de análoga a digital. De ahí la señal pasa directamente a un detector de umbral. La señal digital se caracteriza por un valor E_b/N_0 .

Esta relación se extiende por la relación:

$$E_bR/N_0W = C/N = \text{Potencia de canal} / \text{Potencia de ruido}$$

Al elegir un valor para E_b/N_0 tal que la tasa resultante de error de trama, conocida por sus siglas en inglés como FER (*frame error rate*), por ejemplo $\sim 2\%$, soporta calidad de voz aceptable; entonces E_b/N_0 es dependiente de:

- Velocidad del móvil
- Condiciones de desvanecimiento acelerado (trayectoria múltiple)

1.3.5 Tasa de error de trama (FER)

La razón de error de bit (BER) es usualmente asociada con la calidad de señal, pero en CDMA es difícil medirla. Como resultado, el valor más comúnmente reportado es el FER , medido utilizando pruebas de redundancia cíclica (CRC). Típicamente, un 1% - 2% FER es utilizado en aplicaciones. Si se especifica un valor diferente, el impacto sobre el enlace celda-móvil y en las capacidades de enlace, tanto hacia delante como inverso, debe ser considerado.

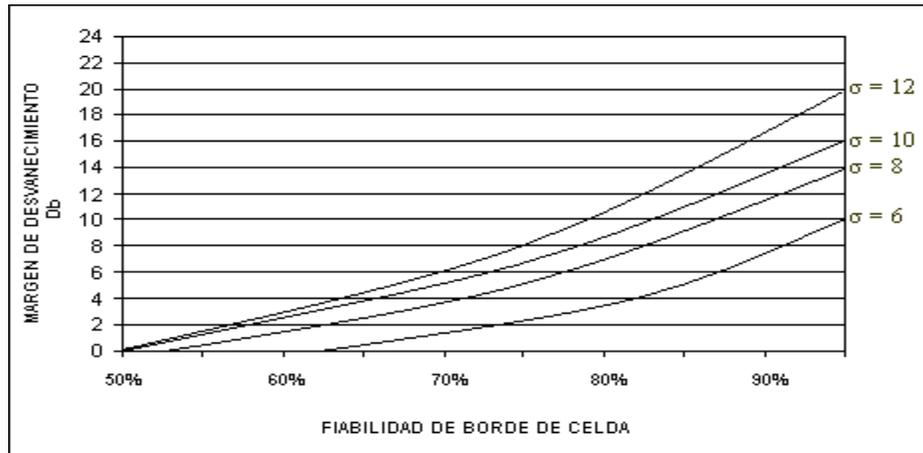
1.4 Fiabilidad de cobertura

La fiabilidad de cobertura de un sistema celular, también referido a calidad de servicio (*Quality of service, QoS*), se define como la probabilidad de que la potencia de señal instantánea recibida sea mayor que un umbral especificado.

Es necesario especificar este (*QoS*) en el diseño del sistema para asegurar suficiente margen de desvanecimiento y para compensar variaciones por pérdidas de propagación. El margen se realiza mediante el uso de mayor potencia de transmisión que pudiera ser necesario por enlace de RF sin variación de pérdidas. Un incremento efectivo en la potencia de Tx puede además alcanzarse mediante la reducción del radio de celda.

La figura 3 representa la relación entre el margen de desvanecimiento y la fiabilidad del borde de celda para diferentes valores de desviación estándar, σ .

Figura 3. Margen de desvanecimiento vs. Fiabilidad de borde de celda



El típico QoS para sistemas móviles se asume en 75% al borde de celda (que es equivalente a 90% de área).

Área de celda vs. borde de celda

La confiabilidad de área está definida como el porcentaje de localización dentro del radio de la celda R, en el cual los niveles de señal recibidos exceden cierto valor umbral. Este umbral es usualmente la proporción media de señal.

La probabilidad de que la señal recibida en el borde de la celda sea mayor que su valor de potencia media se denomina fiabilidad en borde de celda. Para un margen de desvanecimiento dado, la fiabilidad de área está relacionada con la fiabilidad de borde de celda directamente en el área de la celda.

- Área de celda: es la probabilidad de que la señal RF se encuentre o exceda la calidad de umbral deseada (por ejemplo, -80dBm) sobre el total de área de cobertura.
- Borde de celda: es la probabilidad de que la señal RF se encuentre o exceda la calidad de umbral deseada (por ejemplo, -80dBm) cuando se mide en un contorno circular en el borde de la celda.

1.4.1 Pérdidas por penetración

La energía se pierde debido a penetración de señal en construcciones y vehículos. La magnitud de estas pérdidas es dependiente del ambiente particular y del material de obstrucción. Entre los valores utilizados en cálculos iniciales son:

- Urbanización densa: 20 dB
- Urbano: 15 dB
- Suburbano: 10 dB
- Rural (en-vehículo, carreteras) 8 dB

Para sistemas móviles, las pérdidas vehiculares se asumen aproximadamente en 7 dB. Estos son tipos de propagación utilizados para estudios de cobertura cuando se realiza el diseño de red.

1.4.2 Margen de desvanecimiento

Se puede describir la pérdida de trayectoria en dB como una función de la distancia. A veces un cambio de posición del receptor por unos pocos metros resulta en un cambio en el umbral de señal entre 10 dB a 20 dB. Esto sucede porque la trayectoria RF puede estar obstruida por algunas estructuras o formaciones naturales. Este fenómeno se denomina desvanecimiento por sombra o desvanecimiento lento, y resulta en el esparcimiento en el umbral de señal recibida a una distancia fija desde el sitio de celda. Cuando un sistema se diseña utilizando la pérdida de trayectoria media a cierta distancia, para garantizar adecuado umbral de señal y consecuentemente su desempeño, debe dejarse cierto margen para combatir la variación de umbral de señal, que se conoce como margen de desvanecimiento.

Es el modelo típico utilizado para predecir la proporción de señal a una distancia dada en una distribución log-normal (esto es, en una distribución en escala dB). La pérdida de propagación de una distancia d a un móvil, como medida desde una estación base, es una variable aleatoria modelada como $L(d,\zeta) = d^{-\gamma} 10^{\zeta/10}$, donde γ es el exponente de pérdida por trayectoria y ζ es la atenuación en dB debido a efectos de sombra, esto es, modelado por una variable aleatoria Gaussiana con media de cero y una desviación estándar de σ ; y contribuye a fluctuaciones en la trayectoria de pérdida. En dB, la pérdida por trayectoria está dada como:

$$10\log(L(d,\zeta)) = 10\log(d^{-\gamma} 10^{\zeta/10}) = 10\gamma\log d + \zeta$$

La pérdida de trayectoria a una distancia d del sitio de celda consiste de una componente determinística (valor medio) de $10\gamma\log d$ y una media de cero de componente Gaussiana distribuida en forma aleatoria con una desviación estándar σ . Observando que sin sombra de obstrucción (cuando $\zeta = 0$) la cantidad de potencia requerida para compensar la pérdida de propagación es una cantidad determinística, está dado por $10\gamma\log d$. También se observa que el proceso de salto de una llamada (*handoff*) ocurrirá en este caso ideal cuando un móvil atraviesa sobre el borde de una celda a otra o cuando la distancia mínima cambia de una estación base a otra.

1.4.3 Pérdidas en espacio libre

1.4.3.1 Reflexión

La reflexión ocurre cuando las ondas electromagnéticas EM impactan en objetos con dimensiones mayores que la longitud de onda de señal. Este mecanismo puede producir ondas que interfieren con otras, creando interferencias constructivas y destructivas. En ambiente celular de RF, este contribuye al fenómeno conocido como de trayectoria múltiple.

1.4.3.2 Propagación en espacio libre

En el espacio libre, las ondas electromagnéticas disminuyen como una función de cuadrado inverso, o $1/d^2$, donde d es la distancia entre el transmisor y el receptor. En su forma lineal, la pérdida por espacio libre es:

$$L_p = 4\pi\lambda^2/d^2$$

Donde λ es la longitud de onda de señal. Esta ecuación puede además ser escrita en decibeles de la siguiente forma:

$$L_p = -32.4 - 20\log(f) - 20\log(d)$$

Donde d es en kilómetros, f es la frecuencia de la señal en megahertz, y la pérdida de trayectoria L_p es en decibeles. Se aplica el hecho que la velocidad de la luz es un producto de la frecuencia por la longitud de onda (i.e., $c = \lambda f$). Notar que una vez conocida la frecuencia de canal de la señal, f , el primero y segundo términos son constantes, y L_p varía estrictamente como una función de d .

El modelo de espacio libre está basado en el concepto de expansión de frente de onda esférica, ya que la señal es radiada desde una fuente puntual en el espacio. En sistemas de comunicación móvil, donde pérdidas adicionales se introducen por obstáculos terrestres, modelos alternativos, Hata y Lee, son necesarios a fin de precisar las pérdidas de propagación en una predicción de señal.

1.5 Ganancia de *handoff*

1.5.1 *Handoff*

El sistema CDMA soporta varios tipos de *handoffs*, como *hard*, *soft* y *softer handoff*. Procedimientos y parámetros para *handoff* se realizan para mantener la integridad de las llamadas.

Hard handoff es un evento discreto en el tiempo cuando la llamada soporta el cambio de una celda a otra o de un canal a otro. *Soft handoff* es el proceso por el cual un móvil mantiene comunicación con 2 ó 3 estaciones base moviéndose dentro de ellas. El *hard handoff* ocurre cuando un móvil sufre la transición entre dos canales de CDMA.

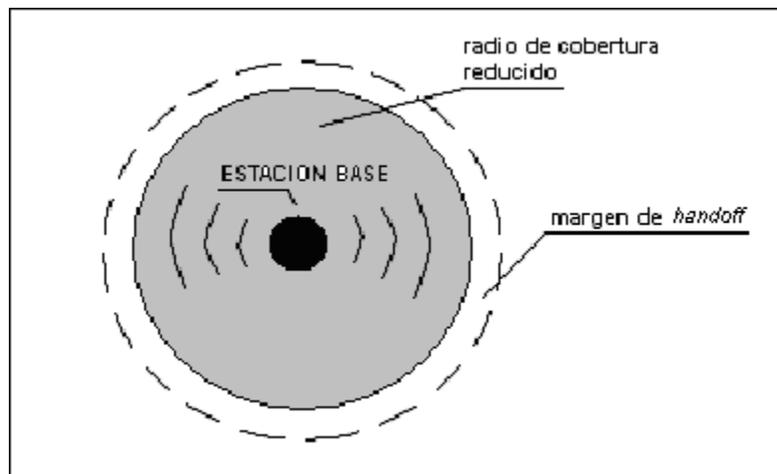
1.5.2 Ganancia de *hard handoff*

Si primero se considera el *hard handoff* tradicional como ocurre en un sistema agujerado tal como AMPS o TDMA, se tiene la siguiente situación:

Un móvil cerca del borde de una celda experimenta fluctuaciones de señal tal que de un momento a otro la celda de mejor servicio puede ser la estación base hogar o el servidor vecino. El resultado se conoce como efecto ping-pong, habiendo excesivos “brincos” (*handoffs*) entre dos celdas vecinas, degradando el funcionamiento del sistema.

Este comportamiento se puede minimizar por adición de márgenes de *handoff*; el propósito es proveer la cobertura deseada más allá del radio celda.

Figura 4. Margen de *handoff*

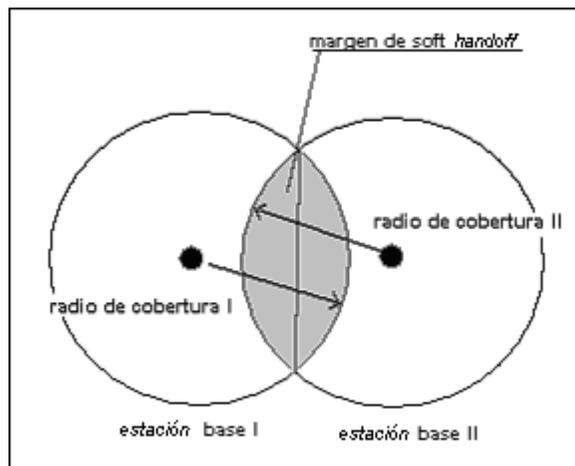


Por lo tanto, se tendrá incremento en el margen de enlace, efectivamente reduciendo el radio de celda.

1.5.3 Ganancia de *soft handoff*

La ganancia de *soft handoff*, ver figura 5, es el margen disponible en el móvil en áreas de pobre cobertura, o sea, en región de *soft handoff*, debido a la combinación de dos o más señales no correlacionadas. Para determinar este valor, se calcula el margen de desvanecimiento *log-normal* (el desvanecimiento lento es usualmente modelado por una distribución *log-normal* con potencia media y desviación estándar) para una sola celda. Entonces se calcula el margen de desvanecimiento *log-normal* a la frontera entre dos celdas.

Figura 5. Margen de *soft handoff*



Se debe notar que el fenómeno de desvanecimiento, en esta situación, no es solamente desvanecimiento rápido y que la señal desvanecida de la estación base 1 puede correlacionarse con la señal desvanecida de la estación base 2.

Para propósitos de cálculo, se asume que la terminal está en *soft handoff* en dos celdas, asumiendo 50% de correlación por sombra y el móvil exactamente en la frontera de ambos servidores. Típicamente la ganancia de *soft handoff* es de 4 dB para $P(z) = 90\%$, $\sigma = 8$ dB, donde P es la probabilidad de cobertura y σ es la desviación estándar de desvanecimiento.

1.6 Piloto EIRP

Esta cantidad es la potencia piloto del mejor servidor referido a una antena isotrópica, y está determinado por:

$$PILOT\ EIRP = Potencia\ piloto\ de\ mejor\ servidor\ (dBm) - Pérdidas\ en\ cables\ (dB) + Ganancia\ de\ antena\ (dB)$$

Para sistemas móviles, la potencia piloto está fijada a:

- 34.6 dBm (800 MHz)
- 33.3 dBm (1900 MHz)

Este parámetro se encuentra incluido en el *link budget* para facilitar el análisis de cobertura utilizando el software necesario para simulación de celdas.

Si en una herramienta de software de simulación se fija EIRP a cero dBm, se tiene entonces que el simulador básicamente toma la máxima pérdida por trayectoria del enlace inverso.

1.7 Requerimientos de enlace inverso, Eb/Nt

Eb/Nt representa la energía del canal de tráfico por bit al ruido total a razón de interferencia. Los requerimientos de razón de energía de bit a ruido total en el enlace inverso es dependiente de las condiciones de canal y del número de usuarios, y de trayectorias múltiples que pueden combinarse en la estación base.

Ha sido demostrado que, para sistemas móviles, una aceptable calidad de voz puede alcanzarse cuando la media Eb/Nt se encuentra en el orden de los 7 dB.

1.8 Margen de interferencia (factor de carga)

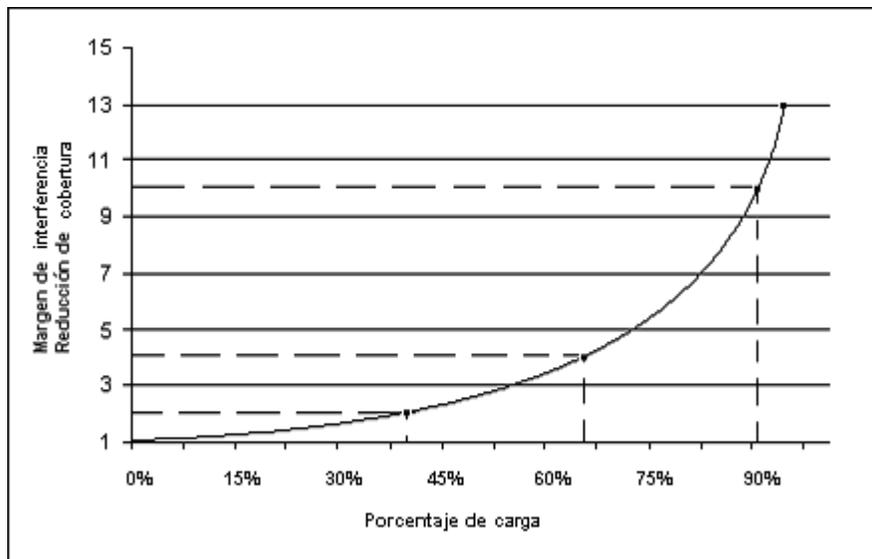
Esta es la degradación en enlace inverso debido a carga de tráfico (también conocido como margen de degradación o aumento de ruido sobre ruido térmico). Este factor se calcula con base en la carga de la celda:

$$\text{Margen de interferencia} = 10 \log[1/(1-L)]$$

Donde l es la fracción de carga (esto es el número de usuarios actuales por sector / sobre el máximo número de usuarios por sector).

Esto es asumiendo que todas las transmisiones de los móviles se reciben en la estación base al mismo nivel de potencia, debido al ajustado control de potencia en enlace inverso.

Figura 6. Margen de interferencia vs. porcentaje de carga



Referido a la figura 6, se puede observar que el 50% de carga encoge la cobertura de la celda en 3 dB, 60% de carga por 4 dB, 70% de carga por 5.2 dB, por ejemplo. Notar que este factor no puede ser utilizado únicamente para determinar la capacidad del sistema; en muchos casos, la capacidad está limitada en enlace hacia delante. Para análisis de carga en enlace inverso se recomienda utilizar 50%.

Margen de fluctuación

Una red CDMA se diseña a una carga nominal de 50%. La carga de tráfico actual tiene pequeñas variaciones alrededor del valor nominal, el cual es excedido ocasionalmente.

1.9 Enlace sitio de celda-móvil

1.9.1 Enlace inverso

Para ubicar una llamada, un móvil CDMA debe tener suficiente potencia para soportar la interferencia generada por otros móviles CDMA dentro de la misma banda; esto es la señal recibida a la estación base debe alcanzar una razón señal-interferencia requerida. El móvil transmite potencia requerida que dependerá de la distancia del móvil a la estación base tanto como del total de nivel de interferencia, o sea, la carga de la celda.

El establecimiento de cada llamada aumenta los niveles de interferencia, visto por un móvil; por consiguiente, a fin de mantener la integridad de una llamada, cada móvil incrementa apropiadamente su potencia de transmisión. Estos ajustes elevan los niveles de interferencia tal que otro móvil debe sobrepasar dicha interferencia. Este proceso se repite por sí mismo hasta que un móvil no puede alcanzar una calidad de voz aceptable a la estación base.

Generalmente, la capacidad de una red CDMA se degrada tanto como se incrementan los niveles de interferencia recibida.

