

# Capítulo 6

## Requerimientos de apuntamiento satelital en órbita baja para equipos de comunicaciones

### 6.1. Introducción

Actualmente la simulación es una herramienta importante para el desarrollo y predicción del comportamiento que tendrá un sistema. Los simuladores permiten acercarse a la vida real al lograr experimentar con diferentes parámetros de entrada y obtener resultados, en primeras aproximaciones, que ayudan a la implementación de proyectos.

En el presente capítulo se pretende recapitular toda la información anteriormente descrita, al realizar distintas simulaciones que sean capaces de brindar una idea (en una primera aproximación) del comportamiento del sistema de comunicaciones en banda S. Se modificarán diferentes parámetros de entrada para observar la dependencia que se tiene en el resultado, así mismo los resultados serán representados en forma gráfica para su mejor interpretación.

## 6.2. Resumen del enlace descendente

La Tabla 6.1 muestra el resumen del enlace descendente que se calculará. Estos valores serán introducidos al software Radio Mobile (los parámetros restantes al modelo de propagación ITS serán los parámetros por defecto).

Parámetro	Valor	Unidad
Frecuencia	2.25	GHz
Satélite		
Potencia de Transmisión	0.5	W
Ganancia (Antena de parche)	7	dBi
$\theta_{-3dB}$	60	°
Pérdidas de la línea	1	dB
Estación terrena		
Sensibilidad de Recepción	-110	dBm
Ganancia (Reflector parabólico)	25	dBi
$\theta_{-3dB}$	6	°
Pérdidas de la línea	1	dB
Figura de ruido del receptor	2	dB
Modulación	BPSK/QPSK	-
Ubicación (Ciudad de México)	Latitud: 19°19' N Longitud: 99°39' O	-
Altitud de la antena	2250	msnm

Tabla 6.1: Resumen del enlace descendente.

Con los parámetros ingresados a Radio Mobile y los parámetros por defecto al modelo ITS, se realizaron las simulaciones. Se mantuvieron ambas antenas en LOS y en línea horizontal (misma altura y ángulo de elevación en la estación terrena igual a 0°) para no introducir las pérdidas producidas por ángulos de elevación, puesto que serán introducidas posteriormente en los cálculos; se mantuvo fija la antena transmisora y se realizó un barrido del azimut en la antena receptora, para diferentes distancias de enlace, obteniendo

así la potencia en recepción. A ésta potencia es necesaria restarle las pérdidas adicionales por lluvia y absorción atmosférica, así como compararla con el ruido que se presenta en un enlace satelital. Para ello es necesario calcular algunos parámetros adicionales, que fueron descritos en capítulos anteriores.

### 6.3. Parámetros adicionales

Para un ángulo de elevación,  $\theta = 5^\circ$ , los parámetros adicionales calculados se muestran en la Tabla 6.2.

Parámetro	Valor	Unidad
Atenuación por lluvia, $L_R$	0.13	dB
Atenuación por absorción atmosférica, $L_A$	0.36	dB
Temperatura de ruido de la antena, $T_a$	78.26	K
Temperatura de ruido del sistema, $T_{sis}$	291.42	K

Tabla 6.2: Parámetros adicionales calculados para  $\theta = 5^\circ$ .

Para diferentes ángulos de elevación, los parámetros adicionales calculados se muestran en la Tabla 6.3.

Parámetro	Valor $\theta = 10^\circ$	Valor $\theta = 15^\circ$	Valor $\theta = 20^\circ$
$L_R$ [dB]	0.11	0.095	0.084
$L_A$ [dB]	0.18	0.12	0.093
$T_a$ [K]	53.22	21.56	20.86
$T_{sis}$ [K]	282.48	248.16	245.83

Tabla 6.3: Parámetros adicionales calculados para diferentes ángulos de elevación.

