



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA- TELECOMUNICACIONES

APLICACIÓN DE SOFTWARE EN EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE
SISTEMAS DE COMUNICACIÓN POR SATÉLITE

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ERNESTO RAMÍREZ CRUZ

TUTOR PRINCIPAL

SALVADOR LANDEROS AYALA, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente: **Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón**

Secretario: **Dr. Esaú Vicente Vivas**

Vocal: **Dr. Salvador Landeros Ayala**

1er. Suplente: **Dr. Jorge Prado Molina**

2do. Suplente: **Dr. Bohumil Psenicka**

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: U.N.A.M., Facultad de Ingeniería

TUTOR DE TESIS:

Dr. Salvador Landeros Ayala

FIRMA

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS	VII
DEDICATORIA	VIII
AGRADECIMIENTOS	VIII
OBJETIVOS DE LA TESIS	IX
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1.1. Introducción a los sistemas de comunicación por satélite	1
1.2. Evolución de los satélites artificiales de comunicaciones.....	3
1.3. Elementos de un sistema de comunicación por satélite	5
1.3.1. El segmento espacial	7
1.3.2. El segmento terrestre.....	7
CAPÍTULO 2.....	9
2.1. Fundamentos de las antenas.....	9
2.1.1. Parámetros básicos.....	9
2.1.1.1. Patrón de radiación	9
2.1.1.2. Ganancia.....	10
2.1.1.3. Ancho del haz	11
2.1.1.4. Eficiencia.....	11
2.1.1.5. Polarización.....	12
2.1.2. Tipos básicos de antenas	12
2.1.2.1. Dipolos.....	13
2.1.2.2. Antenas de apertura	13
2.1.2.3. Reflectores parabólicos.....	13
2.1.2.4. Arreglos de antenas	14
2.1.2.5. Antenas perfiladas	14
2.1.2.6. Reflectarrays	15
2.1.3. Huellas de cobertura	16
2.2. Cálculo de enlaces	17
2.3. Pérdidas de transmisión.....	17
2.3.1. Pérdidas de propagación por espacio libre	18
2.3.2. Pérdidas por desalineación de antenas.....	18
2.3.3. Pérdidas de alimentación	19
2.4. Efectos atmosféricos en las comunicaciones por satélite.....	19

2.4.1 Propagación en frecuencias por debajo de los 3 [GHz]	20
2.4.2. Propagación en frecuencias por encima de los 3 [GHz].....	20
2.5. Efectos de ruido.....	21
2.5.1. Ruido térmico	21
2.5.2. Figura de ruido	22
2.5.3. Temperatura de ruido	22
2.5.4. Figura de ruido y temperatura de ruido para etapas en cascada	23
2.5.5. Temperatura de ruido de la antena.....	23
2.5.6. Factor de mérito o figura de mérito.....	24
CAPÍTULO 3.....	25
3.1. Fundamentos del diseño.....	25
3.2. Rendimiento de un sistema de comunicaciones por satélite	25
3.3. Relación portadora a densidad espectral de potencia del ruido ascendente	27
3.4. Relación portadora a densidad espectral de potencia del ruido descendente.....	28
3.5. Relación portadora a densidad espectral de potencia del ruido de intermodulación	29
3.6. Relación portadora a densidad de ruido entre satélites adyacentes	31
3.7. Relación portadora a densidad espectral de potencia del ruido total.....	32
CAPÍTULO 4.....	33
4.1. Introducción a STK.....	33
4.2. Análisis y diseño de las características de radiación y parámetros de una antena con STK.....	39
CAPÍTULO 5.....	61
5.1. Análisis y diseño de un sistema de comunicaciones multihaz y multiportadora con STK.....	61
5.2. Análisis y diseño de una huella de cobertura para la República Mexicana con STK	76
CAPÍTULO 6.....	86
6.1. Análisis y diseño de la figura de mérito (G/T) con STK.....	86
6.2. Análisis y diseño de un enlace de comunicaciones por satélite con STK.....	99
CAPÍTULO 7.....	118
7.1. Análisis y diseño de un sistema de comunicaciones por satélite con STK	118
7.2. Análisis y diseño de un sistema de comunicaciones por satélite para TV Digital DVB-S2	139
CONCLUSIONES.....	150
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	154