1.9.2 Balance de enlace inverso

- En el enlace inverso, los niveles de interferencia recibidos se distribuyen por gran cantidad de pequeñas fuentes de interferencia (esto es móviles) tanto en los sectores de la celda como de los sectores de celdas vecinas.
- Si no existiera tráfico, tampoco habría interferencia por enlace inverso.
- El control de potencia de enlace inverso es casi perfecto, ya que cualquier móvil transmite justo la potencia necesaria para mantener la calidad del enlace.
- El *soft handoff* reduce la interferencia provocada por enlace inverso. Esto debido a la reducción total en potencia transmitida requerida en el móvil.

1.9.3 Balance de enlace hacia delante

- Los canales de encabezados conocidos como canal piloto, canal de sincronización y canal de *paging*, no tienen control propio de potencia, por lo que están todo el tiempo transmitiendo potencia total.
- La potencia producida únicamente por los canales encabezados (*overheads channels*) producen suficiente interferencia hacia delante, sin tráfico.
- El canal de tráfico tiene control de potencia muy pequeño. Bajo un ambiente de desvanecimiento de señal, más móviles aumentan su nivel de potencia que la necesaria, esto para mantener la calidad del enlace. Este aumento de nivel de potencia crea interferencia extra en otras celdas adyacentes.
- El *soft handoff* incrementa los niveles de interferencia en el enlace hacia delante.

2. GENERALIDADES DEL REPETIDOR CDMA

Un repetidor es un equipo de radiofrecuencia pasivo bi-direccional que se utiliza para mejorar la cobertura de señal y resuelve problemas de mezcla de pilotos dominantes. En el presente capítulo se describe la forma como opera el repetidor, así como las diferentes configuraciones que puede tener cada sitio.

2.1 Ortogonalidad

Para evitar interferencia bilateral en el enlace hacia delante, se utilizan los códigos *walsh* para separar usuarios individuales mientras ocupan la misma banda de radiofrecuencia; los códigos *walsh* son un arreglo de 64 secuencias binarias ortogonales. La primera parte del capítulo 2 hace evocación acerca de la ortogonalidad en el enlace hacia delante y hacia atrás; luego se hace referencia a las especificaciones básicas de un equipo repetidor, así como a las diferentes configuraciones en las que se puede instalar.

2.1.1 Ortogonalidad en enlace inverso

En IS-95 el enlace reverse no es ortogonal, dos formas de onda x y y se dicen ser ortogonales si su correlación cruzada $R_{xy}(0)$ valuado en T es cero, donde

$$R_{xy}(0) = \int_0^T x(t)y(t)dt$$

El mantenimiento de ortogonalidad requiere que los canales de todos los móviles estén sincronizados cuando se acerquen hacia la radio base. Un móvil puede ubicarse dentro de los 50 metros desde la radio base y otro a 15 km de la radio base; como resultado, ambos experimentan diferentes retardos de propagación. Dos canales con más de una fase de chip de diferencia podrían no estar sincronizados, y actúan como fuente de ruido uno del otro, o en otras palabras, no estarían correlacionados.

2.1.2 Ortogonalidad en el enlace hacia delante

En contraste con el enlace inverso, donde es difícil mantener la sincronización, es posible mantener sincronización en el enlace hacia delante. Si N canales del enlace hacia delante siguen la misma trayectoria múltiple del transmisor al receptor móvil, el retardo de propagación será idéntico a lo largo de estos canales.

Mediante el uso de códigos ortogonales (códigos Walsh), los $N-1$ canales remanentes de una misma trayectoria múltiple no interferirán uno con el otro, incrementando de esta forma el enlace hacia delante.

Sin embargo, la energía de diferentes trayectorias múltiples no pueden sincronizarse debido a los diferentes retardos de propagación. De este modo, estos aun aparecerán como interferencia. Además, las señales de diferentes radio bases o de diferentes sectores no están sincronizados, por lo que todos serán interferencia.

Un común malentendido es que la interferencia en enlace hacia delante debe ser mucho menor que en enlace inverso porque el enlace hacia delante utiliza códigos ortogonales. Sin embargo la situación es opuesta. La interferencia en enlace inverso debe ser mayor que en enlace hacia delante solo si el sistema está en cobertura limitada (esto es, celdas en carreteras o celdas aisladas). Para sistemas de interferencia limitadas, especialmente en áreas urbanas, los niveles de interferencia en enlace hacia delante son casi siempre más altos.

2.1.3 Códigos PN

Los códigos *walsh*, como los utilizados en CDMA, son un ajuste de 64 secuencias binarias ortogonales, y son utilizadas para la canalización de diferentes usuarios dentro de la misma celda o sector.

En CDMA cada sector y celda comparten la misma frecuencia; esto es el PN-offset de la señal piloto, que es utilizada para fines de identificación de un sector. Los pilotos de diferentes sectores están expandidos por la misma secuencia de PN (*pseudo-noise* por sus siglas en inglés), pero están distinguidos uno del otro por diferentes tiempos de compensación (*time offsets*). Hay una sola secuencia de PN, el móvil únicamente necesita buscar la fase correcta de la secuencia.

PN offsets

Con el uso de diferentes secuencias de PNs para cada sector, la celda debe indicar primeramente al móvil su secuencia de PNs, y entonces el móvil debe buscar la fase correcta de PN. Ambos procesos pueden simplificarse en un solo proceso tomando ventaja de una propiedad especial de la secuencia de PNs.

Si se ha fijado una misma secuencia de PNs por más de un chip (1 chip = 0.8138 micro segundos), entonces la secuencia de PNs original y la secuencia fijada casi no tienen correlación una con otra.

Esto significa que si la secuencia de PN se retarda o adelanta por más de 1 chip, se comportará completamente como una nueva secuencia de PNs. Por lo tanto, si cada sector utiliza la misma secuencia de PNs, pero están fijados por más de un chip, entonces el resultado es el comportamiento de cada sector como una secuencia diferente de PNs.

2.2 Repetidor CDMA

Un repetidor CDMA es un equipo de RF pasivo cuya función es expandir cobertura de un sitio de celda hacia regiones donde los niveles de cobertura son muy bajos, tanto como para que no exista procesamiento de llamadas.

Método de Estudio de Radiofrecuencia para Repetidor CDMA

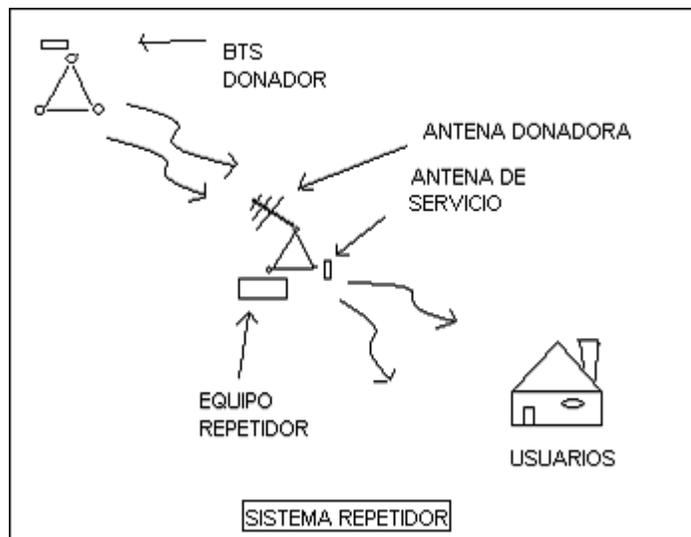
Hay que recordar que el repetidor es un equipo totalmente transparente, o sea que es el reflejo de la señal piloto de un sitio de celda donador. La utilización de estos se orienta a mejorar la cobertura y solucionar problemas de interferencia entre pilotos no vecinos, polución de pilotos.

Básicamente un repetidor CDMA está compuesto por tres elementos que son básicos:

- El equipo repetidor: módulo central y batería de respaldo
- Receptor de radiofrecuencia: antena donadora o trans-receptor óptico (*hub optical transceiver unit*) en caso de repetidor de fibra óptica
- Antenas de servicio (pueden ser de tipo panel directivas u omni-direccionales)

En el módulo central se realiza la configuración del repetidor. Se le fijan ciertos valores que son necesarios para que opere adecuadamente. También en el módulo central se declaran las alarmas del repetidor, así como el tipo de emergencia; crítica, mayor o menor. El sistema de respaldo de batería, como su nombre lo indica, sirve de protección de energía, en caso de perder momentáneamente el servicio eléctrico.

Figura 7. Sistema con un repetidor CDMA



La antena donadora tiene la función de enlace entre el sitio repetidor y la radio base donante; se ubica en la torre del sitio repetidor, como se observa en la figura 7; ciertamente esta enlaza el repetidor con la estación base CDMA mediante la captación de un piloto dominante que proviene de uno de los sectores de la radio base denominada sitio de celda donador o donante. La antena donadora se orienta en dirección de la potencia piloto que se desea repetir; sin embargo, hay situaciones en donde no existe posibilidad para repetir por el aire, por lo que es necesario repetir utilizando como medio de enlace la fibra óptica. La antena donadora debe tener buena directividad; en el sistema se pueden utilizar antenas donadoras tanto de tipo plato como de antena Yagi.

Las antenas de servicio utilizadas en la instalación del sitio repetidor son normalmente de tipo panel, aunque en algunos casos se utilizan omni-direccionales; estas se orientan hacia la región donde se requiere mayor cobertura, según requerimientos.

2.3 Tipos de repetidores

Existen dos tipos de repetidores CDMA. Uno es el repetidor de aire, el cual tiene como medio de enlace la antena donadora; y el otro es el repetidor de fibra óptica, el cual tiene como medio de enlace la fibra óptica.

2.3.1 Repetidor de fibra óptica

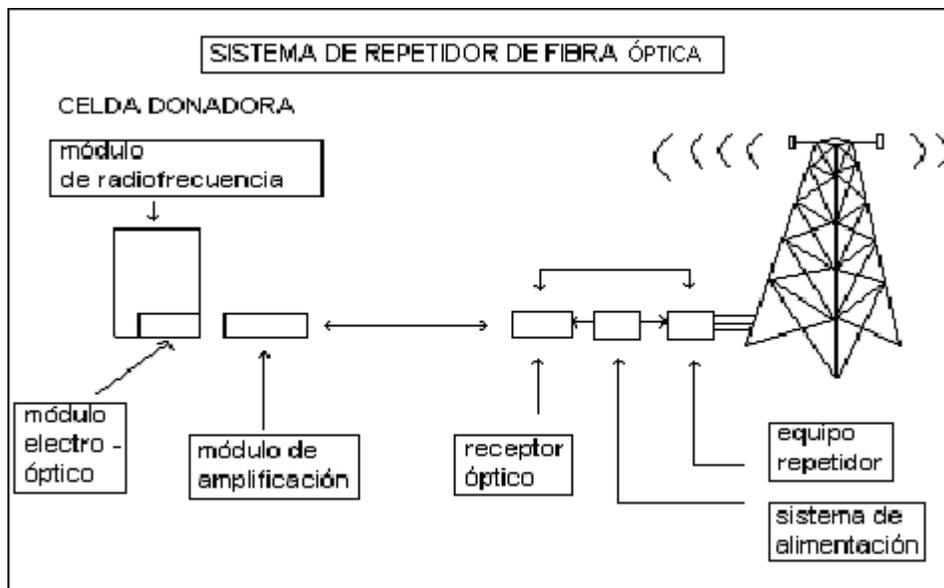
Un repetidor de fibra óptica, al igual que un repetidor de aire, toma el piloto de un sector llamado donante de un sitio celda donador y lo amplifica; extendiendo de esta manera la cobertura de la celda donadora. Sin embargo, la forma en que este repetidor toma la señal del piloto de la celda donadora es mediante conexión directa, utilizando un trans-receptor óptico; el trans-receptor se conecta al módulo amplificador de potencia de la celda donadora y por medio de fibra óptica la señal se lleva hasta el repetidor.

En el repetidor se convierte de nuevo en señal RF; en el repetidor la señal se amplifica y transmite a las antenas de servicio, las cuales dirigen la señal a las áreas de pobre cobertura.

Una ventaja del uso de repetidor de fibra óptica es que no es necesario que haya línea vista entre el repetidor y la celda donadora, ya que la conexión es por fibra. Sin embargo, es importante analizar el costo por instalación de línea de fibra óptica.

Uno de los usos más comunes que se da a este tipo de repetidor es en edificios, donde se requiere cobertura de baja potencia, como repetidores de un solo canal de aproximadamente 5 Watts. Otro uso común es en áreas con alta concentración de pilotos, algunos no declarados como vecinos, por lo que provoca problemas de fallas de acceso o caída de llamadas. Para estos, casos el repetidor amplifica un piloto y lo coloca como dominante.

Figura 8. Repetidor de fibra óptica



2.3.2 Repetidor de aire

El repetidor de aire se compone básicamente de un sistema de baterías BUPS (*Backup Battery System*), que es el sistema de respaldo de energía; su módulo central, que es donde se configura el repetidor; y su antena donadora, que sirve de enlace aéreo con el sitio de celda donador. Las dimensiones de un repetidor son pequeñas en comparación con el equipo utilizado en una celda CDMA. Por consiguiente, su *hardware* es también pequeño. Los repetidores de aire cuentan con la opción de utilizarse con un solo canal o con dos canales. Esto significa que para efectos de requerimiento de cobertura puede utilizarse un repetidor de un solo sector o de dos sectores. Por ejemplo, para repetidores instalados en cascada, normalmente se utiliza repetidor de un solo canal.

Especificaciones Básicas

Existen ciertas especificaciones que son importantes en el momento de seleccionar un tipo de repetidor. Estas deben acomodarse a los requerimientos de diseño de red. Algunas de las especificaciones que se pueden mencionar son:

Frecuencias PCS

1. Ancho de banda, que normalmente está dado en MHz
2. Enlace *reverse* (Móvil Tx), ancho de banda de trabajo en dicho enlace
3. Enlace hacia delante (Radio Base Tx), ancho de banda de trabajo en dicho enlace

Características RF

Las características RF nos indican el nivel de potencia de salida RF tanto del canal 1 como del canal 2 (en dBm). Esto según el tipo de enlace (*Forward*, puerto de antena *main* o puerto de antena de diversidad); también se considera el nivel de ganancia y rango de frecuencia de operación.

Características mecánicas

Método de Estudio de Radiofrecuencia para Repetidor CDMA

Normalmente se indica el peso del equipo y sus dimensiones. Muchas veces en estas características se indica la temperatura promedio de operación.

Figura de ruido

Aquí se especifica el nivel de figura de ruido inverso tanto de la trayectoria independiente de cable principal y de diversidad como de la figura de ruido combinado de trayectorias principal y diversidad.

Otras características

1. Factor de calidad de forma de onda
2. Ancho de banda de canal
3. Nivel de retardo, dado en microsegundo tanto para enlace *forward* como *reverse*
4. VSWR

Opciones alternativas de alimentación

1. Energía de respaldo por baterías
2. Energía solar
3. Híbridos, otros

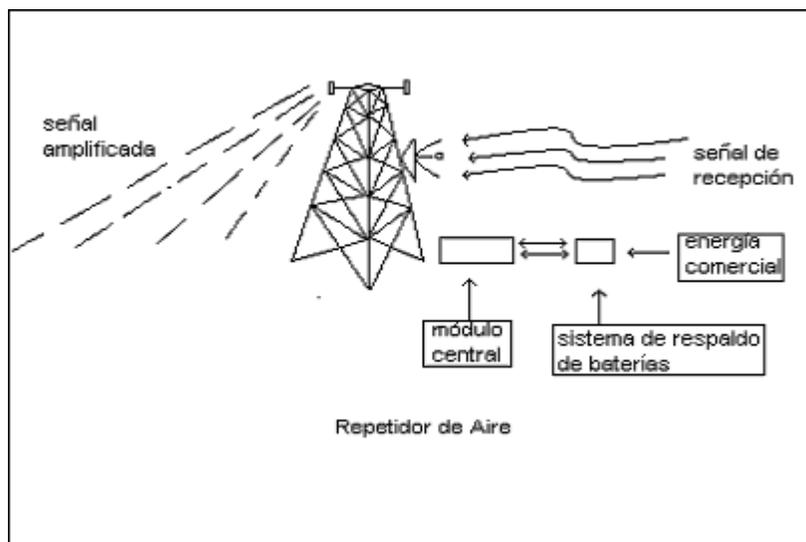
Características eléctricas

1. Niveles de voltaje de operación
2. Voltaje de operación AC y DC
3. Niveles de corriente típico, dependiendo de la cantidad de canales
4. Tipos de conectores

Las antenas de servicio que se utilizan en un sitio repetidor CDMA son iguales a las antenas utilizadas en un sitio de celda CDMA, ver figura 9.

Los niveles de ganancia de las antenas se determinan según los estudios de RF, así también su apertura. Puede requerirse de mayor apertura para aquellas regiones abiertas, mientras que se puede utilizar antenas de menor apertura para carreteras, ya que estas antenas son más directivas. En lugares cerrados, como edificios, donde se trata de eliminar problemas de polución de pilotos, se deben utilizar antenas de ganancia un poco más baja, ya que su función es hacer un piloto más dominante.

Figura 9. Sistema de repetidor aéreo

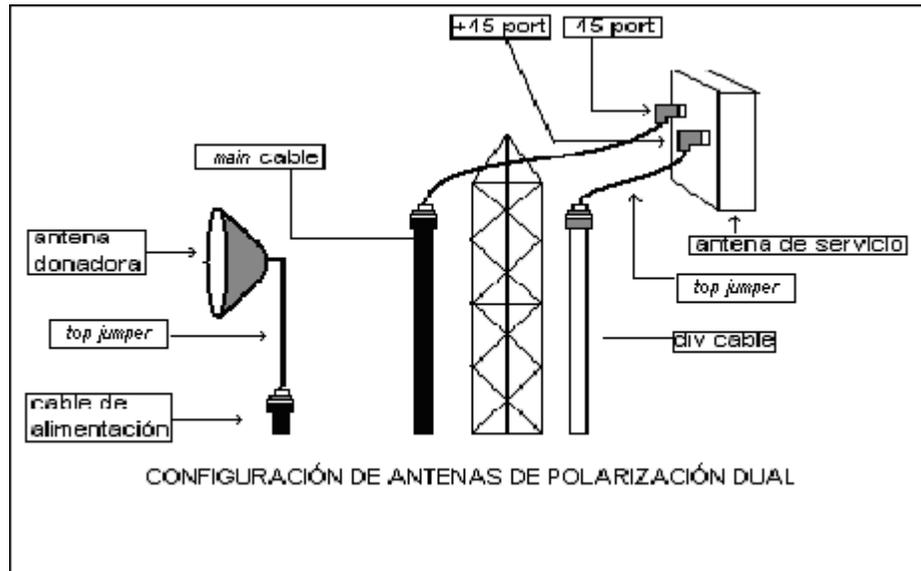


2.4 Configuración de repetidores

Un repetidor simple puede tener diferentes configuraciones, entre ellas tenemos:

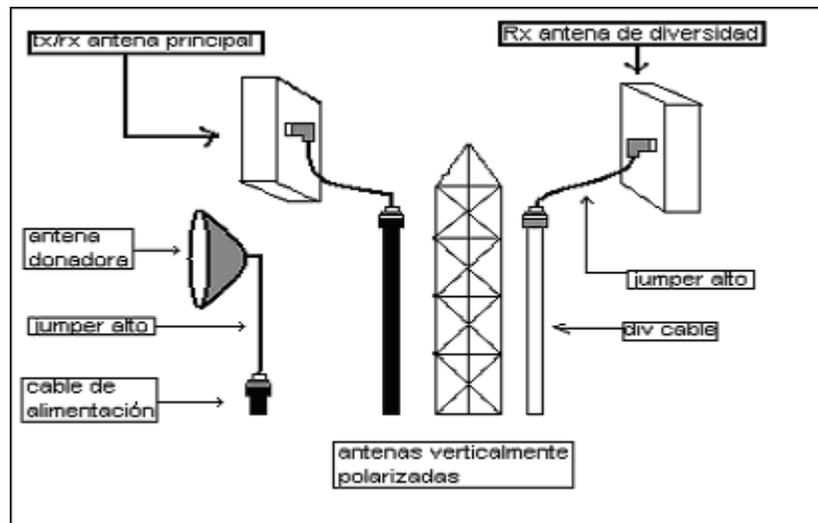
- a) Se tiene la configuración de la antena donadora y una antena suscriptora de polarización dual, figura 10; esta se utiliza básicamente para repetidores en cascada o para cubrir una cierta parte de carretera o área con alta concentración de pilotos.