Se hace distinción del ángulo de elevación en la antena de la estación terrena debido a que este parámetro es importante para la obtención de las pérdidas adicionales (lluvia y absorción atmosférica). Si el ángulo de elevación es pequeño entonces la antena es más susceptible a recibir el ruido provocado por la superficie terrestre, así como las reflexiones múltiples de diferentes señales. Por otro lado, si el ángulo de elevación es grande, entonces los efectos

mencionados se reducen. Para ángulos de elevación mayores a  $20^\circ$  las pérdidas producidas no tienen mucha variación.

Una vez obtenidos estos parámetros, se especifica un cierto ángulo de elevación y una cierta distancia de enlace, entonces para cada resultado de las simulaciones se agregan los parámetros adicionales al ángulo de elevación respectivo (de acuerdo a la sección 5.6) y de esta manera se obtiene la relación portadora a ruido.

Una vez obtenidas las diferentes relaciones portadora a ruido por cada combinación de ángulo de elevación y distancia de enlace, se utilizan las relaciones descritas en la sección 1.5.5 para obtener la relación energía de bit a ruido y posteriormente el BER. Es importante mencionar que para cada distancia de enlace se realizaron 40 mediciones (40 simulaciones), cada medición era el resultado de mover  $1^\circ$  (escala mínima del software) el ángulo de azimut en la estación receptora, la mitad de las mediciones corresponden al movimiento de la antena hacia la derecha y la otra mitad corresponden al movimiento de la antena hacia la izquierda.

## 6.4. Gráficas

Los resultados obtenidos fueron tabulados de acuerdo a las diferentes combinaciones de distancia de enlace (380 [Km], 400 [Km], 500 [Km], 600 [Km], 700 [Km] y 800[Km]) y ángulos de elevación ( $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ). A continuación se presentan los resultados de forma gráfica, donde las gráficas fueron realizadas en Matlab y muestran el BER obtenido en función del ángulo off Boresight<sup>1</sup> para una tasa de transmisión de 1 [Mbps]. Las Figuras 6.1 a 6.6 muestran las gráficas de los resultados obtenidos.

---

<sup>1</sup>Ángulo que se forma entre el eje al que debe de apuntar la antena y el eje actual al que apunta la antena. Los grados positivos significan que la antena se mueve hacia la derecha del objetivo, y los grados negativos indican un movimiento hacia la izquierda del objetivo.

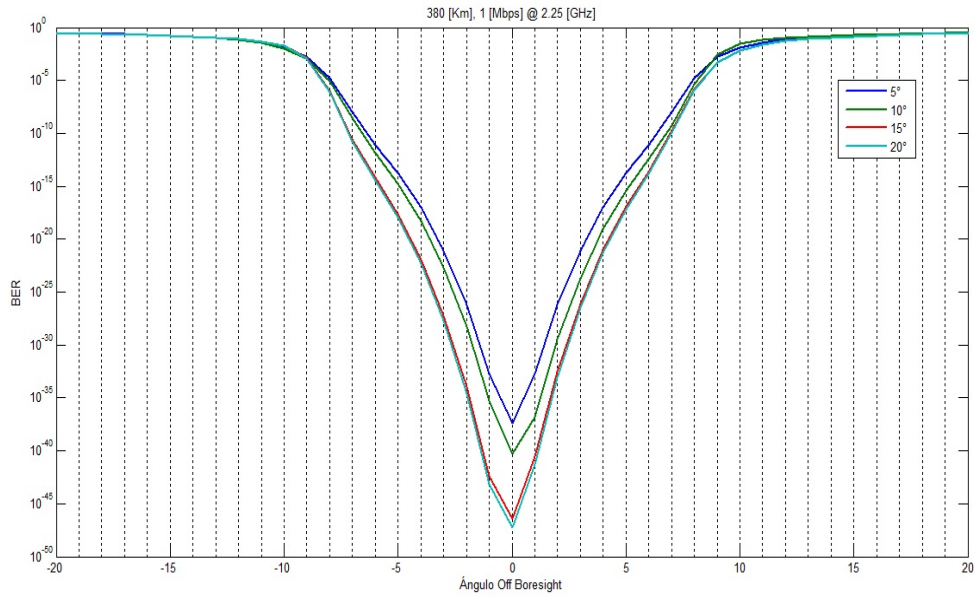


Figura 6.1: BER para un enlace a 380 [Km] con tasa de transmisión constante.