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Arthur C. Clarke propone el uso de satélites artificiales en las comunicaciones	1
Fig. 1.2 Sistema de comunicaciones por satélite propuesto por Arthur C. Clarke	2
Fig. 1.3 Regiones de la UIT para la regulación de las radiocomunicaciones	2
Fig. 1.4 Sputnik 1 primer satélite artificial colocado en órbita alrededor de la Tierra	3
Fig. 1.5 Explorer 1 primer satélite de EUA	3
Fig. 1.6 Esquema conceptual de un sistema de comunicaciones por satélite.....	6
Fig. 1.7 Elementos básicos de un enlace de comunicación por satélite.....	6
Fig. 1.8 Elementos del segmento espacial	7
Fig. 1.9 Diagrama de bloques de una estación terrena	8
Fig. 2.1 Antena en modo (a) de transmisión (b) de recepción (c) Regiones de radiación	9
Fig. 2.2 Representación del patrón de radiación (a) 3D (b) 2D	10
Fig. 2.3 Ganancia máxima de una antena parabólica ($\eta=0.6$)	11
Fig. 2.4 Ancho del haz (a) Intensidad de campo normalizado (b) Potencia lineal (c) en decibeles	11
Fig. 2.5 Eficiencia de la antena	12
Fig. 2.6 Tipos de polarización	12
Fig. 2.7 Dipolo de media onda (a) Estructura (b) Patrón de radiación.....	13
Fig. 2.8 Antenas de bocina más comunes.....	13
Fig. 2.9 Reflector parabólico con alimentación (a) Focal (b) Desplazada (c) Cassegrain (d) Cilíndrico con un arreglo de alimentadores.	14
Fig. 2.10 Arreglo de antenas	14
Fig. 2.11 (a) Reflector parabólico con arreglo de alimentación (b) configuración planar con radiación directa (c) antena perfilada.....	15
Fig. 2.12 Antena Reflectarray	15
Fig. 2.13 Huella de cobertura	16
Fig. 2.14 Contornos de PIRE	16
Fig. 2.15 Elementos involucrados en los cálculos de enlace.....	17
Fig. 2.16 Variación de la potencia de la señal recibida por efecto de pérdidas.....	17
Fig. 2.17 Pérdidas por desapuntamiento.....	18
Fig. 2.18 Elementos de la atmósfera que afectan las comunicaciones por satélite	19
Fig. 2.19 Densidad espectral de potencia para el modelo de ruido blanco	22
Fig. 2.20 Arreglo (a) en cascada de tres etapas (b) equivalente con una temperatura de ruido	23
Fig. 2.21 Modelo de temperatura de brillo de la Tierra en la banda Ku	24
Fig. 2.22 Temperatura de ruido en la antena de la estación	24
Fig. 3.1 Presupuesto de enlace en un sistema de comunicaciones por satélite	25
Fig. 3.2 Temperatura de ruido a la entrada del receptor en el satélite	27
Fig. 3.3 Parámetros del enlace ascendente.....	28
Fig. 3.4 Parámetros del enlace descendente.....	28
Fig. 3.5 Productos de intermodulación	30
Fig. 3.6 Característica de transferencia de un amplificador TWTA o SSPA	30
Fig. 3.7 Curvas de intermodulación típicas de un TWTA vs cantidad de portadoras (A) 6 (B) 12 (C) 500	30
Fig. 3.8 Variación de (C/N_0) del enlace ascendente, descendente, de intermodulación y total vs del back-off de entrada	30
Fig. 3.9 Interconexión de redes a través de un enlace entre satélites (ISL)	31
Fig. 4.1 Software Satellite Tool Kit versión 9.2.4	33
Fig. 4.2 Características del programa STK en la versión gratuita sin licencia educativa	34
Fig. 4.3 Distintas formas para crear un escenario	36
Fig. 4.4 Asistente para configurar un nuevo escenario	36
Fig. 4.5 Ventana para insertar objetos dentro del escenario (con licencia educativa)	36
Fig. 4.6 Editor de preferencias en STK	37
Fig. 4.7 Espacio de trabajo en STK.....	38
Fig. 4.8 Creación del nuevo escenario para el análisis y diseño de una antena	39
Fig. 4.9 Ubicando una estación terrena en el escenario.....	39
Fig. 4.10 Añadiendo un receptor a la estación terrena	40
Fig. 4.11 Colocando un satélite en el escenario	40
Fig. 4.12 Montando un sensor y transmisor al satélite	41
Fig. 4.13 Visualizaciones 2D y 3D del escenario generado	41
Fig. 4.14 Configurando el tipo y orientación del sensor en el satélite	42
Fig. 4.15 Características del modelo de transmisor simple	42