Figura 10. Configuración dual



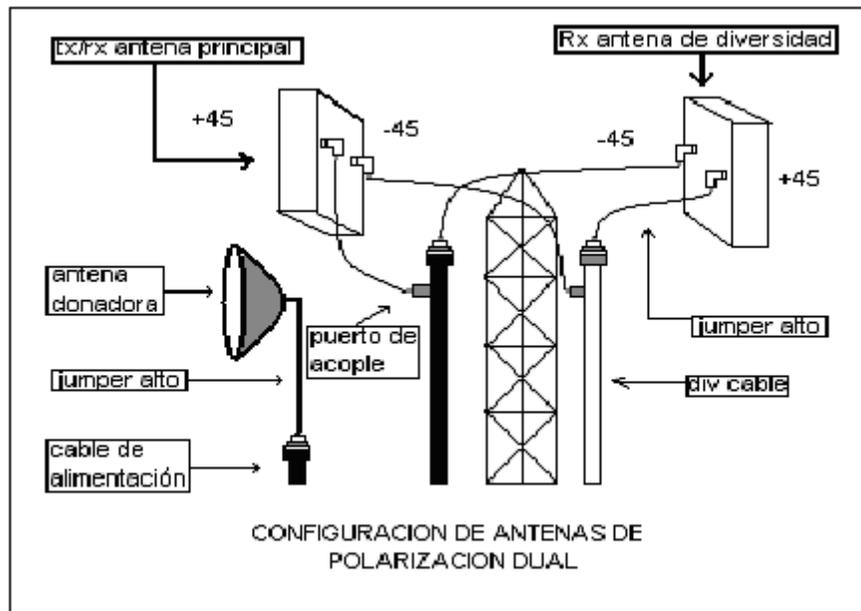
b) Antena donadora y 2 suscriptoras, ver figura 11.

Figura 11. Configuración vertical



c) Antena donadora y dos antenas suscriptoras de polarización dual. A esta configuración se le denomina de haz trasero (ver figura 12), que transmite una porción de la potencia del repetidor hacia atrás. Esta configuración es útil para áreas rurales y en cascada. Para este tipo de configuración se aplica un acoplador direccional (divisor de potencia). Este divide la potencia proporcionalmente tanto para el haz principal como para el haz trasero. Los acopladores pueden ser del tipo 50/50, 60/40, 75/25, 80/20 ó 90/10.

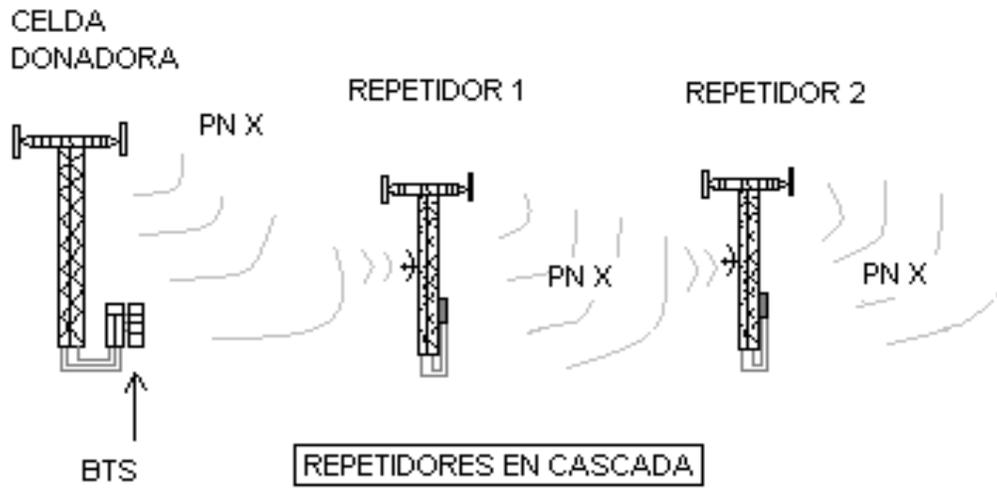
Figura 12. Configuración de antenas de duales



Por ejemplo, si un repetidor utiliza un acoplador 75/25, el 75% de la potencia principal es enviada al puerto de haz principal de las antenas suscriptoras y el 25% remanente es enviada a la antena de haz posterior.

La configuración de los repetidores en cascada se debe normalmente a requerimientos de cobertura. La configuración en cascada es común en carreteras; dando continuidad de cobertura a un sector de una celda donadora, sirviendo como reflejo, como se observa en la figura 13.

Figura 13. Configuración de repetidores en cascada



3. ANÁLISIS EN RF DE REPETIDOR CDMA

3.1 Introducción

En este capítulo y en los capítulos posteriores se hace el análisis de los aspectos que se consideran más importantes al momento de realizar un estudio de radiofrecuencia para repetidor. Todo el desarrollo del método propuesto está integrado de 3 fases. La primera fase es la de adquisición, en la cual se realiza todo el análisis preliminar de campo para determinar el mejor punto de ubicación para un sitio repetidor. La segunda fase es la de configuración. En esta fase se configura el sitio repetidor de manera que cumpla con las necesidades de cobertura especificadas en la fase anterior. Y la tercera fase, que es la de optimización, analiza el sitio repetidor a fin de optimizar su desempeño.

La primera parte del presente capítulo se refiere al estudio del entorno geográfico del poblado. También se consideran algunas estadísticas importantes del sitio de celda donador, porque de ellas depende mucho la elección de un sitio celda como donante para un repetidor. Luego, se hace un estudio acerca de la potencia con la que se dispone para poder repetir, considerando algunos parámetros como distancias, alturas de antenas, pérdidas, etc. Y para finalizar el capítulo, se hace el análisis de la propagación. Este análisis sirve para tener una idea general del alcance, a nivel de señal RF, que tendrá el repetidor según su entorno geográfico.

3.2 Estudio de campo

El estudio de campo consiste en la recolección de algunos datos que servirán para determinar una ubicación óptima para un repetidor CDMA.

Método de Estudio de Radiofrecuencia para Repetidor CDMA

Para la recolección de los datos es necesario realizar una visita de campo al área donde se considera ubicar un repetidor. Se hace una revisión visual del lugar, en cuanto a las condiciones topográficas, y luego se toma datos de coordenadas de posibles candidatos, se considera cantidad en población y las posibilidades del enlace (por aire o por fibra óptica). También se mide el nivel de potencia de la señal piloto dominante que podría utilizarse de donador para repetir. Es importante mencionar que a nivel del suelo la señal se puede medir por un teléfono programado especialmente para dicha función. En este punto la señal debe ser por lo menos de -80 dBm.

El diseño aproximado para una red CDMA con repetidores es muy similar a una red convencional. De cualquier manera, existen asuntos de diseño y limitaciones específicas de repetidores en la red CDMA.

Para realizar un estudio de campo visual acerca de la posible ubicación de un repetidor CDMA existen ciertos aspectos que deben tomarse en cuenta para realizar el estudio en forma ordenada.

3.3 Evaluación del sitio repetidor

Información del sitio:

1. Para iniciar es necesario asignar un nombre al posible repetidor. Esto con la idea de que no haya confusión con datos que se pudieran obtener de otros proyectos.
2. Normalmente a los sitios de celda se les asigna un número de identificación con la finalidad de tener control de la red. Lo mismo se debe realizar con los repetidores.

Método de Estudio de Radiofrecuencia para Repetidor CDMA

3. Es criterio del ingeniero de RF considerar el número de posibles candidatos para instalación de repetidor. Para la propuesta de cada candidato es necesario tomar coordenadas del lugar sugerido, utilizando una unidad GPS.
4. Las coordenadas de un punto de ubicación pueden obtenerse de un GPS o mediante el uso de mapas. El uso de GPS es un método directo y seguro. Sin embargo, el uso de un mapa 1:50,000 para ubicar un punto posible para la construcción de un sitio repetidor también debe realizarse, ya que con este se tiene una vista amplia de la posible propagación del repetidor, y además se ubica el ángulo de radiación de las antenas de servicio.
5. En el lugar, se debe analizar la posible altura de la torre. La altura de la antena donadora debe estar ubicada a diferente altura que las antenas de servicio. La antena donadora sirve para fines de enlace y las antenas de servicio para fines de cobertura; además, la antena donadora debe tener línea vista con el sitio de celda donador.
6. Se debe indicar si la ubicación del repetidor será en torre existente o en una nueva torre; esto es necesario saberlo para fines de enlace o aislamiento entre donadora y antenas de servicio, ya que para lograr línea vista puede ser necesario incrementar una sección nueva a la torre. .
7. Observar accesibilidad del sitio repetidor. Este aspecto es necesario para fines de enlace si se considera la instalación de un repetidor de fibra óptica, ya que un repetidor de fibra óptica necesita su camino de acceso de cable de fibra hacia el repetidor sin tener complicaciones de paso.

Morfología

1. Por cada ubicación sugerida se debe indicar la cantidad de sectores que se van a instalar. Utilizando una brújula, se mide el acimut (dirección de patrón de radiación sobre plano horizontal que varía entre 0 y 360°) por cada sector del sitio repetidor. Es recomendable indicar la función de cobertura de cada sector. Por ejemplo, se puede indicar que el sector alfa de X repetidor brindará cobertura a viviendas rurales, y el sector beta cubrirá una carretera. La idea de indicar la función de cada sector es para realizar el análisis del tipo de antena que se acomodará mejor a la necesidad. También es importante indicar la altura a la que podrían estar ubicado(s) el (los) sector(es) según la morfología del lugar y para fines de análisis de propagación utilizando *software*.

Obstrucción de RF

1. Es preciso observar si existe algún tipo de obstrucción natural, ya sea al enlace de sitio de celda donador o para las antenas de servicio. Esto servirá para ubicar mejor las alturas de las antenas.
2. En ocasiones puede existir una obstrucción no natural, como edificios, tanques de agua, torres, etc. Hay que tomar en cuenta que obstrucciones como estas desvanecen la señal en forma acelerada, con lo que se pierde la calidad de cobertura.

Acceso de energía

1. Hay que indicar el estado de servicio de energía eléctrica, ya que puede darse la situación de que el acceso de energía sea tan complicado como para elevar el costo total de construcción de un repetidor, siendo esto un aspecto suficiente para descartarlo como posibilidad.

Método de Estudio de Radiofrecuencia para Repetidor CDMA

Para evitar complicaciones con la energía debe tomarse en cuenta el acceso de las líneas para evitar al máximo la necesidad de solicitar permisos de paso o caminos de posteo.

Información de enlace

1. Indicar el tipo de enlace del repetidor. Para un repetidor de aire, el que exista línea vista es trascendental. También es importante el nivel de potencia de la señal de recepción detectada en el lugar.

2. Si en dado caso no existiera línea vista, pero en el lugar hay nivel de potencia suficiente para repetir, debe indicarse cuál es el piloto dominante y su nivel de potencia. También debe identificarse el sitio al que pertenece dicho piloto, aunque en una situación de estas existe mayor posibilidad de tener problemas de recepción de señal piloto.

Información del poblado

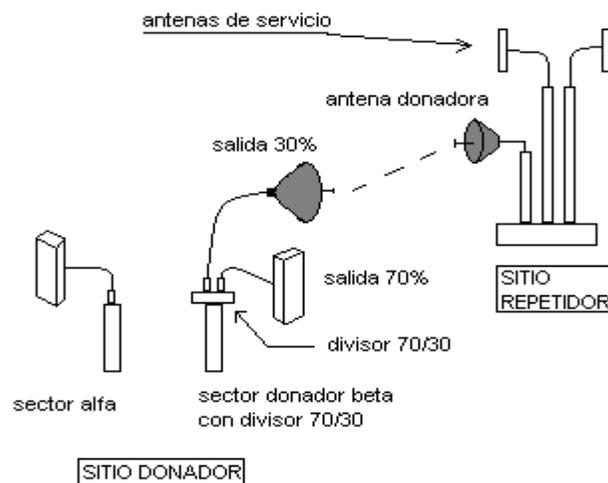
1. El proveer información estadística del poblado sirve para analizar la factibilidad de la instalación del repetidor o de un sitio de celda, debido a la cantidad de habitantes y de sus posibilidades económicas. Así se evita tener más adelante problemas de saturación de un sector donante en un sitio de celda.

3.4 Análisis del sitio de celda donador

Es importante considerar las condiciones del sitio que podría servir de donador, ya que un sitio donador puede estar tan cargado en tráfico de llamadas, que agregarle un repetidor no sería una buena opción, podría recargar el sitio de celda tanto como para llevarlo al colapso.

Es posible que haya línea vista de un sitio donador con un repetidor, pero el nivel de potencia no sea suficiente para repetir; puede ser que la antena de servicio, del sitio de celda donador, no esté en dirección al repetidor por lo que sea necesario instalar un *Splitter*, dispositivo divisor de 1 a 2 en la guía de transmisión del sector donante, que divide la señal del sector y dirige parte de la señal hacia el repetidor. Esto se conoce como enlace punto-punto. Dicha situación se puede observar en la figura 14.

Figura 14. Enlace punto-punto



3.4.1 Estadísticas del sitio donador

Para analizar el desempeño de un sitio donador, se debe contar con información estadística, la cual ayuda a evaluar si dicho sitio es un candidato óptimo para poder utilizarlo como donador.

Entre los parámetros de desempeño del sitio donador que se pueden considerar al momento de analizarlo tenemos:

- Cantidad de intentos (*call attempts*): es la cantidad en intentos de llamadas realizadas en un período de tiempo dado. Este parámetro es importante ya que se puede observar la cantidad de tráfico que normalmente maneja el sector donante.

Este dato es determinante en el sentido de que si el sitio de celda donador tiene altos niveles de tráfico, no se puede considerar como candidato.

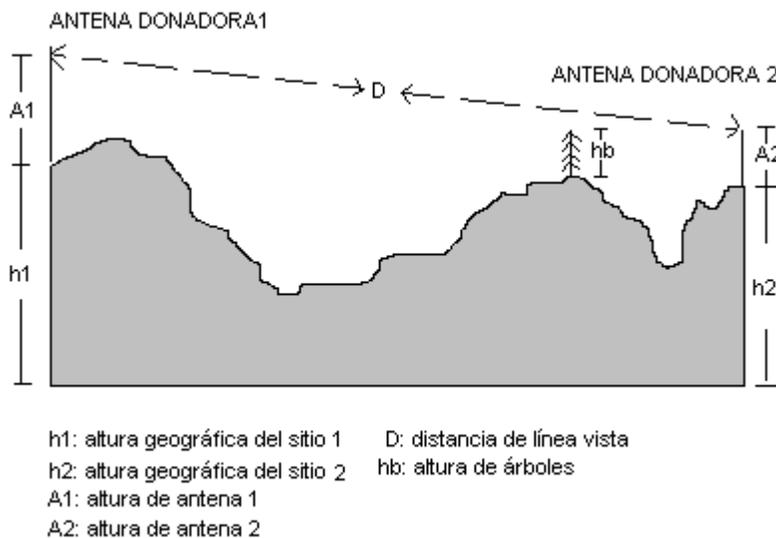
- Cantidad de intentos con éxito (*call success*): es la cantidad de llamadas que se lograron completar con éxito. Este parámetro nos indica la calidad de procesamiento que tiene la celda donadora.
- Caída de llamadas (*drop calls*): son llamadas que se lograron completar; sin embargo, en el proceso de la llamada se pierde. Son varias las razones por las que se producen caídas de llamadas. Por ejemplo, tenemos por problemas de *handoff* lento, por cobertura o que el piloto no se encuentra dentro de la lista de vecinos.
- Fallas de acceso (*access failure*): se da cuando un móvil intenta acceder al sistema pero por alguna razón no lo logra. Esta situación se da cuando hay mala selección de piloto, pérdida de asignación de canal o cuando no se adquiere un canal de tráfico en canal hacia delante.

3.4.2 Perfil de línea vista

La línea vista desde el sitio repetidor hacia el sitio donador es fundamental para que exista enlace óptimo. La línea vista se refiere a que la altura a la cual se instale la antena donadora debe observarse visualmente desde el sitio donador. La razón es que por obstrucción, el desvanecimiento de señal es tan acelerado, como para perder comunicación con la celda donadora. Además de que en CDMA existe una característica importante denominada efecto de respiración (*breathing*), este efecto es provocado por la cantidad de tráfico en el sitio de celda. El efecto es inversamente proporcional entre la carga de la celda y su cobertura. Esto significa que entre más cargada esté una celda, habrá una pequeña reducción en la cobertura.

Hay dos formas en las que se puede verificar la existencia de línea vista a cierta altura de antena donadora. Una de ellas es utilizando mapa cartográfico, ya que previamente se establecieron coordenadas de candidatos. Se ubican estos en los mapas y según curvas de nivel se establece si existe obstrucción natural (montañas, volcanes, picos, etc.), ver figura 15. Otra forma es el uso de *software* de RF que de forma fácil y rápida indicará la existencia de línea vista, distancia de línea vista, ángulo de orientación (*acimut*) desde la celda hacia el repetidor o repetidor hacia una celda (este nos guiará para la orientación de la antena donadora).

Figura 15. Perfil de línea vista



3.5 Estudio de potencia

Cuando se realiza el análisis de la factibilidad de enlace de un repetidor, es necesario considerar los niveles de potencia. Estos serán factor determinante para la instalación de un repetidor. Si no existiera suficiente potencia de entrada al repetidor, este necesitaría inyectar tanta potencia que probablemente estaría fuera de su rango de operación, por lo que no sería posible un buen desempeño.