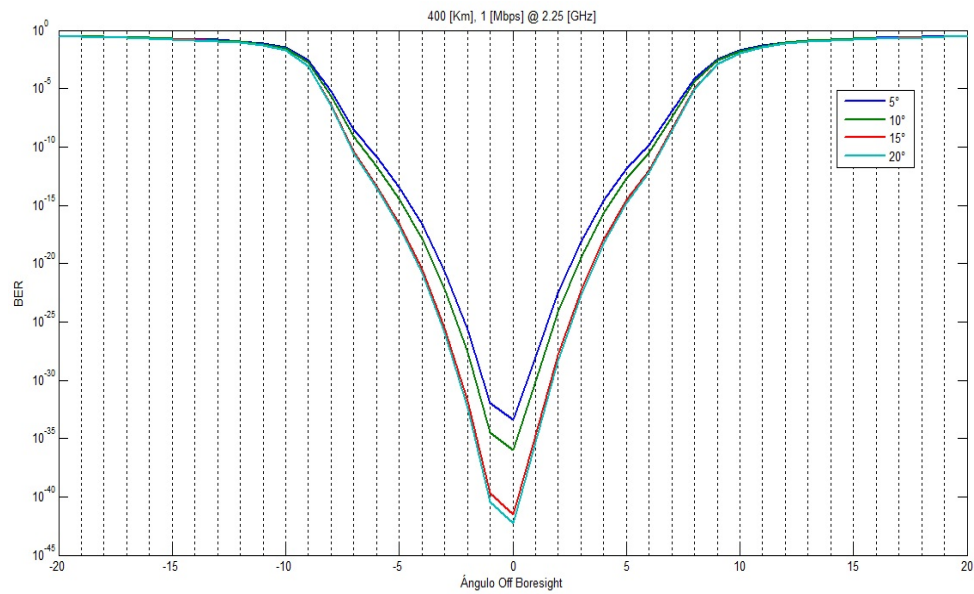


Figura 6.2: BER para un enlace a 400 [Km] con tasa de transmisión constante.

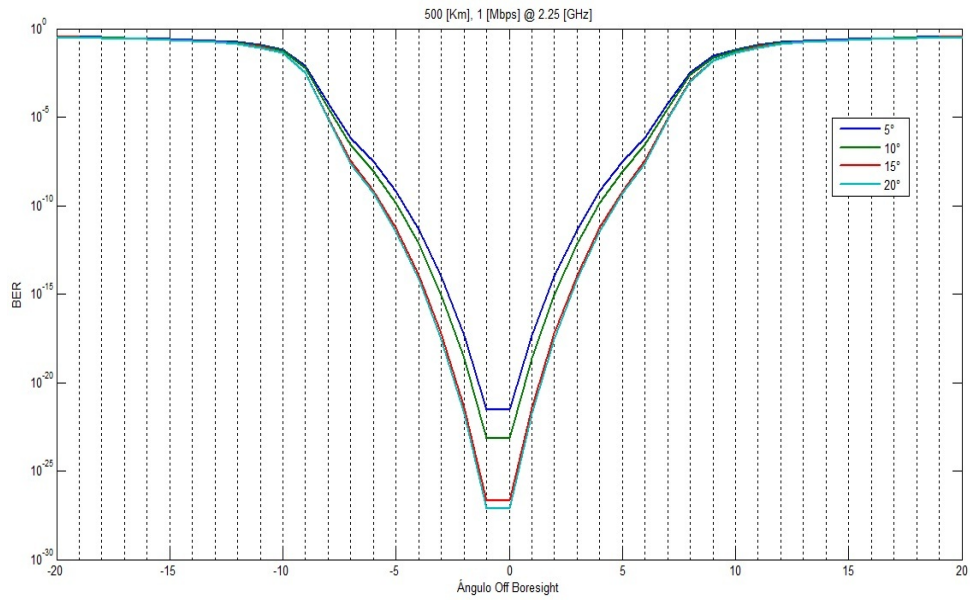


Figura 6.3: BER para un enlace a 500 [Km] con tasa de transmisión constante.