Fig. 4.16 Comparativa de las propiedades de un transmisor simple y uno complejo	43
Fig. 4.17 Especificaciones del modelo, de la antena, modulador, filtros y ganancias-pérdidas adicionales en el transmisor complejo	43
Fig. 4.18 Apartados para la configuración de la antena	44
Fig. 4.19 Tipos de antenas definidas en STK	44
Fig. 4.20 Software para el diseño de antenas Satsoft y Pattern Magus	45
Fig. 4.21 Parámetros de la antena parabólica	46
Fig. 4.22 Configuración establecida para la representación 2D	46
Fig. 4.23 Configuración establecida para la representación 3D	47
Fig. 4.24 Representación 2D y 3D de los contornos de ganancia de la antena del satélite	47
Fig. 4.25 Parámetros de la antena, representación 2D y 3D del patrón de radiación (4.5 [GHz])	48
Fig. 4.26 Parámetros de la antena, representación 2D y 3D del patrón de radiación (12 [GHz])	48
Fig. 4.27 Parámetros de la antena, representación 2D y 3D del patrón de radiación (18.5 [GHz])	49
Fig. 4.28 Curvas de ganancia de la antena parabólica	50
Fig. 4.29 Curvas de ganancia de la antena para distintos diámetros de la antena para una frecuencia de 12 [GHz]	51
Fig. 4.30 Características del receptor y configurando el acceso al satélite por la estación terrena	52
Fig. 4.31 Valores de azimut, elevación y rango de la estación terrena	52
Fig. 4.32 Proceso para obtener un reporte detallado de algunos parámetros del escenario	53
Fig. 4.33 Reporte generado sobre las características de recepción en la estación terrena	53
Fig. 4.34 Parámetros de la antena de bocina cuadrada	55
Fig. 4.35 Representación 2D y 3D del patrón de radiación de la antena de bocina (4.5 [GHz])	56
Fig. 4.36 Representación 2D y 3D del patrón de radiación de la antena de bocina (12 [GHz])	56
Fig. 4.37 Características de la antena de bocina y representación 2D y 3D del patrón de radiación (18.5 [GHz])	57
Fig. 4.38 Curvas de ganancia de la antena de bocina cuadrada para las distintas frecuencias	58
Fig. 4.39 Comparativa de las curvas de ganancia (antenas parabólica y bocina cuadrada)	59
Fig. 5.1 Definición del escenario para el análisis y diseño de huellas de cobertura	61
Fig. 5.2 Insertando y ubicando la estación terrena dentro del escenario	61
Fig. 5.3 Insertando y configurando el tipo órbita del satélite	62
Fig. 5.4 Añadiendo un transmisor al satélite	62
Fig. 5.5 Características del modelo de transmisor multihaz	62
Fig. 5.6 Características de la antena para el sistema multihaz	63
Fig. 5.7 Configurando los tres haces del sistema multihaz	63
Fig. 5.8 Configurando los gráficos 2D y 3D	64
Fig. 5.9 Representación 2D y 3D de las huellas de cobertura y patrón de radiación del sistema multihaz	65
Fig. 5.10 Insertando un receptor a cada estación terrena	65
Fig. 5.11 Utilizando la herramienta "Access" para obtener el informe de acceso al satélite	66
Fig. 5.12 Datos de azimut, elevación y rango para la estación terrena de Australia	66
Fig. 5.13 Generación de un reporte detallado de la estación terrena en Australia	66
Fig. 5.14 Reporte generado para la estación terrena de Australia	67
Fig. 5.15 Insertando sensores y antenas en el sistema multiportadora	69
Fig. 5.16 Insertando los transmisores a la estación terrena y los receptores al satélite	70
Fig. 5.17 Modificación del tipo y orientación de los sensores	70
Fig. 5.18 Configuración de las antenas de la estación terrena y el satélite	71
Fig. 5.19 Configuración del equipo transmisor	71
Fig. 5.20 Configuración del equipo receptor	72
Fig. 5.21 Estableciendo el acceso del transmisor al receptor del satélite	72
Fig. 5.22 Reporte del enlace de comunicaciones	73
Fig. 5.23 Generación de un nuevo escenario para la conformación de una huella de cobertura sobre México	76
Fig. 5.24 Insertando el satélite al escenario para la conformación de la huella	76
Fig. 5.25 Insertando la estación terrena y el equipo receptor	77
Fig. 5.26 Insertando el transmisor al satélite	77
Fig. 5.27 Selección del tipo de transmisor a emplear para la conformación de la huella de cobertura	78
Fig. 5.28 Configuración de los atributos para las representaciones en 2D y 3D	78
Fig. 5.29 Huellas de cobertura de los distintos haces	79
Fig. 5.30 Patrón de radiación de los haces generados desde el satélite	79
Fig. 5.31 Huella de cobertura generada por los distintos haces del arreglo de antenas	80
Fig. 5.32 Patrón de radiación generado por el arreglo de antenas en el satélite	80
Fig. 5.33 Determinando el acceso del receptor al satélite	81
Fig. 5.34 Generando el reporte del sistema multihaz	81
Fig. 5.35 Reporte generado para el escenario	81
Fig. 5.36 Huella de cobertura conformada con 2,4,6,8 y 10 haces puntuales	85