3.5.1 Potencia de enlace

Para realizar el cálculo teórico de la potencia de enlace al repetidor, o cálculo de entrada a la antena donadora, en un ambiente RF, se considera la propagación en el espacio libre, pérdidas en cables y conectores, ganancia de la antena donadora. La ecuación general de propagación en espacio libre en escala logarítmica se expresa:

$$L_{\text{espacio libre}} = 32.44 + 20\log f + 20\log d \quad (3.1)$$

Donde f es la frecuencia de operación y d es la distancia entre el repetidor y la celda donadora.

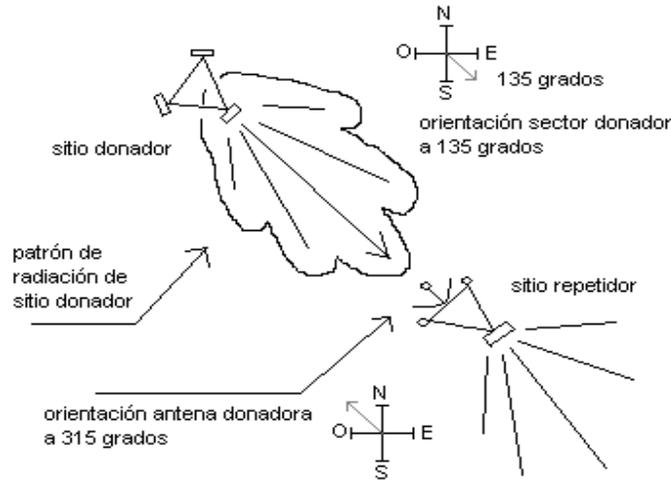
Llevando esta ecuación a las necesidades de enlace del repetidor, se tiene

$$PL = 32.44 + 20 \log (1900, 10) + 20 \log (D, 10)$$

Donde PL es la potencia de espacio libre en dBm, la frecuencia para CDMA en el orden de 1900 MHz y D es la distancia entre el repetidor y el sitio donador en base 10.

Asumiendo que exista alineación perfecta entre la antena donadora del repetidor y la antena de servicio del sector donante, como se observa en la figura 16, se puede describir la potencia de la antena donadora calculada a la entrada del repetidor.

Figura 16. Alineación perfecta entre sector donador y antenna donadora



$$P_{in\ repetidor} = EIRP_{bts} - P_l + G_a - P_{cc}$$

En donde P_{in} es la potencia en la entrada al repetidor, $EIRP_{bts}$ es la potencia efectiva isotrópica radiada de la celda, P_l son las pérdidas por espacio libre, G_a es la ganancia de la antena donadora y P_{cc} son las pérdidas debidas a la interfase entre la antena donadora y el repetidor (cables y conectores); o sea que la ecuación se puede desplegar de la siguiente forma,

$$P_{in\ repetidor} = EIRP_{bts} - P_l + G_a - P_{cables} - P_{conectores}$$

Se tiene al final la potencia total en la salida del repetidor, que es igual a la potencia de entrada al repetidor más una potencia conocida como potencia de compensación. Esta es suministrada por el repetidor de la siguiente forma:

$$P_{total} = P_{in\ repetidor} + P_{comp} \quad (3.5)$$

Si no existiera alineación perfecta entre la antena donadora del repetidor y la antena de servicio de sitio donador, figura 17, debe hacerse análisis de la potencia proporcional de no alineación. Esto significa que el patrón de radiación de la antena de servicio presenta lóbulos laterales que se pueden aprovechar para obtener suficiente potencia de enlace.

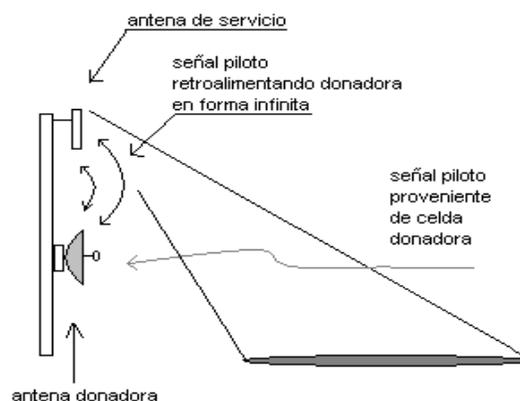
Cuando no hay alineación perfecta y la potencia que alcanza la antena donadora no es suficiente, es necesario dividir la potencia de salida de la antena de servicio del sector donante de la celda donadora utilizando un divisor de potencia. Esto se debe hacer para lograr un enlace punto a punto adecuado entre sitio donador y antena donadora. De esta forma se ganarán aproximadamente de 20 a 25 dB, mejorando la potencia de recepción.

3.5.2 Test de aislamiento

El aislamiento entre antenas se define como el margen permitido de ganancia que sumado a la ganancia máxima que puede suministrar el repetidor evita que este entre en retroalimentación infinita. Para entender mejor esta situación ver figura 18.

La retroalimentación infinita significa que la antena donadora recibe una señal piloto de la antena de servicio del mismo repetidor, lo cual provoca una reproducción infinita que afecta en amplitud y fase la señal piloto recibida del sector donante. Comportamientos como este se conocen como fallas de aislamiento y traen como consecuencia fallas en acceso y caídas de llamadas, afectando el desempeño de la red.

Figura 18. Repetidor en retroalimentación infinita



Método de Estudio de Radiofrecuencia para Repetidor CDMA

El margen de aislamiento es el valor de potencia en dB que existe entre la ganancia máxima que puede suministrar el repetidor y el aislamiento mínimo que debe existir entre las antenas sectoriales y la donadora en el sitio repetidor. Este margen de aislamiento debe ser de por lo menos 15dB para evitar que el repetidor entre en estado de oscilación. La prueba de aislamiento se realiza con la finalidad de medir qué tanta energía se retroalimenta al estar en servicio el repetidor.

Teóricamente es posible calcular el aislamiento mínimo que se debe lograr entre las antenas de servicio y la antena donadora de la siguiente forma:

$$\text{Aislamiento} = G_{rep} + MI$$

Donde G_{rep} es la ganancia del repetidor y MI es el margen de aislamiento.

$$G_{rep} = P_{in\ rep} + 40dB$$

Donde $P_{in\ rep}$ es la potencia de entrada al puerto de la antena donadora y se asume que el repetidor puede suministrar hasta 40 dB máximos, aunque este valor realmente puede variar según el tipo de repetidor.

$$P_{in\ rep} = G_{don} - P_{enlace} - P_{cc}$$

G_{don} es la ganancia de la antena donadora, P_{enlace} es la pérdida por enlace aéreo y P_{cc} es la pérdida debido a cables y conectores.

$$P_{enlace} = EIRP - P_{el} - P_{an}$$

$EIRP$ es la potencia de salida de la celda, P_{el} es la pérdida por espacio libre.

$$P_{el} = 32.44 + 20\log F + 20\log D$$

F , frecuencia del sistema, D es la distancia celda donadora-repetidor.

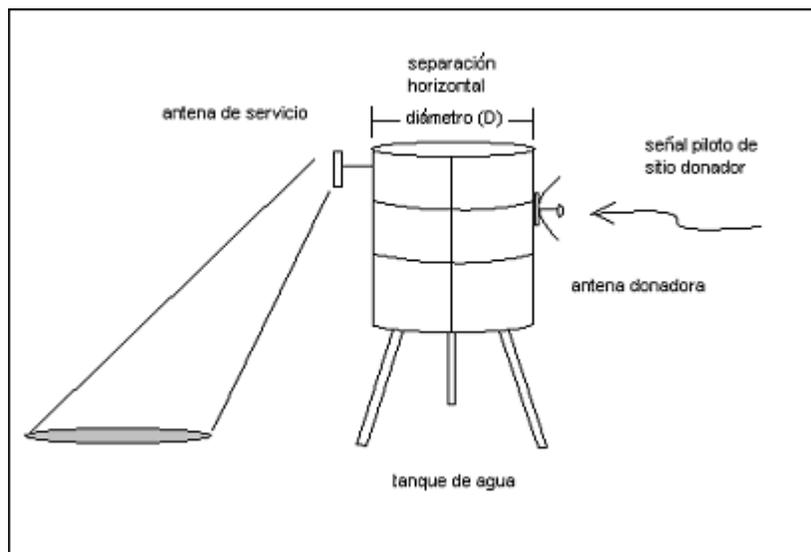
Es importante mencionar que el aislamiento es factor determinante para la ganancia en el repetidor y, por consiguiente, para la potencia de salida. O sea el nivel de aislamiento de un sitio repetidor limita la ganancia. Entre mejor sea el aislamiento, mayor será ganancia que se le pueda suministrar al repetidor.

3.5.3 Aislamiento por separación horizontal

El alcanzar buen aislamiento es fundamental para el desempeño de un repetidor. Las antenas de servicio y la antena donadora se pueden separar horizontal o verticalmente, ya sea en torre de telecomunicaciones, edificios, tanques de agua, etc. Algo que puede favorecer considerablemente es el uso de escudos de aislamiento. Dichos escudos pueden ser placas o rejillas de aluminio.

En la figura 19 se muestra la configuración de un sitio repetidor ubicado en un tanque de agua. Se observa para este caso que la colocación de las antenas de servicio y la antena donadora están separadas por una distancia D , que es el diámetro del tanque. Esto permite lograr buenos niveles de aislamiento. Lo mismo puede suceder con un edificio u otra estructura similar.

Figura 19. Aislamiento por separación horizontal en tanques de agua

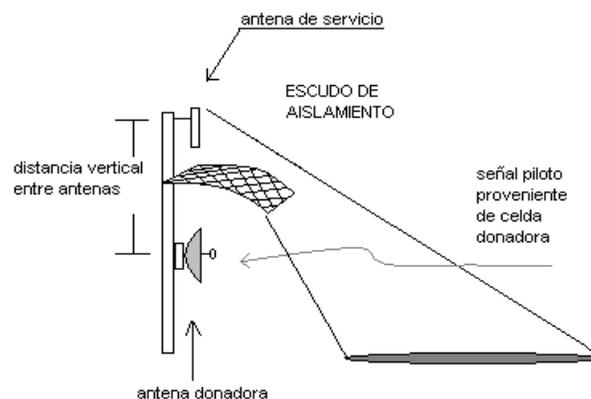


Ciertamente las antenas que están separadas por tanques o edificios alcanzan buenos niveles de aislamiento. En cambio, para las antenas que se colocan en torres de telecomunicaciones se debe ubicar a cierta distancia. Sin embargo, no siempre se logra aislamiento adecuado solo con distanciar las antenas, debido al patrón de radiación de las antenas u otras condiciones en la torre en donde se instalan. Para estos casos son necesarios los escudos de aislamiento, que atenúan aceleradamente la señal que se retroalimenta. Para la configuración horizontal, el aislamiento entre antenas es una función de la razón frente – trasero tanto como la distancia entre ellas.

3.5.4 Separación vertical de las antenas

El método usual para la instalación de las antenas del repetidor es por separación vertical. Para este método se deben tomar en cuenta las necesidades que se deben cumplir según objetivos de cobertura y de línea vista. Por método de separación vertical es conveniente que la separación entre las antenas sea de por lo menos 15 metros. Sin embargo, en algunos casos puede no ser suficiente, ya que como se dijo anteriormente depende del aislamiento.

Figura 20. Separación vertical de antenas utilizando escudo de aislamiento



Es importante determinar la altura mínima de línea vista repetidor – sitio de celda donador, porque a partir de dicha altura se puede considerar la altura máxima a la que se pueden colocar las antenas de servicio del repetidor. Como se mencionó anteriormente, el uso de escudos de aislamiento, como se muestra en la figura 20, ayuda considerablemente a alcanzar un buen nivel de aislamiento.

3.5.5 Factibilidad de enlace

Es necesario sobrepasar la primera zona de Fresnel, en el caso de la línea vista, ya que es muy probable que la potencia que reciba el repetidor no sea suficiente; es preciso apoyarse con mapas cartográficos para determinar posibles puntos de obstrucción, agregando, inclusive, altura de árboles, en el caso de áreas montañosas. La distancia de línea vista es también un punto fundamental. Por las pérdidas por espacio libre, normalmente la distancia máxima puede oscilar entre los 6 y 8 kilómetros.

3.6 Estudio de propagación

El estudio de propagación nos ayuda a visualizar en forma un poco más clara cómo la señal de radiofrecuencia se distribuirá a través de su entorno topográfico. Existen diferentes herramientas de simulación según la tecnología que se manipule.

Hablar de la propagación de un repetidor es hablar del alcance que este tendrá, a nivel de cobertura, dependiendo de ciertos factores tanto topográfico como de RF.

3.6.1 Análisis de propagación

Para realizar el análisis de propagación es necesario considerar algunos parámetros, que influyen mucho en el alcance en cobertura que pueda tener el repetidor.

Es necesario tomar en cuenta que al utilizar *software* de análisis, este será preciso hasta cierto punto, ya que a pesar de mostrar claramente las curvas de nivel de los diferentes accidentes geográficos del lugar, no considera elementos como edificios, árboles u otros que pueden de alguna manera obstruir la propagación del repetidor. Es muy importante recordar que el EIRP no es el mismo para una celda que para un repetidor. Para fines de simulación en *software*, se recomienda colocar este valor unos 10 dB menos que el utilizado para simular un sitio celda.

Con las herramientas de software se pueden manipular con libertad parámetros como altura de antenas, tipo de antenas radiantes, orientación de las antenas, inclinación de las antenas, modelo de propagación que se va a utilizar, tipo de patrón de radiación de las antenas, entre otros. Otra ventaja que ofrece el uso del *software* es que se puede determinar si existe línea vista entre el repetidor y el sitio de celda donador. Sin embargo, esto no descarta que sea necesario realizar un chequeo de la línea vista en el campo. Para el caso del tipo de modelo de propagación, existen varios tipos de los que se puede disponer. Estos sirven para predecir la propagación del repetidor según el entorno en el cual se va a desempeñar. Entre los modelos que se pueden mencionar se tiene: Sub-urban, que se utiliza para área rural sin mucha densidad de usuarios; Dense-urban, el cual se utiliza en regiones similares a Sub-urban con mayor concentración de posibles usuarios; Urban, que normalmente se utiliza para área urbana con alta concentración de usuarios.

3.6.2 Propagación del repetidor utilizando divisor de potencia

Los repetidores que actualmente se conocen son de uno y dos canales, con diferente potencia de salida y que pueden variar de 5 a 20 watts de salida que se dividen en los sectores. En ocasiones el repetidor con el que se cuenta no tiene la configuración necesaria para cumplir con los objetivos de cobertura mínimos, propuestos al realizar el estudio de cobertura. Esto significa que, algunas veces, es necesario tomar en cuenta la posibilidad de dividir la potencia de alguno de los sectores; esto para cubrir áreas de baja señal con el repetidor de configuración de dos sectores, por ejemplo.

Método de Estudio de Radiofrecuencia para Repetidor CDMA

Un repetidor de uno o dos sectores puede variar su configuración a un sector más, o sea, dividir la potencia de uno de los sectores; para poder dividir la potencia de un sector es necesario colocar un divisor de potencia. El divisor de potencia puede convertir un repetidor de un sector en uno de dos sectores, o uno de 2 sectores en tres sectores. Por ejemplo, un repetidor de 20 watts de un solo canal se puede convertir en uno de dos canales con 10 watts por canal, utilizando un divisor de potencia de 50/50.

El uso de un divisor de potencia puede ser muy útil en lugares de área muy irregular o población sin concentración definida. También puede ser útil para fines de enlace en cascada con otro repetidor, utilizando enlace punto-punto.

Luego de haber realizado los estudios necesarios para determinar la configuración final del repetidor, este entra en operación y se integra a la red celular.

4. OPTIMIZACIÓN DEL REPETIDOR

4.1 Introducción

Es fundamental mejorar el funcionamiento y desempeño del sistema para brindar un servicio satisfactorio; por esto es necesario optimizar la red cada vez que se realicen cambios o se agreguen nuevos elementos.

Optimizar la red es el proceso por el cual se ajustan ciertos parámetros del sistema con la idea de mejorar tanto el alcance en cobertura en señal como el desempeño de la misma. El proceso de optimización de un sitio repetidor cuenta con 2 pasos fundamentales. El primero se trata de recolección de datos en el campo, donde se realizan pruebas de alcance de señal en cobertura. Esto se logra midiendo la potencia de señal en el pueblo y en las carreteras principales utilizando equipo de optimización conectado a un vehículo. Este proceso se conoce como *drive test*. Mediante estas pruebas se evalúa la cobertura en señal del repetidor, además de detectar puntos de señal deficiente y problemas de procesamiento. El segundo trata del análisis de comportamiento del sitio de celda donador en la red, en procesamiento de llamadas. Esto mediante algunas estadísticas obtenidas de la central de monitoreo.

4.2 Parámetros de optimización

El proceso de puesta en servicio de un sitio repetidor no tan solo realizar un buen estudio de radiofrecuencia previo, o un buen enlace o lograr buen aislamiento; también debe asegurarse que el repetidor se desempeñe adecuadamente, ya que a pesar de ser únicamente el reflejo de la señal piloto de un sitio celda donador, este puede afectar al donador en la calidad de procesamiento.

Hay tres razones por las cuales se optimiza una red. La primera es mejorar su desempeño. Este aspecto incluye la reducción de llamadas caídas mientras se mejora la razón de llamadas completadas. Otro es el control de *handoffs*, esto es, asegurarse que haya suficientes *handoffs* para tomar ventaja de la ganancia conocida como *handoff* suave, sin utilizar exceso de capacidad. Y por último el manejo eficiente de la capacidad para mantener suficientes recursos de red y así cumplir con las necesidades del usuario con el menor obstáculo posible.