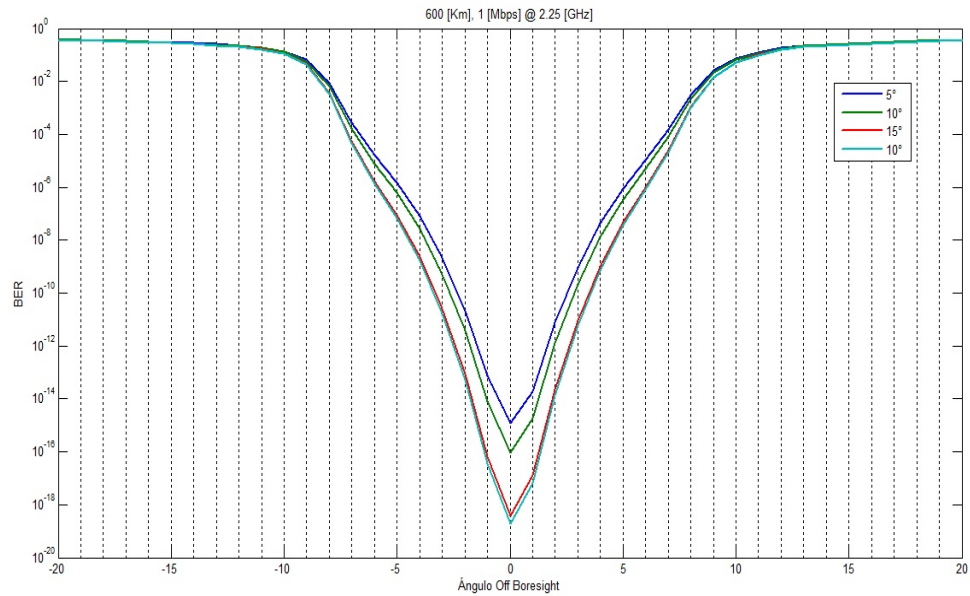


Figura 6.4: BER para un enlace a 600 [Km] con tasa de transmisión constante.

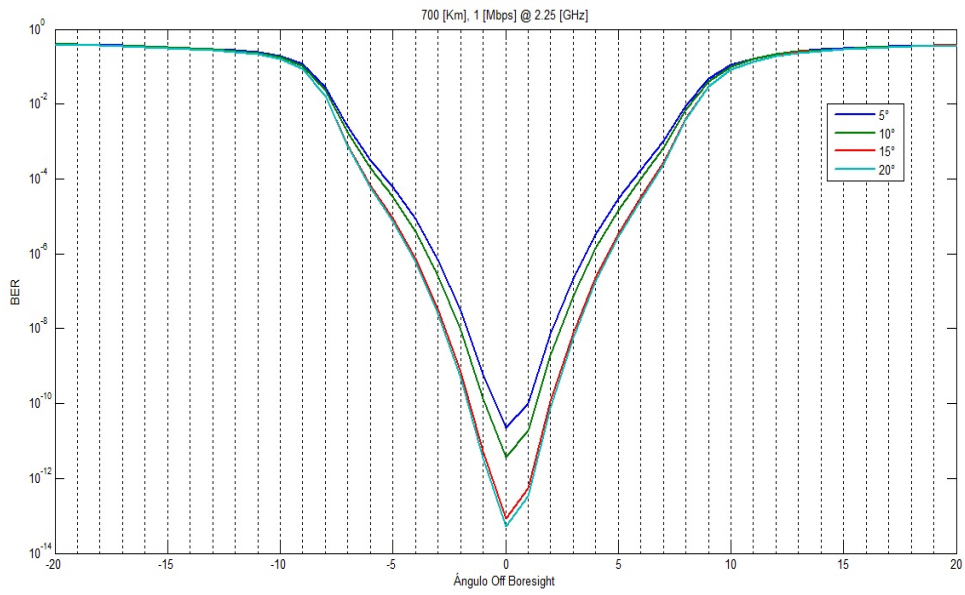


Figura 6.5: BER para un enlace a 700 [Km] con tasa de transmisión constante.