Fig. 6.1 Creación y descripción del escenario para la evaluación de la figura de mérito (G/T)	86
Fig. 6.2 Configuración del entorno RF para el escenario	86
Fig. 6.3 Configuración de la órbita del satélite.....	87
Fig. 6.4 Inserción y configuración del transmisor.....	87
Fig. 6.5 Inserción y ubicación de las estaciones terrenas	88
Fig. 6.6 Inserción del receptor en las estaciones terrenas	88
Fig. 6.7 Configuración establecida al equipo receptor global para todas las estaciones terrenas	89
Fig. 6.8 Configuración de las características para los gráficos 2D y 3D	89
Fig. 6.9 Escenario creado para la medición de la figura de mérito (G/T).....	90
Fig. 6.10 Estableciendo la vinculación entre el transmisor satelital y el receptor de la estación terrena	90
Fig. 6.11 Generación del reporte para la estación terrena particular.....	91
Fig. 6.12 Reporte generado para el enlace entre la estación terrena del Distrito Federal y el satélite	91
Fig. 6.13 Obtención de las características de latitud, longitud, azimut, elevación y distancia de la estación terrena	92
Fig. 6.14 Variación de la atenuación por gases atmosféricos en función del ángulo de elevación	96
Fig. 6.15 Variación de la atenuación por lluvia en función del ángulo de elevación	97
Fig. 6.16 Variación de las pérdidas de propagación de espacio libre en función del ángulo de elevación.....	97
Fig. 6.17 Variación de la figura de mérito en función del ángulo de elevación	98
Fig. 6.18 Estableciendo un nuevo escenario para el análisis y diseño de un enlace satelital.....	99
Fig. 6.19 Insertando la estación terrena y definiendo su ubicación	99
Fig. 6.20 Configurando el tipo de órbita, ángulo de inclinación y altitud del satélite	100
Fig. 6.21 Añadiendo y configurando un sensor al satélite	100
Fig. 6.22 Estableciendo un modelo de lluvia y absorción atmosférica al escenario	101
Fig. 6.23 Insertando el receptor a la estación terrena.....	101
Fig. 6.24 Configurando las características del receptor en la estación terrena	102
Fig. 6.25 Selección y configuración del transmisor en el satélite	102
Fig. 6.26 Vinculación entre el transmisor y el receptor	103
Fig. 6.27 Generando el reporte para el presupuesto del enlace.....	103
Fig. 6.28 Reporte generado para el escenario creado.....	103
Fig. 6.29 Representación 2D del acceso al satélite por la estación terrena	104
Fig. 6.30 Representación 3D del acceso al satélite por la estación terrena	104
Fig. 6.31 Creación de un nuevo estilo de gráfico.....	105
Fig. 6.32 Gráfico correspondiente a la variación del parámetro (RIP).....	105
Fig. 6.33 Limitando el valor de la potencia isotrópica recibida (RIP)	105
Fig. 6.34 Efecto en la cobertura de la estación terrena debido a la limitación establecida en el valor del RIP	106
Fig. 6.35 Valores del parámetro (RIP) después de imponer la limitación	106
Fig. 6.36 Modificación de la ganancia de transmisión para corregir la limitación del RIP	107
Fig. 6.37 Gráfico 2D después de realizar la corrección en el transmisor ante la limitación de RIP	107
Fig. 6.38 Valores del parámetro (RIP) después de corregir la limitación	108
Fig. 6.39 Características de los tiempos de acceso al satélite con limitación de (RIP).....	108
Fig. 6.40 Características de los tiempos de acceso al satélite con el incremento de ganancia de la antena	108
Fig. 6.41 Valores del desplazamiento de frecuencia por efecto Doppler.....	109
Fig. 6.42 Limitando el valor del desplazamiento de frecuencia Doppler	109
Fig. 6.43 Valores del desplazamiento de frecuencia Doppler después de limitarlo	109
Fig. 6.44 Gráfico 2D después de establecer la limitación en el desplazamiento Doppler.....	110
Fig. 6.45 Valores del parámetro densidad de flujo para el enlace de comunicaciones.....	110
Fig. 6.46 Limitación al valor de la densidad de flujo en el transmisor.....	110
Fig. 6.47 Gráfico 2D del escenario después de limitar el valor de la densidad de flujo	111
Fig. 6.48 Valores de la densidad de flujo después de limitar su valor.....	111
Fig. 6.49 Representación 2D del acceso al satélite tras incrementar el nivel de potencia con la limitación de la densidad de flujo	111
Fig. 6.50 Valores de la densidad de flujo al aumentar el nivel de potencia a 10[dBW]	112
Fig. 6.51 Variación de los parámetros (C/N ₀) y (C/N).....	112
Fig. 6.52 Limitando los valores de (C/N).....	112
Fig. 6.53 Representación 2D del escenario ante la limitación del valor de (C/N).....	113
Fig. 6.54 Valores de (C/N ₀) y (C/N) después de la limitación	113
Fig. 6.55 Efecto de incrementar el nivel de ganancia del receptor sobre el acceso al satélite	114
Fig. 6.56 Valores de (C/N ₀) y (C/N) después de incrementar el nivel de ganancia del receptor	114
Fig. 6.57 Efecto de reducir la figura de ruido del receptor sobre el acceso al satélite	114
Fig. 6.58 Valores de (C/N ₀) y (C/N) después de reducir el valor de la figura de ruido del receptor	115
Fig. 6.59 Efecto de cambiar el tipo de modulación del transmisor sobre el acceso al satélite	115
Fig. 6.60 Valores de (C/N ₀) y (C/N) después de cambiar el tipo de modulación del transmisor	115