4.2.1 Proceso de optimización

Para tener éxito en la optimización de un sitio repetidor es necesario asegurarse de algunos aspectos:

a) Configuración del repetidor

- El repetidor se debe calibrar correctamente, considerando que no haya problema de aislamiento o que la potencia de recepción sea al menos la mínima para repetir. También hay que verificar que el repetidor esté reflejando el piloto deseado.
- Verificar que la frecuencia portadora de la celda donadora sea la adecuada según las necesidades y recursos disponibles.
- Debe verificarse, antes de realizar el *drive test*, que la configuración actual del sitio repetidor cumpla con los requerimientos realizados en el estudio de radiofrecuencia. Esto significa revisar las orientaciones de las antenas, sus grados de inclinación, las alturas correspondientes, los ángulos de apertura y la ganancia necesarias en las antenas de servicio.

b) *Drive test*

- Luego de revisar algunos aspectos en el sitio repetidor, se verifican los niveles de potencia de señal en el área de cobertura. Esto se consigue utilizando equipo de optimización, el cual recolecta datos acerca de la potencia de recepción, las caídas de llamadas o fallas en acceso al sistema, así como información de pilotos de sitios vecinos.
- Cuando se realiza el *drive test*, se deben recorrer todas las calles, carreteras de acceso o bulevares cercanos a fin de detectar cuáles sitios de celda o repetidores aledaños puede enlazar con el repetidor, además de áreas con señal deficiente o problemas de fallas de acceso o caídas de llamadas.
- Luego de realizar el *drive test*, se procesa y se determina si es necesario realizar cambios en la configuración del sitio, o sea, realizar algunos movimientos en las antenas a fin de cubrir algunas áreas deficientes.
- Tomar en cuenta que cada vez que se haga un cambio en la configuración del sitio repetidor, como variar el ángulo de inclinación de las antenas, la orientación, etc., se debe realizar un nuevo *drive test*, para observar con detalle qué tanto ha mejorado la cobertura o procesamiento de la celda donadora.
- Un sitio repetidor se considera optimizado cuando se ha logrado reducir al mínimo la cantidad de llamadas caídas o fallas en acceso. Hay que recordar que un sitio repetidor no es más que un reflejo de la celda donadora. Este no procesa señal, todo lo que el repetidor refleje afectará a la celda donadora.

4.2.2 *Drive test* y declaración de vecinos

El equipo utilizado en el proceso de *drive test* consiste en un computador, una interfase (que recolecta los datos y los despliega en pantalla), un GPS (para posicionamiento y sincronización) y dos teléfonos para pruebas de llamadas.

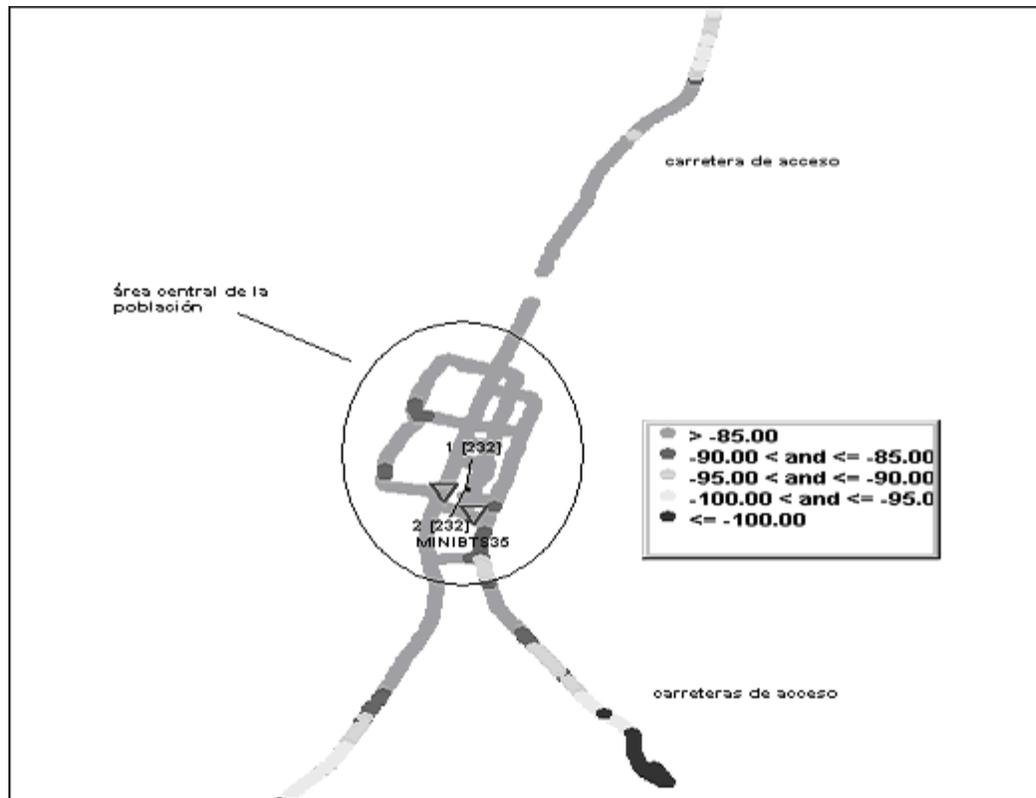
Método de Estudio de Radiofrecuencia para Repetidor CDMA

Cuando se realiza el *drive test*, el equipo se configura de tal manera que un teléfono realizan llamadas periódicas (aproximadamente cada minuto) para detectar los lugares donde existen fallas en acceso, o sea, áreas en donde no se logra iniciar llamadas. Otro teléfono se configura para que realice llamadas largas (llamadas de aproximadamente 15 minutos o más) para detectar puntos en donde haya caídas de llamadas.

En la figura 21, se puede observar el ejemplo de *drive test* realizado en una población llamada Santo Domingo, y se pueden notar los diferentes niveles de señal tanto en las carreteras de acceso como en las calles principales, lo cual se muestra con los distintos tonos de color oscuro que representan la potencia recibida por el móvil. Según se configure el equipo, antes a realizar el *drive test*, así aparecerán las señales de fallas en acceso o caídas de llamadas. Por ejemplo se puede notar que en la parte baja del pueblo aparecen dos triángulos invertidos, lo cual significa que en esa parte hay problemas de caídas de llamadas.

En el ejemplo de pruebas de cobertura de señal, en la población de Santo Domingo, se muestran los diferentes caminos de acceso que se deben tomar en cuenta al momento de realizar las pruebas. También se puede observar que en el área de mayor concentración de población, los niveles de señal son más altos en comparación con los caminos de acceso. Otra observación es que en el centro del pueblo se ven los dos sectores del sitio repetidor, que están señalados con los números 1 y 2. Dentro de los corchetes está indicado el número que corresponde al piloto que está repitiendo, el cual es el mismo para ambos sectores.

Figura 21. Prueba de potencia de señal en la población de Santo Domingo



4.3 Análisis de información recolectada

Luego de realizar el *drive test*, se procesan los datos en una herramienta de optimización y se analizan para determinar los puntos de mala cobertura.

Los niveles de cobertura pueden variar según el área en donde se esté realizando el *drive test*. Por ejemplo, en áreas de alta concentración de edificios, la señal puede decaer drásticamente hasta 15 dB, mientras en áreas boscosas puede decaer en aproximadamente 10 dB. Normalmente en dichas áreas se alcanzan niveles de hasta -95 dB, lo que se considera bastante bajo. Sin embargo, para carreteras puede ser suficiente para procesar llamadas. Las montañas son otro obstáculo natural que atenúa 10 dB la potencia recibida, alcanzando niveles muy bajos, entre -95 dB y -105 dB.

Método de Estudio de Radiofrecuencia para Repetidor CDMA

Se consideran buenos niveles de señal en áreas urbanas mayores de -85 dB. Esto porque los muros o paredes de las casas atenúan la señal entre 5 y 10 dB, por lo que se pueden hacer llamadas satisfactoriamente dentro de estas. Los valores de potencia de señal de recepción en carretera son menos exigentes, porque en carretera existen menos obstrucciones que en la ciudad. Inclusive en muchos casos hay línea de vista del repetidor con la carretera. En cambio, en la ciudad dicha potencia de recepción debe superar la obstrucción de paredes, edificios, etc. Los colores ayudan a identificar las partes más afectadas en cobertura o las fallas de procesamiento. Por ejemplo, en la imagen se observa que los colores amarillo y rojo representan la señal más baja, las áreas de señal deficiente.

Los lugares con atenuaciones repentinas están sujetos a presentar problemas tanto en fallas de acceso como caídas de llamadas; pero hay lugares donde probablemente, con buenos niveles de señal, existan caídas de llamadas. Esto, en la mayoría de los casos, se debe a que hay pilotos de celdas adyacentes que quizá anteriormente no eran vecinos, pero luego de la puesta en servicio del repetidor pasaron a ser vecinos con lo que no están declarados como tales en la central de monitoreo.

La cantidad de caídas de llamadas (*drop calls*) o fallas de acceso (*access fail*) se detecta al procesar los datos recolectados. Sin embargo, estos pueden disminuir variando algunos parámetros en el sitio repetidor, tales como el ángulo de inclinación de las antenas de servicio para lograr mejor cobertura hacia la base del sitio. Si variando dicho parámetro no se logra mejorar la cobertura de la base del sitio, se puede pensar en la posibilidad de cambiar las antenas por unas de mayor inclinación eléctrica. También se puede variar la rotación de las antenas de servicio para dirigir mejor la potencia central de la antena, pero en ocasiones hay necesidad de cambiar las antenas por antenas de diferente apertura, ya sean más o menos directivas.

En el procesamiento del *drive test* se puede observar que existen pilotos de celdas vecinas que se mezclan con el piloto que el repetidor amplifica de la celda donadora. Es necesario determinar, en el *drive test*, cuáles son los pilotos vecinos, puesto que deben declararse como tal en la central de monitoreo. De no ser así, el móvil no reconocerá otro piloto que no sea de la celda donadora, como piloto adyacente, el cual pueda tomar como activo. Al no reconocer el móvil un piloto vecino, este automáticamente terminará la llamada.

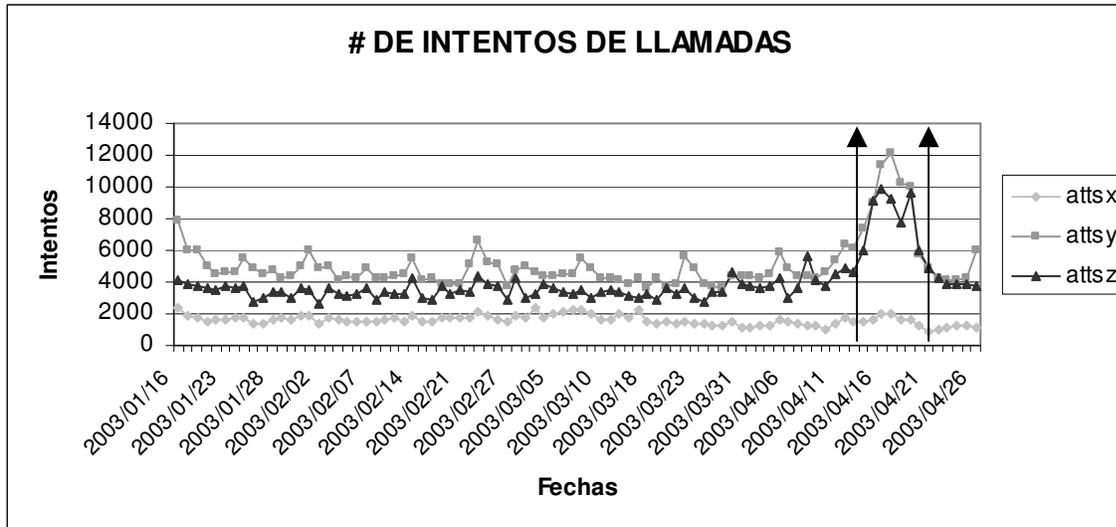
4.4 Análisis de desempeño

El análisis del desempeño consiste en analizar las estadísticas de llamadas de la celda donadora que se obtienen de la central de monitoreo. Las estadísticas se deben analizar desde aproximadamente un mes antes de la activación del repetidor, porque al revisar el desempeño de la celda donadora, se observará un aumento en la cantidad de tráfico en el sector donador. Dicho sector puede mejorar o empeorar su desempeño a nivel de procesamiento de llamadas. Si el repetidor no funciona correctamente, podría afectar negativamente a la celda donadora. Por ejemplo, un sitio celda X de tres sectores (alfa, beta y gama) al enlazar un repetidor a uno de sus sectores, por ejemplo el sector beta, experimentará un aumento a nivel de tráfico, que puede aumentar también el nivel de fallas en acceso y de caídas de llamadas. En las Figuras siguientes, se analiza el desempeño de un sitio de celda donador en donde alfa es X, beta es Y y gama es Z.

Las figuras que se analizan al momento de elaborar el reporte de optimización son: estadística de intentos, estadística de fallas en acceso, estadística de llamadas caídas y estadística de llamadas completadas con éxito. Estas figuras ayudan a tener una idea más clara del comportamiento de la celda donadora con enlace al repetidor.

La influencia del repetidor sobre la celda donadora se puede observar en las siguientes figuras; por ejemplo, en la figura 22 la cantidad de intentos de llamadas antes de ser activado el repetidor es más o menos constante. Sin embargo, en el período corto, delimitado por las flechas, en que se activó el repetidor se nota el aumento en la cantidad de llamadas.

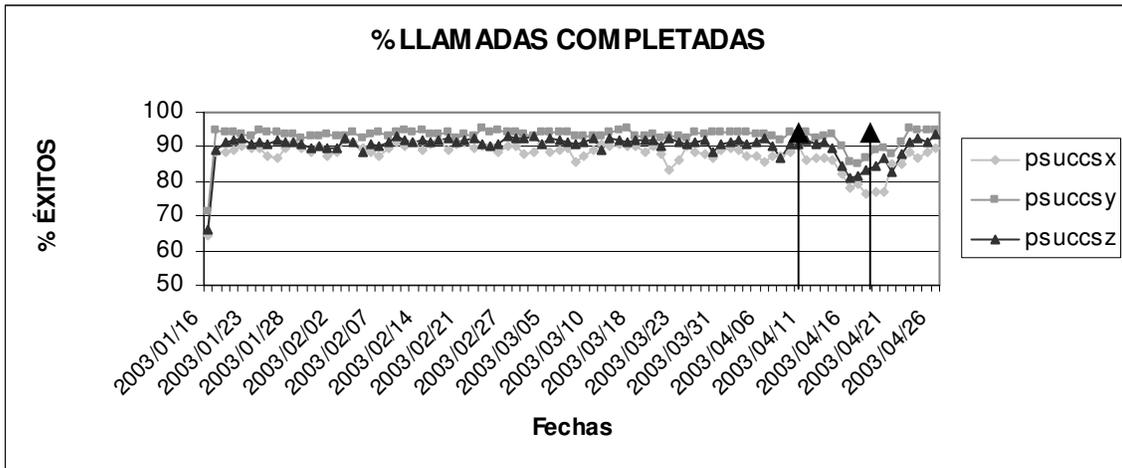
Figura 22. Cantidad de intentos de llamadas



Al revisar la figura de intentos de llamadas es necesario revisar el aumento de tráfico que hubo en el sector donador; también es necesario observar qué comportamiento tienen los otros sectores.

La figura de porcentaje de llamadas completadas, ver figura 23, indica qué tanto mejoró o empeoró el nivel de llamadas realizadas con éxito. Esta figura nos ayuda a calificar el nivel de procesamiento de la celda donadora. No debe observarse un cambio drástico en el porcentaje de llamadas completadas. Este valor debe estar arriba del 90% para que se considere bueno. Si se encuentra debajo de este nivel puede haber problemas de llamadas caídas o de acceso.

Figura 23. Porcentaje de llamadas completadas



La figura de llamadas caídas nos muestra el porcentaje de llamadas que se perdieron, del total de llamadas realizadas por día.

Las llamadas caídas, como se observa en la figura 24, se dan normalmente por disminución drástica de la potencia piloto o por polución; su valor no debe exceder el 5% lo cual significa que un 95% de las llamadas no debe experimentar caídas. Si dicho valor se excede, es necesario observar en el *drive test* (figura de niveles de potencia y procesamiento) en qué partes del pueblo o carretera los niveles de señal son bajos y muestran problemas de procesamiento. Si es posible, se pueden realizar movimientos en las antenas de servicio.

La figura de fallas en acceso, en la figura 25, muestra qué tantos problemas se tienen en la celda donadora para que el móvil ingrese a la red.

Las fallas de acceso son aquellas llamadas que no logran completarse con éxito. Para esta figura no debe sobrepasar el 5%.

Figura 24. Porcentaje de llamadas caídas

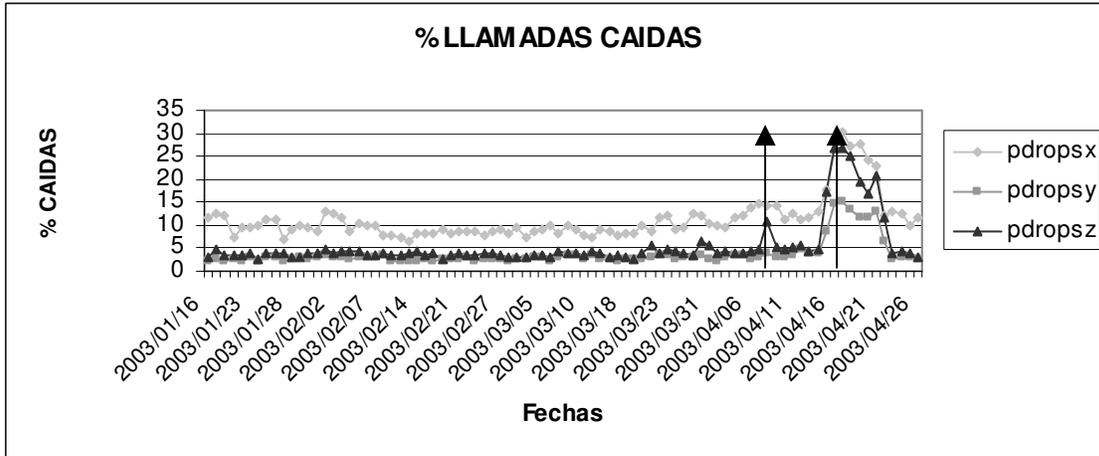
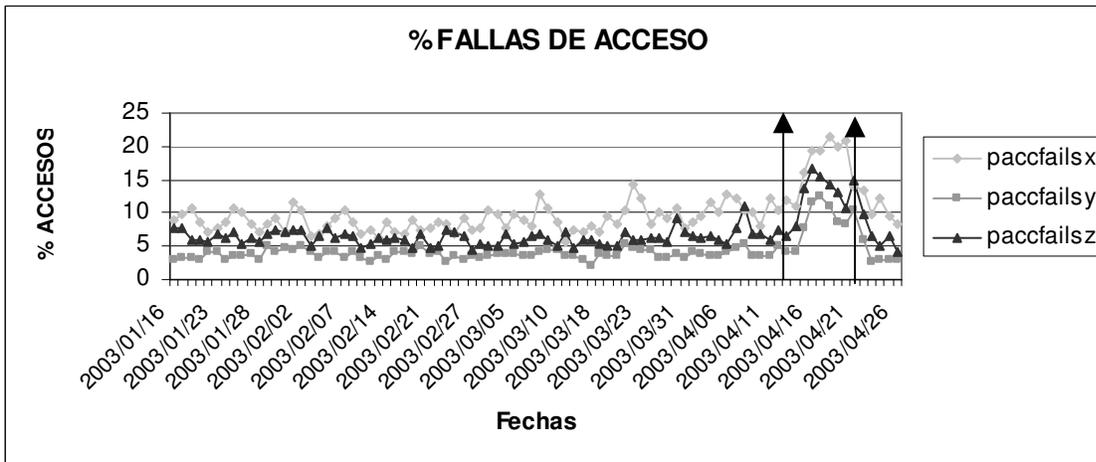


Figura 25. Porcentaje de fallas de acceso



Las figuras mostradas anteriormente representan únicamente los tipos de estadísticas que se pueden analizar para controlar el procesamiento de una celda donadora. En esas figuras se observa el momento en que se integra un repetidor a la red por los cambios que se ven en las estadísticas del sector donante.