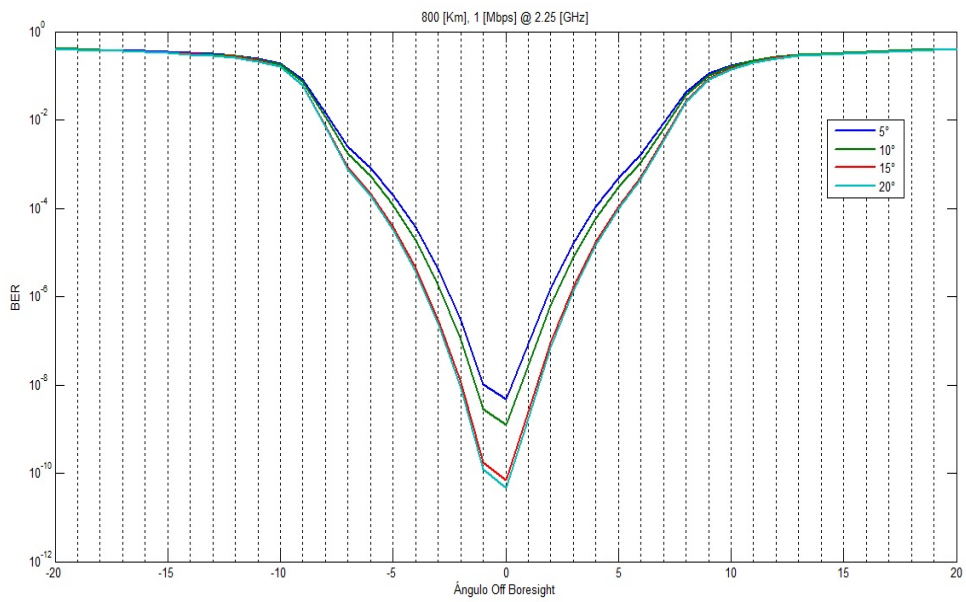


Figura 6.6: BER para un enlace a 800 [Km] con tasa de transmisión constante.

Para una mejor idea del comportamiento del enlace, la Figura 6.7 muestra una comparación de las gráficas anteriormente obtenidas para las diferentes distancias de enlace con una tasa de transmisión de 1 [Mbps] y a un ángulo de elevación fijo de 5°. Se eligió éste ángulo debido a que es el peor de los casos.

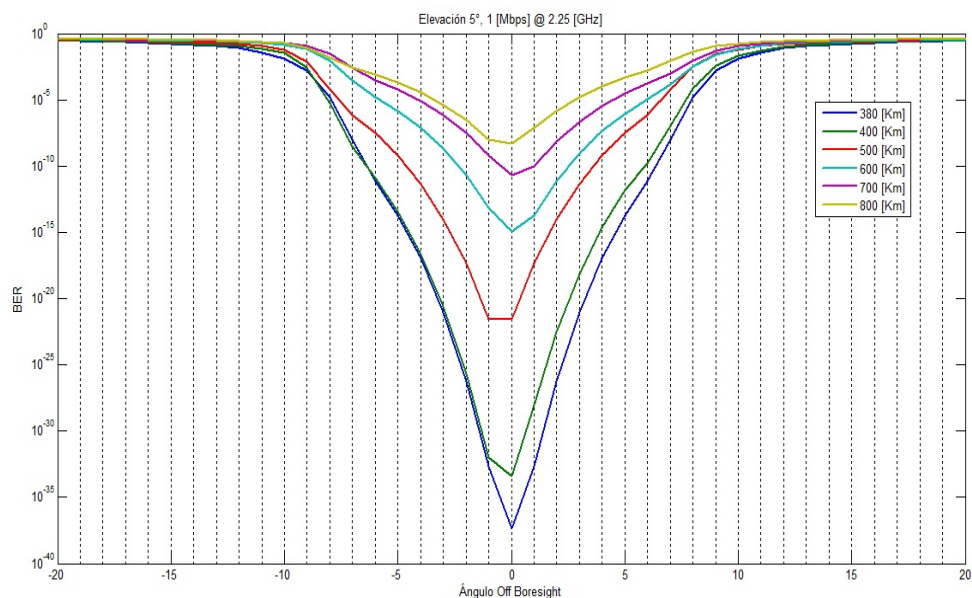


Figura 6.7: Comparación del comportamiento del enlace a una tasa y ángulo de elevación fijos.