Fig. 6.61 Efecto de añadir una pre-ganancia al receptor sobre el acceso al satélite.....	116
Fig. 6.62 Valores de (C/N_0) y (C/N) después de añadir una pre-ganancia al receptor	116
Fig. 6.63 Variación de la atenuación por lluvia y gases atmosféricos para una órbita no geoestacionaria	117
Fig. 7.1 Creación de un sistema de comunicación por satélite	118
Fig. 7.2 Insertando y ubicando las estaciones terrenas transmisora y receptora	118
Fig. 7.3 Insertando y ubicando el satélite geoestacionario	119
Fig. 7.4 Insertando los sensores a cada una de las estaciones terrenas y el satélite	119
Fig. 7.5 Insertando los transmisores	119
Fig. 7.6 Insertando los receptores	120
Fig. 7.7 Configuración de los equipos del enlace ascendente	121
Fig. 7.8 Configuración de los equipos del enlace descendente.....	122
Fig. 7.9 Apuntamiento de lo sensores en el enlace ascendente y descendente	123
Fig. 7.10 Representación gráfica 3D del campo de visión de los sensores	124
Fig. 7.11 Insertando el objeto "Chain"	124
Fig. 7.12 Configuración del objeto "Chain"	125
Fig. 7.13 Creando un reporte sobre nuestro escenario	125
Fig. 7.14 Reporte generado por STK de nuestro escenario	126
Fig. 7.15 Reporte AER del escenario	126
Fig. 7.16 Estableciendo un modelo de lluvia y de absorción atmosférica	130
Fig. 7.17 Estableciendo la disponibilidad y contribuciones de ruido por lluvia y absorción atmosférica	131
Fig. 7.18 Reporte generado para el sistema bajo efectos de lluvia y absorción atmosférica.....	131
Fig. 7.19 Creando un reporte sobre las pérdidas debido a efectos atmosféricos y lluvia	132
Fig. 7.20 Comparativa de las pérdidas de propagación	133
Fig. 7.21 Atenuación por lluvia y gases atmosféricos en las bandas C, Ku y Ka.....	134
Fig. 7.22 Comparativa de la potencia isotrópica recibida (RIP)	134
Fig. 7.23 Comparativa de la temperatura de ruido del sistema.....	135
Fig. 7.24 Comparativa de la figura de mérito (G/T)	136
Fig. 7.25 Comparativa de la relación portadora a densidad espectral de potencia del ruido en el sistema	137
Fig. 7.26 Comparativa del rendimiento total del sistema	138
Fig. 7.27 Configurando el escenario para transmisión de video en STK.....	139
Fig. 7.28 Configuración del transmisor de la estación terrena	141
Fig. 7.29 Configuración del receptor en el satélite	141
Fig. 7.30 Configuración del retransmisor en el satélite	142
Fig. 7.31 Configuración de la estación terrena receptora	142
Fig. 7.32 Empleando la herramienta "Chain" para encadenar los elementos del escenario.....	142
Fig. 7.33 Representaciones 2D y 3D del escenario	143