5. FACTIBILIDAD DE APLICACIÓN DEL MÉTODO

5.1 Introducción

La baja calidad de procesamiento, la mala cobertura de señal, las pérdidas en recursos, la inconformidad por parte del cliente, etc. son algunos de los efectos derivados de la falta de empleo de un método que permita el desarrollo eficiente de cualquier proyecto en radiofrecuencia.

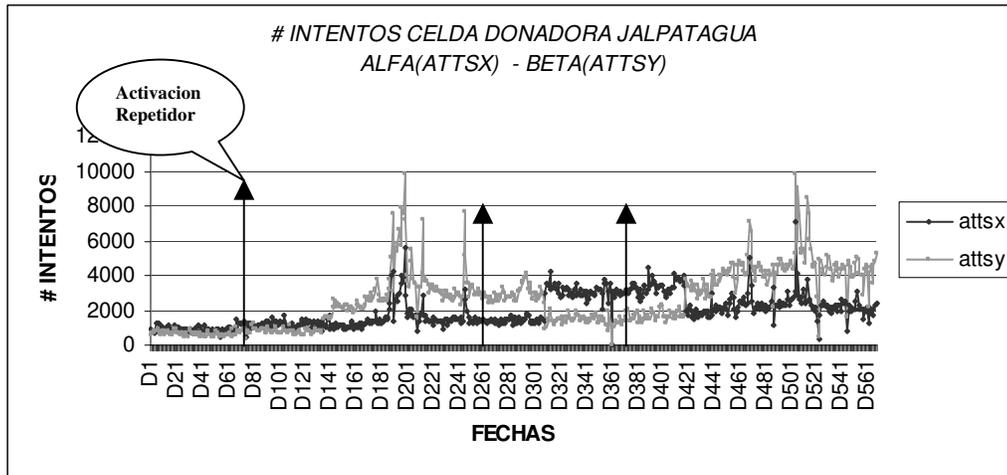
En este capítulo se presentan 2 casos, en los cuales se realiza el análisis de los efectos provocados por el enlace de un repetidor a un sitio celda donador. El primer caso corresponde al sitio de celda Jalpatagua, el cual se utilizó como donador para el sitio repetidor de Conguaco. En el proceso de estudio del repetidor de Conguaco no se tomaron en cuenta varios aspectos que a la larga afectaron negativamente el sitio de celda donador, el cual se encontraba en operación desde hacía varios meses. Ese sitio de celda, que paso a ser donador utilizando el sector alfa, se encontraba operando con normalidad; sin embargo, pocos días después de que se puso en operación el repetidor, el sitio de celda donador empezó a manifestar problemas de procesamiento y de caídas de llamadas y, por lo, tanto insatisfacción por parte de los usuarios. Luego, en la segunda parte del capítulo, se hace el análisis de desempeño del sitio repetidor de Santo Domingo Xenacoj, utilizando como sitio celda donador al de Sumpango. Para este caso, se consideraron todos los aspectos sugeridos para el método de estudio que se propone en el presente trabajo. Para los estudios que se presentan en este capítulo, se realiza el mismo análisis con la idea de tener una comparación directa de los resultados obtenidos en ambos trabajos y, de esta forma, determinar los efectos negativos de no aplicar algún método.

5.2 Análisis de repetidor de Conguaco

En la figura número 26, se observan los intentos de llamadas de la celda donadora Jalpatagua. Se muestran únicamente los sectores alfa y beta, ya que el sector gama no presentó variación alguna en el estudio del repetidor de Conguaco. Además, se utilizaron por efectos de referencia las fechas D#. En las fechas previas a la activación del repetidor, la cantidad de intentos para los sectores alfa y beta, identificados en la figura como attsx y attsy respectivamente, contaban con 1,600 intentos de llamadas en promedio por día. La fecha aproximada de la activación del repetidor fue en el día D121. Para la activación del repetidor, se tomó inicialmente la señal piloto del sector beta. Luego de la activación del repetidor, se observa en la figura de intentos que los niveles de tráfico del sector donador, beta, aumentan en aproximadamente un 100%. Esto significa que alcanza los tres mil intentos.

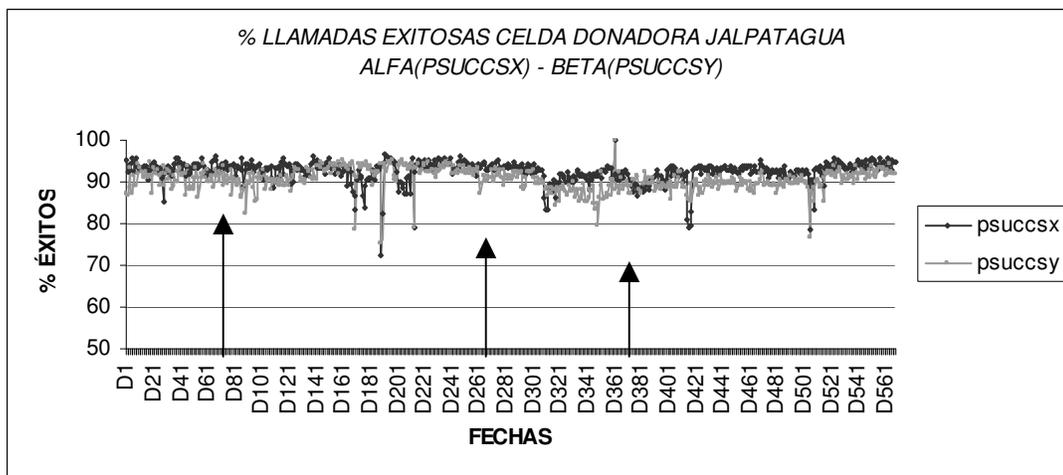
Entre los días D181 y D221, de la figura de intentos, se observa un drástico aumento de tráfico en los sectores alfa y beta debido a fechas especiales en el poblado. Luego, los niveles de tráfico vuelven a los niveles promedio anteriores. Sin embargo, varios meses después, luego de observar el procesamiento de la celda donadora, es necesario cambiar el sector donador beta al sector alfa, ya que la celda donadora se ve afectada por caídas de llamadas y fallas en accesos, como se percibe en las figuras 28 y 29 respectivamente. El cambio de sector donador se observa en el cambio de los niveles de tráfico, que aconteció aproximadamente en el día D301. Se observa que alfa sube su tráfico de 1,600 a 3,500 y beta disminuye drásticamente su tráfico de 3,500 a 1,600.

Figura 26. Intentos de llamadas del sitio de celda Jalpatagua



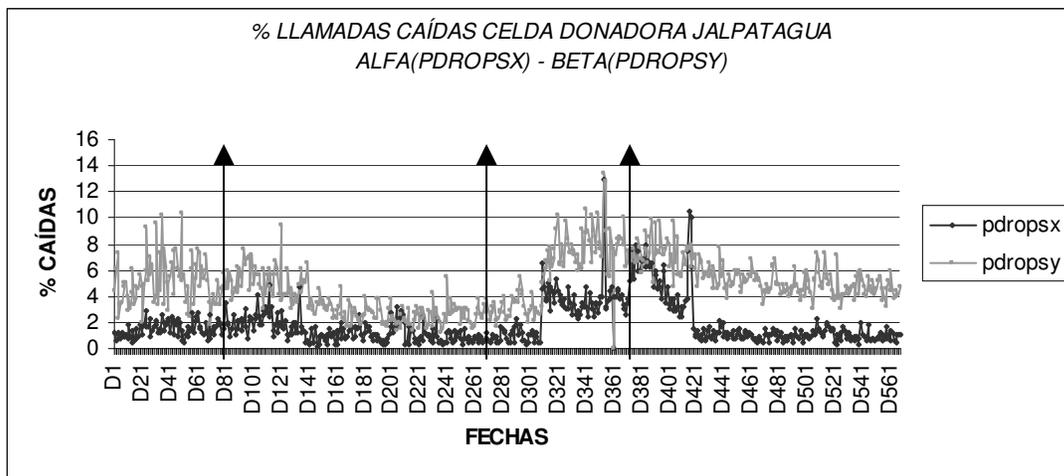
En la figura de llamadas logradas con éxito, figura 27, también se pueden observar los efectos negativos provocados por el repetidor de Conguaco. Por ejemplo, antes del día D121 en que se activó el repetidor, la celda donadora mostraba los picos más bajos de procesamiento en un 85%, que se considera lo mínimo aceptable. Luego de la adición del repetidor, el procesamiento del sitio de celda donador decayó en picos bajos de aproximadamente 72%, como se observa en días como D181 o D501, entre otros.

Figura 27. Procesamiento del sitio de celda Jalpatagua



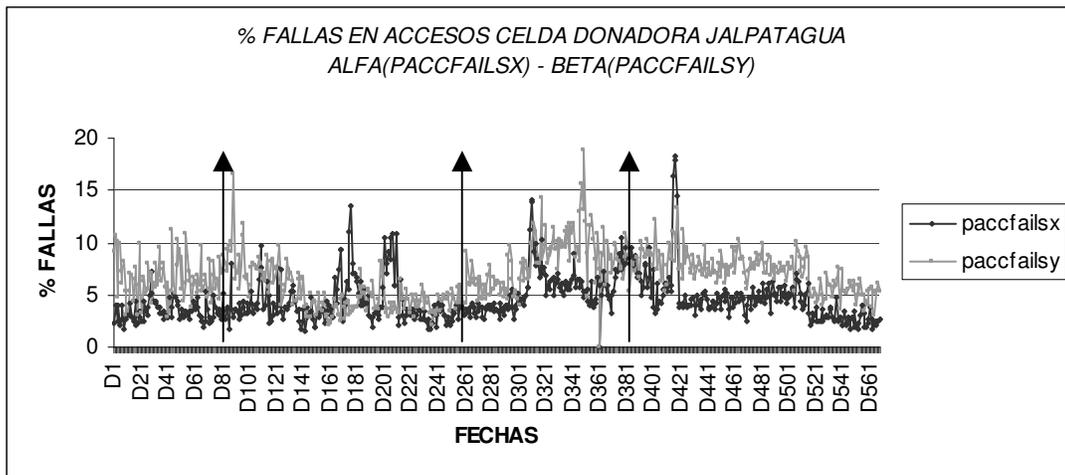
En lo relacionado con los niveles de llamadas caídas, se puede notar claramente que en el período en el que el sector beta es el donador, dicho sector beta muestra un aumento en el porcentaje de llamadas caídas de un 3% a un 8%, alcanzando en ocasiones un 12%. Luego se realiza el cambio de donador hacia el sector alfa, el cual incrementa sus niveles de llamadas caídas. Esto explica cómo el mal desempeño del repetidor puede no solo afectar el sector donante, sino también los otros sectores del sitio de celda donador, lo que incide en el desempeño de la red.

Figura 28. Porcentajes de llamadas caídas de sitio celda Jalpatagua



Los problemas de acceso al sistema, figura número 29, se evidencian luego de activado el repetidor, ya que los sectores que sirvieron de donadores, sectores alfa y beta, aumentaron sus fallas de acceso. Para el sector alfa hay puntos que sobrepasan el 10%, y para el sector beta hay puntos que sobrepasan el 15%, alcanzando casi el 20% de fallas de intentos de llamadas. Esto significa que la calidad del servicio es mala, ya que los niveles de fallas de acceso no debieran sobrepasar el 6% o 7%.

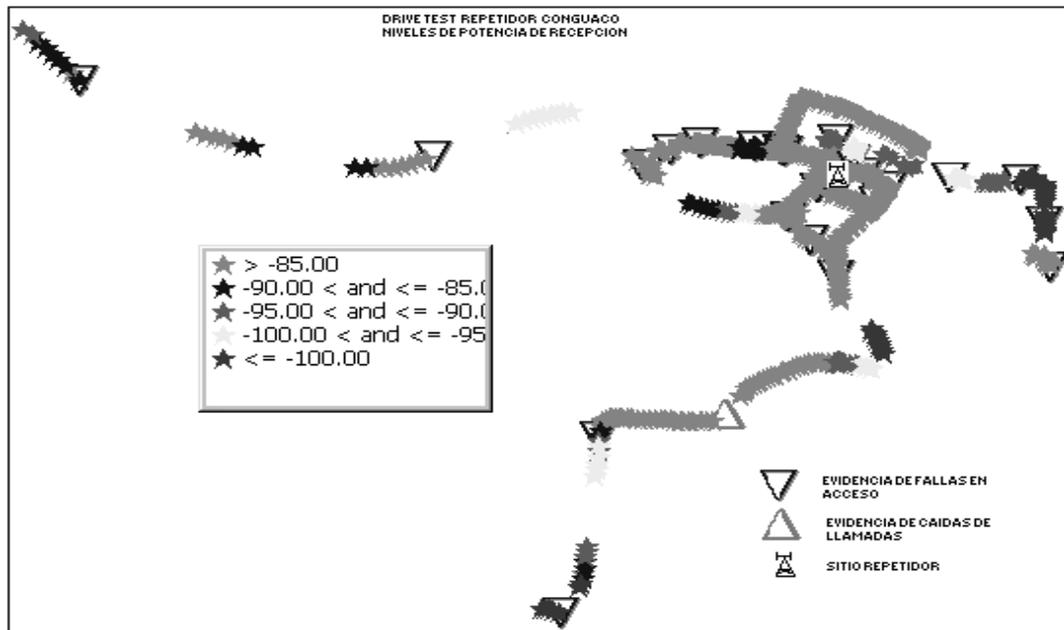
Figura 29. Porcentajes de fallas de accesos del sitio celda Jalpatagua



El *drive test* es parte fundamental en el análisis de señal de un repetidor, porque permite tener una visión más clara del alcance del repetidor en las calles o vías de acceso del pueblo o parte de la ciudad. Además de visualizar el enlace con sitios de celda aledaños u otros repetidores, también permite determinar los puntos con problemas de acceso y caídas de llamadas, y los lugares con baja calidad de señal en la población; luego de realizar el *drive test*, se analizaron los datos y se localizaron los puntos con problemas de acceso al sistema. Esto significa que un móvil ubicado en esos puntos tendrá problemas al tratar de realizar una llamada; inclusive en áreas de cobertura arriba de 80 dBm, se observaron dichos problemas. Las fallas de acceso son consecuencia de desbalances en los canales hacia delante e inverso, que se deben en algunos casos, a que la ganancia del móvil hacia la celda (*uplink*), en el repetidor, no es suficiente como para que exista comunicación del móvil hacia la celda. En algunos casos, esta es la razón por la que incluso observando una buena señal en el sitio repetidor, se detectan problemas de acceso al sistema. En el repetidor de Conguaco se observa este problema en varias calles del pueblo, según la figura 30 de muestreo de potencia del repetidor de Conguaco. También se pueden observar las caídas de señal repentinas, de -85 dBm hasta los -100 dBm.

Otra hipótesis puede ser que en el sitio repetidor haya problemas de aislamiento debido a retroalimentación infinita del piloto entre la antena de servicio y la antena donadora. Este problema se debe a que dichas antenas no están lo suficientemente alejadas o aisladas una de la otra. Hay que recordar que la cobertura en todo el pueblo se debe únicamente al piloto donador.

Figura 30. Drive test realizado en Conguaco



Para el repetidor de Conguaco, en el estudio de radiofrecuencia se determinó su configuración para 2 sectores. Uno de estos sectores se orientó en dirección de la carretera de acceso al pueblo; el otro se orientó hacia la parte este del pueblo, como se observa en el muestreo de potencia, *drive test*.

Según lo mostrado por el muestreo de potencia, buena parte del pueblo presenta niveles de cobertura por arriba de -85 dBm, según tono de gris que corresponde. Sin embargo, hay áreas en las que la señal se pierde completamente. Los niveles más bajos se encuentran en el orden entre los -95 dBm y -108 dBm. Normalmente los niveles más bajos de cobertura se presentan en los puntos fuera de la línea vista del repetidor, áreas densamente boscosas o lugares de alta concentración de edificios, así como puntos bastante alejados del sitio, alrededor de los 10 km en línea vista con el repetidor; sin embargo, a juzgar por el tamaño del pueblo de Conguaco, su topografía y que en dicho pueblo al momento no tiene edificios que hagan sombra en radiofrecuencia, los problemas de señal quedan evidenciados por las variaciones bruscas en los niveles de potencia. Se puede observar que la potencia de señal cae repentinamente unos 15 o 20 dBm, situación que no concuerda con el estudio previo de cobertura de señal.

5.3 Conclusiones

El repetidor de Conguaco presentó problemas de aislamiento por no determinar adecuadamente la separación entre antenas y por no ajustar su ganancia o atenuación a niveles que permitieran su buen desempeño. Por eso el primer error cometido fue el de no haber realizado un estudio físico del lugar en donde se consideraba sería instalado el repetidor. En la visita es necesario medir la potencia de la señal del o los posibles candidatos para sitio donador, así como observar la topografía del área del pueblo. Con esto se puede tener una idea clara de las orientaciones de las antenas de servicio según los requerimientos de cobertura. Al no realizar la visita física al sitio, los soportes de las antenas no fueron bien orientados, dejando partes del pueblo sin cobertura.

La importancia de optimizar la cobertura de un sitio repetidor es que se puedan detectar problemas de cobertura, calidad de señal y procesamiento de llamadas.

Es importante observar el alcance que pueda tener el repetidor, ya que si este llega a cubrir áreas donde hay pilotos de otros sitios de celda ajenos al donador, puede provocar problemas de polución de pilotos, es decir, mezcla de pilotos de celdas no vecinas, porque dichos pilotos ajenos no se encuentran declarados como vecinos en la estación de monitoreo central o que en el punto de polución los pilotos presentes tienen tanta potencia que no permiten que el móvil realice correctamente el proceso de *handoff* o de salto de un piloto a otro.

5.4 Análisis de repetidor Xenacoj (método aplicado)

5.4.1 Introducción

Anteriormente se explicaron los problemas derivados de no haber realizado correctamente el estudio del repetidor de Conguaco y los que desencadenaron en cuanto al procesamiento del sector donante, calidad de servicio e inconformidad del usuario, tanto en el área del repetidor como en la celda donadora.