De las figuras anteriores, además de la variable independiente (ángulo de apuntamiento) y la distancia del enlace satelital, también se pueden cambiar los parámetros de tasa de transmisión y frecuencia de operación. La frecuencia no será manipulada puesto que el objetivo de ésta tesis es centrarse en la banda S, por lo que ahora se modificará la tasa de transmisión para observar el comportamiento descrito. La Figura 6.8 muestra el comportamiento del enlace con respecto al cambio en la tasa de transmisión. Para diferentes tasas se utilizó el mismo ángulo de elevación, 5°, y la distancia más larga, es decir, una distancia de 800 [Km] (ésta combinación resulta para el peor de los casos).



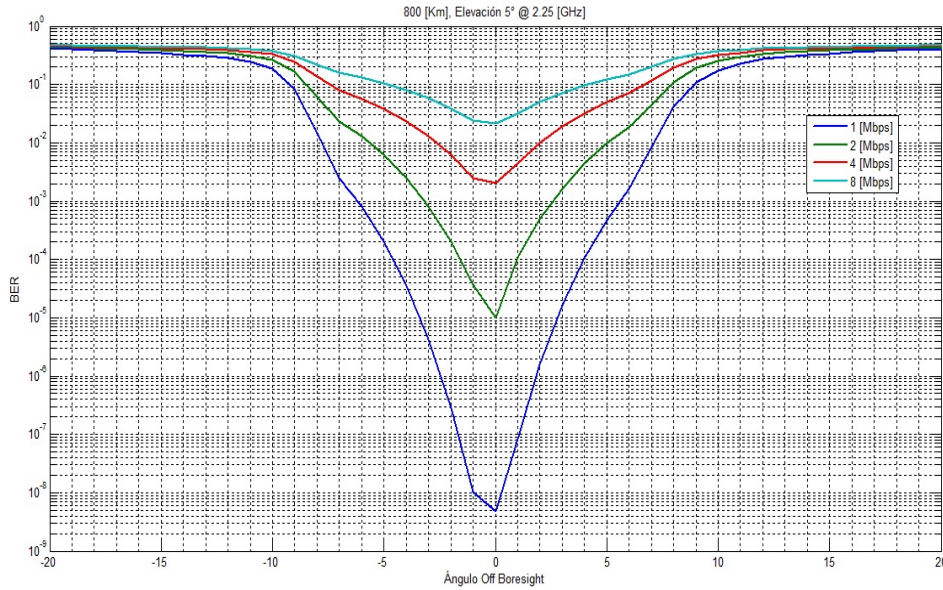


Figura 6.8: Comparación del enlace a una distancia y ángulo de elevación fijos.

## 6.5. Resultados

Los parámetros establecidos para transmisión y recepción (Tabla 6.1) permiten obtener un buen enlace satelital. Es importante mencionar que éstos parámetros se pueden modificar, el sólo hecho de modificar un solo parámetro brindará nuevos resultados. Los parámetros que son más fácilmente manipulables son la distancia del enlace, el ángulo de elevación, la frecuencia y la tasa de transmisión.

Analizando las gráficas se puede observar que conforme aumenta la distancia del enlace, las pérdidas también aumentan y la relación señal a ruido disminuye, por ende la relación energía de bit a ruido también disminuye y el BER aumenta. De manera análoga, se observa el mismo comportamiento para la tasa de transmisión.