El análisis de esta sección tiene como base el estudio de radiofrecuencia sugerido, que considera los aspectos que se proponen, así como algunas sugerencias para cumplir con los objetivos establecidos. Este análisis cubre el estudio inicial de cobertura, las visitas al campo donde se instalará el repetidor, las mediciones de potencia y aislamiento para considerar las alturas de las antenas, la predicción de cobertura, y la optimización y análisis de desempeño de la celda donadora.

5.4.2 Estudio de campo

En la primera visita realizada a Xenacoj, tal y como se planteó en el método de estudio propuesto, se realizó la búsqueda visual del punto de ubicación óptimo para el sitio repetidor. En dicha búsqueda se tomaron en consideración aspectos como la topografía del pueblo, el acceso a la energía eléctrica, el tamaño estimado de la torre, la cantidad de antenas sectoriales, y los ángulos de orientación de las antenas sectoriales.

Hay dos aspectos muy importantes que fueron considerados al momento de realizar la primera visita en Xenacoj. Uno fue medir el nivel de potencia de señal de recepción utilizando un teléfono móvil de prueba, lo que permitió calcular la posibilidad de instalar un sitio repetidor. Para el caso del pueblo en el que se realizó el estudio, la medición con el teléfono de prueba fue de aproximadamente -98 dBm, lo cual dio la idea de que con la antena donadora ubicada aproximadamente a unos 40 metros de altura en la torre se alcanzarían a medir -85 dBm, o sea, se lograría ganar entre 10 y 15 dBm, ya que a esa altura se lograría línea vista con la celda donadora, lo cual sería suficiente para repetir. También se consideró dicha altura, ya que así es factible sobrepasar cualquier obstáculo en el camino, árboles o edificaciones altas. Para finalizar, se midieron las coordenadas de ubicación de los puntos propuestos que cumplen con los requerimientos del sitio repetidor.

5.4.3 Análisis de propagación

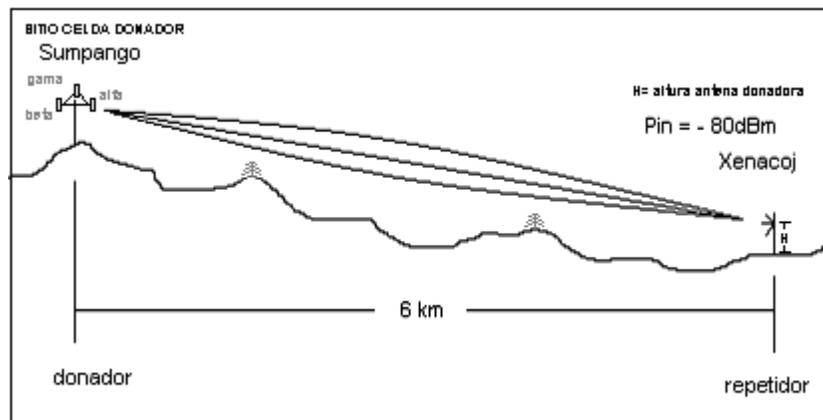
Con los datos obtenidos en el estudio de campo, se realizó el análisis de propagación del sitio repetidor. Para ello se hizo la predicción utilizando un *software*, que permite visualizar por computador la cobertura que se logra según algunos datos, como altura de las antenas de servicio, modelo de propagación, ganancia de las antenas, ángulo de apertura de las antenas y ángulo de orientación de las antenas. Se tomó en cuenta la altura de la antena donadora, ya que es imprescindible que exista un buen aislamiento con las antenas de servicio, y la línea de vista con el sitio donador. Para este caso se observó que colocando las antenas de servicio a una altura de 60 metros se cubriría el pueblo en su totalidad incluyendo la carretera de acceso, mientras que colocando la antena donadora a 40 metros se lograría línea de vista suficiente con el sitio de celda donador. Además, con una diferencia de 20 metros entre la antena donadora y las de servicio sería poco probable tener problemas de aislamiento, lo que evitaría la limitación de ganancia en el repetidor por aislamiento y permitiría tener suficiente potencia de salida.

Al realizar el estudio previo a la instalación del repetidor es necesario revisar las estadísticas del sitio de celda donador, las cuales incluyen la cantidad de tráfico de llamadas, porcentajes de procesamiento de llamadas, llamadas caídas, fallas de acceso y porcentaje de

bloqueos para los casos de sitios que manejan altos niveles de tráfico. Esto permitió determinar el sector que serviría de donante, basándose en la cantidad de tráfico y sus estadísticas, además de lograr continuidad en el piloto donador en la dirección del repetidor. En el caso de Sumpango se observó que el sector alfa cumplía con los requerimientos necesarios para servir de sector donador, ya que los niveles de tráfico de dicho sector no sobrepasaban los dos mil intentos. También al utilizar dicho sector se lograba continuidad del piloto, o sea que la cobertura del piloto del sector alfa del sitio donador no sería separado por otro piloto, además de estar en la misma dirección del repetidor.

Algo muy importante es que en el momento de que la torre de telecomunicaciones ya está instalada, se realiza una nueva visita al sitio repetidor para verificar que la antena donadora tendrá línea vista con el sitio celda donador según la altura que se consideró para la antena donadora. También se debe medir la potencia de recepción que se tiene a la altura que será colocada dicha antena, utilizando un teléfono en modo de prueba. Como se dijo anteriormente, esto se realiza con la idea de asegurarse de que las consideraciones hechas en el estudio previo de campo son correctas.

Figura 31. Línea de vista Sumpango- Xenacoj



Al realizar el análisis de línea de vista del repetidor con el sitio celda donador, como se observa en la figura 31, se determinó que la distancia de línea vista era suficiente para poder repetir. En la torre instalada en el repetidor se midió la potencia de recepción para determinar la altura de la antena donadora, calculando -80 dBm. Tomando en cuenta que la antena donadora tiene ganancia de 25 dBm, se determinó que se lograría aproximadamente entre -55 dBm y -58 dBm de potencia de recepción.

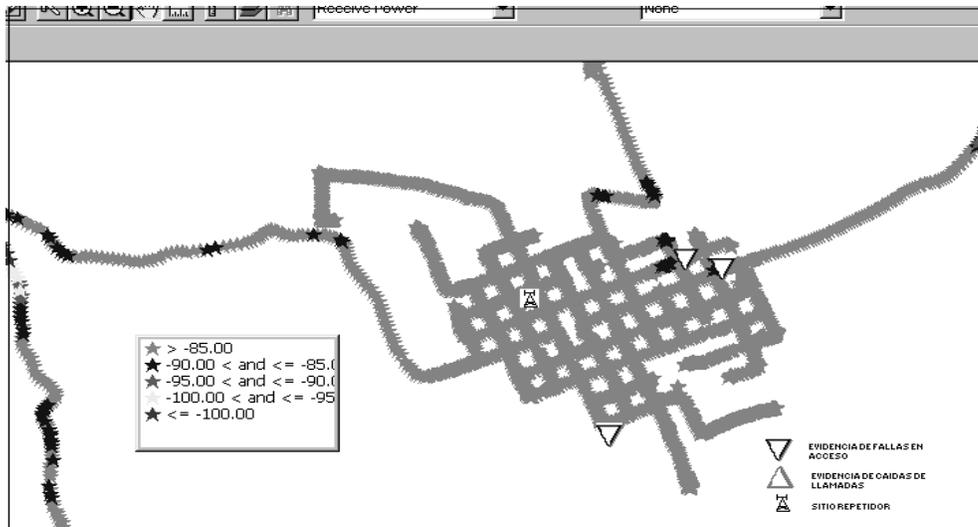
Al momento de la activación del repetidor, se realizaron las pruebas correspondientes de aislamiento para calcular la ganancia necesaria hasta alcanzar la potencia de salida máxima posible; en las pruebas de aislamiento se midió aproximadamente -100 dBm de aislamiento entre las sectoriales y la antena donadora, lo que se consideró suficiente para proporcionar ganancia suficiente en el repetidor.

5.4.4 Optimización

En la figura 32, que muestra el *drive test* del pueblo de Xenacoj, se observa el alcance en cobertura logrado con el repetidor. El recorrido de prueba se realizó en todas las calles del pueblo, y de los caminos de acceso. Esto permitió determinar las áreas de cobertura deficiente, así como los puntos con fallas de acceso y caídas de llamadas; se determinó cuáles son los nuevos sitios vecinos de la celda donadora. En la Figura de *drive test* del pueblo de Xenacoj se puede observar que cuenta con niveles de cobertura de señal arriba de -85 dBm en un 95% del pueblo. Las fallas en acceso se muestran con triángulos invertidos y son producto de pilotos de otras celdas vecinas que llegan a dichos puntos o probablemente a que el canal del móvil hacia la celda requiriera de menos atenuación. Es por esta razón que se declaran los nuevos vecinos a la central de monitoreo. En el centro del pueblo no se observan problemas de caídas de llamadas, ya que los niveles de cobertura son suficientemente altos y no existe problemas de des-balance entre los canales hacia delante e inverso. Los puntos oscuros son variaciones de señal entre -85 dBm y -90 dBm.

Se considera que para áreas de alta concentración de casas y edificios debe tener niveles de señal arriba de -85 dBm, ya que la atenuación provocada por paredes es de aproximadamente de 10 dBm, teniendo niveles para procesamiento de señal arriba de -90 dBm. Sin embargo, en carretera se aceptan niveles un poco bajos.

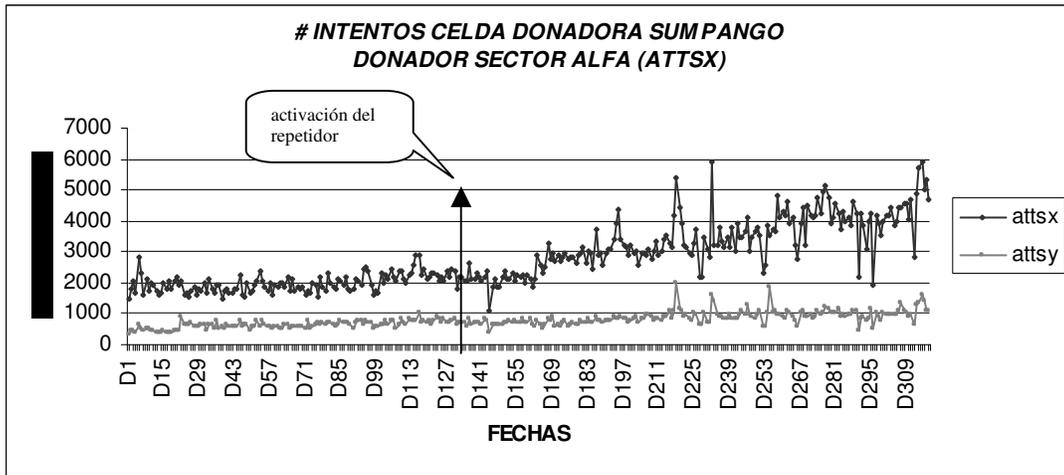
Figura 32. Drive test realizado en Santo Domingo Xenacoj



5.4.5 Estadísticas de celda donadora de Sumpango

Al realizar el análisis de estadísticas de la celda donadora, se observa cómo ha variado su procesamiento, básicamente en el sector donante (figura 33). Por ejemplo, para el sector alfa, que se está utilizando como sector donante para el sitio repetidor de Xenacoj, la cantidad de intentos de llamadas era de aproximadamente dos mil llamadas antes de poner en operación el repetidor. Luego de varias semanas de estar en operación el repetidor, el sector donante alcanzó niveles de intentos de hasta cinco mil quinientos. Observar que el sector restante beta no sufrió ningún cambio significativo.

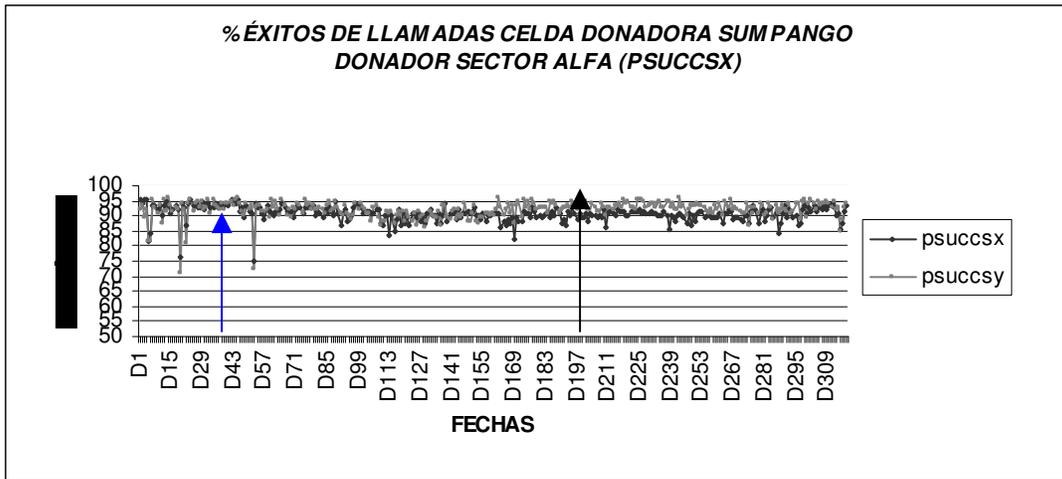
Figura 33. Intentos de llamadas del sitio celda Sumpango



En la figura de porcentaje de éxitos, figura 34, tenemos el porcentaje de llamadas que se completaron con éxito. Dicho porcentaje para el sector alfa se mantuvo en niveles arriba del 90%. Incluso se puede advertir que antes de la activación del repetidor hubo picos bajos de aproximadamente 80%. Hay que considerar que el tráfico de llamadas del sector alfa alcanzó niveles arriba del doble (5,500 llamadas aproximadamente) de la cantidad de llamadas que tenía antes de la activación del repetidor. Por esta razón es lógico que las probabilidades de fallas de acceso y caídas de llamadas puedan aumentar.

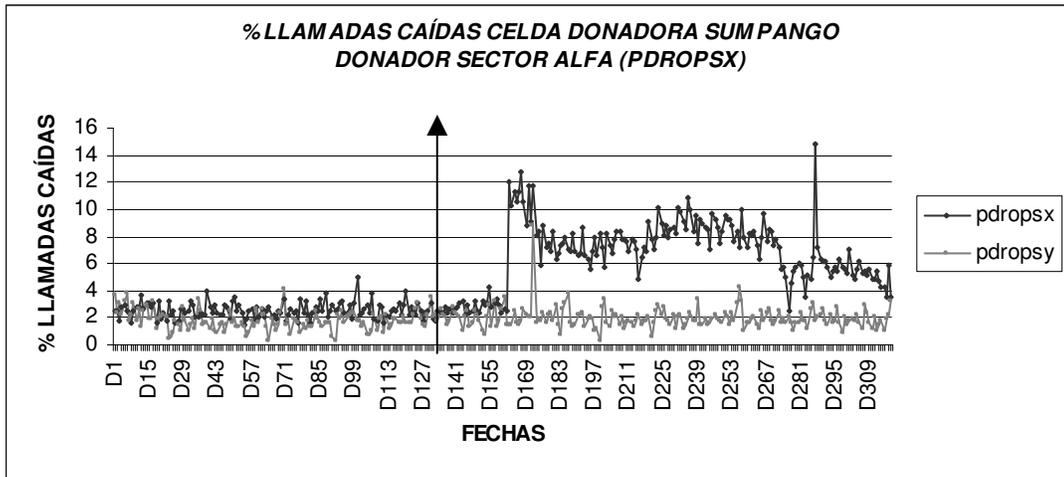
Como el sitio de celda donador aumentó su cobertura de señal, desde la activación del repetidor, este puede experimentar un leve aumento en el porcentaje de fallas de acceso, disminución en el porcentaje de procesamiento o aumento de porcentaje de llamadas caídas.

Figura 34. Porcentajes de procesamiento del sitio celda Sumpango



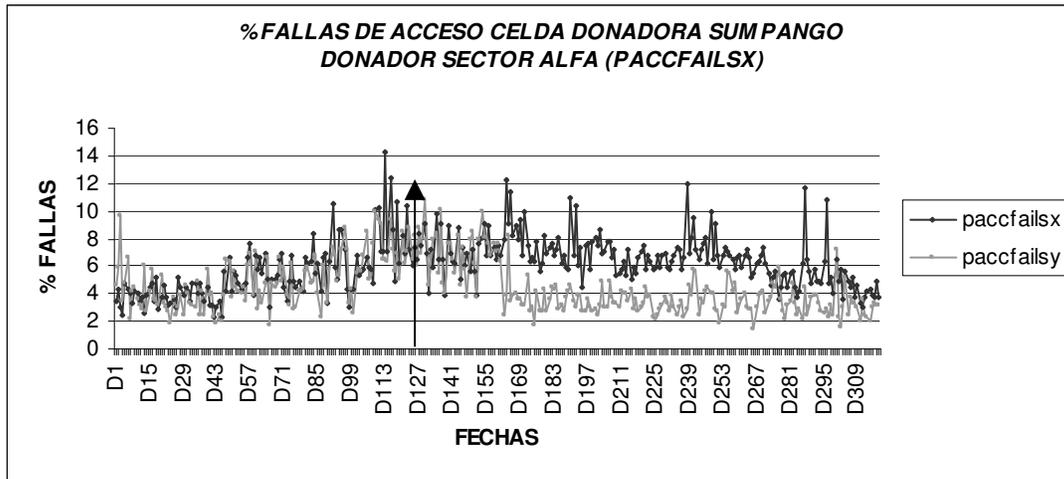
En la figura de porcentaje de llamadas caídas, figura 35, el día D155 se observa que el sector donador alfa experimentó un aumento drástico en caídas de llamadas desde el momento de la activación del repetidor de aproximadamente un 3% hasta aproximadamente un 9% de llamadas caídas. La razón del descenso de la calidad de procesamiento fue que desde el momento de la activación del repetidor hay un período pequeño en el que no se observa cambio alguno, pero tiempo después, cuando el tráfico aumenta gradualmente, se observa que la calidad de procesamiento disminuye. Esto se debe a que el sitio repetidor se optimizó tiempo después. Esta es la razón por la que la calidad de procesamiento fue mejorando, y disminuyó el porcentaje de caídas de llamadas hasta un 5% aproximadamente; para el sector restante, los porcentajes se mantuvieron sin cambio alguno.

Figura 35. Porcentajes de llamadas caídas del sitio celda Sumpango



Como era de esperar, debido al aumento de tráfico de llamadas del sector donador alfa, los niveles de fallas de acceso aumentaron (ver figura 36), pero no en forma significativa. Aquí también se puede observar que luego de la activación del repetidor, los niveles de fallas de acceso aumentaron, pero después de optimizar el sitio, el porcentaje de fallas de acceso disminuyó hasta un 5% aproximadamente, nivel que se considera dentro del rango aceptado. En esta figura se puede observar que el sector beta tenía niveles arriba del 5% de fallas de acceso, pero con la activación del repetidor estos mejoraron su calidad de procesamiento. La razón de este mejoramiento es que dichos sectores no alcanzaban a cubrir áreas, de carretera o del pueblo, en forma eficiente, o sea que tenían niveles muy bajos de señal. Esto provocaba que en dichas áreas hubiera dificultad de acceso a la red. Sin embargo, en el momento que el repetidor se puso en funcionamiento, estas áreas de cobertura deficiente pasaron a tener una señal con mucha más potencia descargando levemente el sector restante.