Para ángulos de elevación pequeños las pérdidas aumentan y por lo tanto también el BER. Es importante mencionar que se considera aceptable tener un BER de  $10^{-5}$ , sin embargo el BER típico es de  $10^{-6}$ [30]. En base a lo anterior y a los características establecidas para el enlace, se puede observar

que:

- Para una distancia de 380 [Km] y 400 [Km] las simulaciones muestran que existe un margen de error aproximado de  $\pm 7,5^\circ$ .
- Para una distancia de 500 [Km] en las simulaciones se observa una característica importante, si el ángulo de elevación es pequeño (entre  $5^\circ$  y  $10^\circ$ ) existe un margen de error aproximado de  $\pm 6^\circ$ , pero si el ángulo de elevación es mayor entonces existe un margen de error aproximado de  $\pm 7^\circ$ . Aquí se puede observar que el no elegir correctamente el ángulo de elevación puede repercutir en tener un rango menor de apuntamiento y por ende una mayor probabilidad de error.
- Para una distancia de 600 [Km] se observa el mismo comportamiento, si el ángulo de elevación es pequeño (entre  $5^\circ$  y  $10^\circ$ ) las simulaciones muestran un margen de error aproximado de  $\pm 5^\circ$ , pero si el ángulo de elevación es mayor entonces muestran un margen de error aproximado de  $\pm 6^\circ$ .
- Para una distancia de 700 [Km] se observan que el patrón de la gráfica se estrecha, ahora se tiene que si el ángulo de elevación es pequeño (entre  $5^\circ$  y  $10^\circ$ ) las simulaciones muestran un margen de error aproximado de  $\pm 3,5^\circ$ , pero si el ángulo de elevación es mayor entonces muestran un margen de error aproximado de  $\pm 4,5^\circ$ .
- Para una distancia de 800 [Km] se observan que el patrón de la gráfica se estrecha, ahora se tiene que si el ángulo de elevación es pequeño (entre  $5^\circ$  y  $10^\circ$ ) las simulaciones muestran un margen de error aproximado de  $\pm 2^\circ$ , pero si el ángulo de elevación es mayor entonces muestran un margen de error aproximado de  $\pm 3^\circ$ .

La tendencia mostrada significa que el aumento de distancia en el enlace requiere de una mayor precisión de apuntamiento, y que de acuerdo a él se puede obtener una mayor o menor probabilidad de error de transmisión.

Cuando se sobrepasa el margen de error aproximado de las simulaciones, se observó que por cada grado de error en el apuntamiento de la antena se tiene una pérdida de alrededor de 1 [dB], lo que hace que la pendiente de las gráficas sea cada vez mayor y que el más mínimo cambio en la dirección de apuntamiento produce un gran cambio en la probabilidad de error.

Por otra parte, el aumento de la tasa de transmisión produce un considerable aumento en el BER y por lo tanto se reduce de manera drástica el margen de error disponible. Para una distancia de 800 [Km] y una tasa de transmisión de 2 [Mbps], las simulaciones muestran que el margen de error aproximado se reduce  $\pm 0,3^\circ$ ; para tasas de transmisión mayores, y bajo los mismos parámetros, se necesita aumentar la potencia de transmisión debido a que el BER calculado es muy alto para obtener un buen enlace satelital, sin embargo el aumento de la potencia en el espacio significa un mayor costo económico.

Para tasas de transmisión altas y distancias grandes se requieren de mayores exactitudes, se manejan errores de apuntamiento de fracciones de grado, alrededor de  $0.1^\circ$  o mayores[30]. Existen equipos que manejan estas precisiones pero un problema importante es el costo de los mismos.

Otra opción es aumentar la ganancia de las antenas. La antena del satélite esta restringida en cuanto a tamaño, por lo que la única opción para aumentar su ganancia es aumentar la frecuencia, sin embargo el aumento de frecuencia (en satélites pequeños) hasta el momento solo llega a banda S. La antena en la estación terrena puede aumentar su ganancia aumentando su tamaño o aumentando la frecuencia, la primera opción no es viable ya que al aumentar el tamaño entonces la frecuencia disminuye y se tendrá menor capacidad de transferencia de información, la segunda opción es complicada puesto que la antena del satélite aun no puede operar en frecuencias mayores.