Figura 36. Porcentajes de fallas de acceso del sitio celda Sumpango



5.5 Conclusiones

Para resumir, se puede observar la diferencia de utilizar un método de planificación que ayude a evitar contratiempos que se reflejen en un mal servicio. Esto significa que es necesario contar con una base que ayude a considerar todos los aspectos necesarios para el desarrollo de un buen proyecto. En el caso del repetidor, se puede observar que los malos resultados se encuentran desde el principio, ya que al no realizar un análisis correcto en radiofrecuencia, las consecuencias para el sitio de celda, que se utilizará como donadora, pueden ser bastante graves, al punto de llevarla al bloqueo, aparte de la pérdida en tiempo. Entonces los estudios en mapas acerca de la topografía de un sitio repetidor deben estar ligados con la comprobación en campo para propósitos de verificación de línea vista y configuración del repetidor. Pero no solo se trata de configurar bien un repetidor y de lograr la cobertura necesaria, se trata también de darle seguimiento a su desempeño, esto es optimizar su desempeño, ya que el funcionamiento del repetidor se ve reflejado en la celda donadora, específicamente en el sector que se utiliza como donante.

6. ANÁLISIS DE COSTO DE OPORTUNIDAD

6.1 Introducción

Es importante considerar la dimensión de las pérdidas provocadas por el mal desarrollo de un proyecto. Estas incluyen la inversión en tiempo y los gastos en infraestructura de sitio en lo que respecta al diseño en el sistema radiante, ya que los errores al elaborar el estudio de radiofrecuencia pueden provocar en la necesidad de cambiar guías de onda o antenas radiantes, o inclusive el mismo equipo repetidor. Lógicamente esto representa gastos económicos bastante elevados, en comparación con el presupuesto neto inicial que se tiene para un sitio repetidor.

Una planificación adecuada que lleve al buen desarrollo de un proyecto nos permite evitar el mal uso de recursos. En el presente capítulo se observan los pasos que describen el seguimiento que se le debe dar al método de estudio propuesto mediante un diagrama de flujo. Se puede dividir en tres fases para reconocer los puntos en los cuales se debe poner mayor atención para evitar errores que resulten en pérdidas de tiempo y dinero.

6.2 Parámetros de consideración

Los parámetros de consideración son aquellos de mucha importancia y que inciden en los resultados finales, como pérdidas económicas y retraso en la ejecución en las otras fases del proyecto.

a) Acceso a energía

En la primera parte del estudio de radiofrecuencia, a nivel de campo, se mencionó la consideración de la energía en los puntos sugeridos para la instalación del sitio repetidor. Para este caso, la distancia de ubicación de la energía comercial significa verificar qué tan lejos se encuentran las líneas de energía eléctrica de los puntos de ubicación propuestos, ya que el trámite que requiere la solicitud de energía con camino posteo puede tardar de 1 a 4 meses. Hay que considerar que en ocasiones es necesario negociar derecho de paso, lo que aumentaría los gastos.

b) Línea de vista

Cuando se hace el análisis de línea vista, es importante asegurar la altura a la que se instalará la antena donadora en la torre del repetidor y ubicar el sitio repetidor desde el sitio donador, utilizando binoculares y brújula. Si se mide incorrectamente la potencia de recepción, puede haber necesidad de subir o bajar la antena donadora para buscar la mejor potencia de recepción. Pero esto significa cambiar la guía de onda de la antena donadora para colocar otra que se ajuste a la altura necesaria, lo que implica tiempo de instalación de la guía, contar con el personal disponible para realizar dicho trabajo extra y realizar nuevas pruebas de pérdidas y reflexión. En el peor de los casos, si al realizar las pruebas de potencia de recepción se determina que los resultados no son adecuados, podría darse la posibilidad de utilizar un enlace punto-punto, colocando otra antena donadora en el sitio donador orientada hacia el repetidor, tomando la señal de la guía de transmisión del sector donador utilizando un divisor 1 a 2. Sin embargo, esto elevaría los costos de la inversión en varios miles de dólares, además del tiempo que se invierte en solicitar los permisos respectivos para realizar dicho trabajo.

En caso extremo, si la toma de potencia por aire no es la solución, entonces se puede considerar utilizar la fibra óptica como medio de enlace.

c) Análisis de propagación

El análisis de propagación debe realizarse tomando en cuenta las prioridades de cobertura y utilizando el modelo de propagación que mejor se asemeje a un modelo real según la topografía del terreno.

En algunas ocasiones, el alcance en cobertura del repetidor no es suficiente, ya sea por la altura de las antenas, los ángulos de orientación o los grados de apertura de las antenas. En ocasiones, por error al utilizar modelos de propagación ideales, se crea una falsa imagen de cobertura óptima, lo cual no permite visualizar correctamente el alcance del repetidor en cobertura que se puede lograr o los movimientos en el sitio repetidor que sería necesario realizar. Un error de este tipo causaría problemas de cobertura, al estar el repetidor en operación; inclusive podría ser necesario instalar otro repetidor en cascada para lograr la cobertura deseada. Esto significaría un costo total duplicado, tanto en el nivel económico como en tiempo. En la sección 6.4 se analizará el costo por error cometido en la planificación y ejecución de un sitio repetidor.

d) Análisis de sitio donador

Es importante analizar adecuadamente el sitio que servirá de donador, ya que un sitio con niveles de tráfico altos, de aproximadamente ocho mil intentos en adelante, podría presentar problemas de bloqueos al enlazar un repetidor a este, lo que reduciría sus niveles de procesamiento en un 20% o un 30%.

e) Optimización

Al optimizar la cobertura del sitio repetidor, el *drive test* debe realizarse lo más detallado posible. Si no se detectan los nuevos vecinos que tendrá la celda donadora, por la cobertura del repetidor, se pueden producir problemas de caídas de llamadas, además de determinar las áreas con problemas de cobertura.

Un sitio celda con problemas de caídas de llamadas provoca pérdidas de varios miles de quetzales. Por ejemplo, si el sector donador de un sitio celda está procesando diariamente alrededor de siete mil llamadas, y al engancharle un repetidor, al sector donador empieza a presentar problemas de caídas de llamadas, dicho sector donador dejará de procesar alrededor de mil llamadas diarias, lo que representa alrededor del 14%; sin mencionar si existen problemas de fallas de acceso. Es por esto la necesidad de optimizar adecuadamente un sitio repetidor.

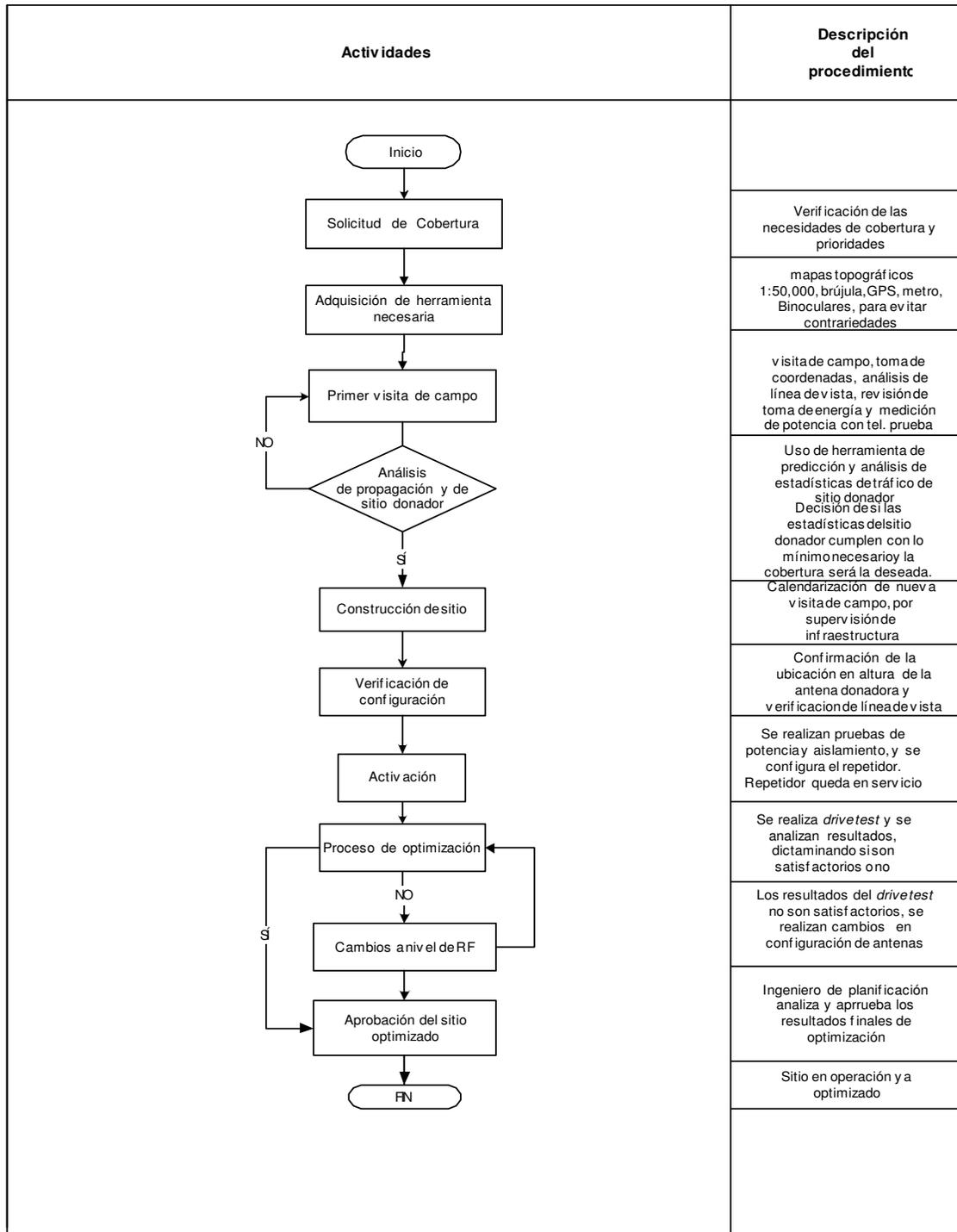
6.3 Ahorro de recursos

Optimizar los recursos es parte fundamental en todo proyecto, pero esto se logra solamente con una planificación adecuada. En el diagrama de flujo mostrado en la figura 37 se observan los pasos que se deben seguir por el método propuesto. Este diagrama se puede dividir en tres fases. La primera fase se denomina de adquisición. Esta fase abarca desde el inicio de solicitud de cobertura hasta la selección del sitio donador. O sea que está integrada por pasos importantes como el acceso de energía, selección de ubicación del sitio repetidor, análisis de propagación y selección de sitio donador.

La segunda fase del diagrama, que se denomina de configuración, comprende desde que el sitio se certifica para ser adquirido, se construye y se determina la altura de la antena donadora, hasta que queda listo para su activación e integración a la red.

La tercera fase del diagrama, denominada de integración y optimización, inicia desde la activación del repetidor, y las pruebas de potencia y aislamiento, que son necesarias para determinar la perfecta recepción de potencia para repetir sin tener problemas de aislamiento, hasta que el repetidor ya ha sido optimizado y entregado al área correspondiente para control de operación y monitoreo. Esta fase puede demorar algún tiempo dependiendo de la cobertura lograda y de las pruebas de potencia y aislamiento. Si se presentan problemas de aislamiento, puede ser necesario instalar escudos de aislamiento o reconfigurar el sitio repetidor.

Figura 37. Diagrama de flujo, método de estudio de radiofrecuencia para repetidor CDMA



Método de Estudio de Radiofrecuencia para Repetidor CDMA

En el diagrama de flujo se observa que hay dos líneas de retorno. La primera línea va desde el análisis de propagación y de sitio donador a la primera visita de campo. Esta línea significa que en la primera visita se consideraron 2 o 3 ubicaciones para el sitio repetidor; sin embargo, estas no cumplieron con las expectativas de cobertura, por lo que es necesario realizar una nueva visita de campo para un nuevo estudio. La segunda línea de retorno se da en el proceso de optimización, porque en dicho proceso es necesario realizar pruebas de cobertura a nivel de campo. Luego son analizadas por los ingenieros de radiofrecuencia y se determina si los resultados son satisfactorios. Si no lo son, es necesario realizar cambios en el sitio repetidor. Esto se realiza hasta que los resultados cumplen con lo mínimo necesario.

La primera fase invierte mucho recurso humano y tiempo. En esta fase normalmente se realizan varias visitas de campo, tanto para certificar los primeros estudios como para supervisar la construcción. La segunda fase quizá invierte menos recurso humano, pero puede provocar demoras en tiempo por errores en la configuración del sitio. En algunas ocasiones el proceso de adquisición de la energía para el sitio repetidor puede abarcar desde la primera fase del proyecto hasta la segunda o la tercera fase, inclusive. Mientras se realizan los trámites respectivos de solicitud de energía y los permisos de paso para postear, se avanza en otros aspectos del proyecto, como el análisis de los posibles candidatos donadores, construcción del sitio y de la torre de telecomunicaciones, instalación del repetidor, etc.

La tercera fase es muy importante, ya que para esta fase el repetidor se configura y se pone en operación, o sea que ya se encuentra operando en la red celular. Por eso se debe tener cuidado con las decisiones que se tomen, tanto al configurar el repetidor en el proceso de activación como en el proceso de optimización para que el repetidor opere en óptimas condiciones en el sistema.

6.4 Evaluación de costos por error

Este análisis ejemplifica el ahorro que se puede lograr por la planificación adecuada en la red de repetidores, tomando como base el estudio propuesto.

Como se mencionó anteriormente, la planificación de un sitio repetidor requiere de 3 fases: adquisición, configuración e integración y optimización. Cada una de las fases implica inversión de tiempo, dinero y recurso humano.

Las siguientes tablas muestran los costos que representan los diferentes errores cometidos al ejecutar cada una de las fases del proyecto.

FASE DE ADQUISICIÓN				
Gasto administrativo por servicio de energía eléctrica				\$1,500.00
Permisos de paso de energía eléctrica, extensión de postes de energía eléctrica				\$6,000.00
Gasto por problemas en ubicación de sitio repetidor				\$1,500.00
Gasto por problemas de propagación: no incluye cambio de repetidor o instalación de otro repetidor adicional para mejorar cobertura				\$3,000.00

FASE DE CONFIGURACIÓN				
Problemas con potencia de recepción, línea de vista				\$6,000.00
Problemas de cobertura, instalación de tercer sector en sitio repetidor y soporte de antena				\$10,000.00

Método de Estudio de Radiofrecuencia para Repetidor CDMA

FASE INTEGRACIÓN Y OPTIMIZACIÓN				
Problemas de aislamiento				\$5,000.00
Enlace punto – punto por potencia de recepción				\$2,000.00
Cambio repetidor por problemas de amplificación				\$20,000.00
Problemas de procesamiento de llamadas por día				\$4,000.00
Problemas por optimización				\$5,000.00

Estos datos dependen mucho de factores como cantidades de material, para el caso de las instalaciones, cobros por permisos de paso, distancia de posteo para el caso de energía eléctrica, así como de las diferentes soluciones que se le pueda dar a problemas como aislamiento o cobertura. No representan el costo total de la instalación de un sitio repetidor, estos únicamente dan una idea de las pérdidas provocadas por errores en una planificación no adecuada. También se debe considerar el costo por oportunidad, que para el caso de las telecomunicaciones significaría el retraso en el avance del proyecto así como falta de servicio en cobertura de señal. Esto significa la cantidad de dinero que se deja de percibir por retraso en tiempo en la ampliación de la red o, peor aún, las pérdidas económicas diarias provocadas por problemas en la red.

CONCLUSIONES

1. El repetidor es una alternativa económica y eficiente para corregir problemas de cobertura, siempre que su proceso de selección sea adecuado.
2. Es importante que para desarrollar cualquier proyecto se elabore una base que permita su desenvolvimiento eficiente, evitando de esta manera el mal uso de recursos.
3. Para predecir eficientemente la cobertura de un sitio repetidor es necesario realizar una visita de campo para observar la topografía del terreno y así considerar posibles obstáculos tanto naturales como artificiales. Esto explica la importancia de combinar el uso de herramientas de software como trabajo de campo.
4. La meta básica de la aplicación de un método para desarrollar un proyecto en telecomunicaciones es el ahorro de recursos. Todo enfocado en el servicio eficiente hacia el usuario.

RECOMENDACIONES

1. Al realizar un estudio de radiofrecuencia, es importante considerar que un repetidor no es más que un reflejo de un sitio de celda donador, por lo que el equipo repetidor, en sí, no procesa llamadas; por lo tanto, al revisar las estadísticas del sitio celda donador se experimentará un crecimiento en el tráfico de llamadas.
2. Es necesario tomar en cuenta todas las consideraciones de campo propuestas en el presente trabajo, ya que el estudio debe realizarse pensando en futuras ampliaciones de capacidad o cambios, como pasar de sitio repetidor a sitio de celda.
3. Es importante que al utilizar *software* de predicción de cobertura se aplique un modelo de propagación adecuado a la realidad del área en donde se instalará, ya que de utilizar un modelo de propagación inadecuado es posible que no se alcancen los objetivos establecidos.

BIBLIOGRAFÍA

1. EMS Technologies. **Repeaters operator manual**. USA: s.e., 2001. 60pp.
2. Hess, G. C. **Land-mobile radio system engineering**. 2ª ed. USA: Editorial Artech House, 1997. 220pp.
3. Il Kim, Kyoung. **Handbook of CDMA system design, engineering and optimization**. USA: Editorial Prentice Hall, 2000. 252pp.
4. Nortel Networks. **CDMA overview**. 2ª ed. USA: s.e., 2000. 200pp.
5. Nortel Networks. **CDMA rf engineering**. Canada: s.e., 2000. 225pp.
6. Nortel Networks. **CDMA wireless and carrier solutions**. 2ª ed. USA: s.e., 2001. 220pp.
7. Proakis, J. G. **Digital communications**. 3ª ed. USA: Editorial Mcgraw-Hill, 1995. 190pp.
8. Repeater Technologies. **Repeater design process**. USA: s.e., 1999. 180pp.
9. Repeater Technologies. **Rf repeater design**. USA: s.e., 1998. 120pp.
10. Yang, Samuel C. **CDMA system engineering**. USA: Editorial Artech House, 1998. 280pp.