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Banda de frecuencias para servicios de comunicación por satélite [3]	2
Tabla 3.1 Banda de frecuencias para enlaces entre satélites (ISL) [3]	31
Tabla 4.1 Parámetros de la antena parabólica para distintas frecuencias	50
Tabla 4.2 Variación de los parámetros de una antena parabólica en función del diámetro y frecuencia de operación	51
Tabla 4.3 Parámetros de recepción en la estación terrena como función de la frecuencia de operación	53
Tabla 4.4 Comparativa de los parámetros de las antenas tipo parabólica y de bocina cuadrada como función de la frecuencia	58
Tabla 4.5 Parámetros de recepción en la estación terrena para una antena de bocina cuadrada como función de la frecuencia	60
Tabla 5.1 Datos de ubicación de las estaciones terrenas	62
Tabla 5.2 Características de orientación de los distintos haces en el satélite	63
Tabla 5.3 Parámetros de los distintos haces en el satélite	64
Tabla 5.4 Características de azimut, elevación y rango de las estaciones terrenas hacia el satélite	67
Tabla 5.5 Valores de los parámetros de recepción en cada estación terrena	67
Tabla 5.6 Valores de los parámetros de recepción en cada estación terrena (continuación)	67
Tabla 5.7 Configuraciones de los equipos transmisores	71
Tabla 5.8 Configuraciones de los equipos receptores	72
Tabla 5.9 Parámetros para las distintas portadoras	73
Tabla 5.10 Parámetros para las distintas portadoras (continuación)	73
Tabla 5.11 Características generales de los haces puntuales generados	79
Tabla 5.12 Valores de azimut y elevación para los distintos haces generados	79
Tabla 5.13 Datos de recepción para un sistema multihaz	82
Tabla 5.14 Datos de recepción para un sistema multihaz (continuación)	82
Tabla 5.15 Características de los distintos esquemas multihaz para conformación de huella de cobertura	82
Tabla 5.16 Parámetros de recepción para una huella de cobertura	83
Tabla 5.17 Parámetros de recepción para una huella de cobertura (continuación)	83
Tabla 6.1 Tabla de distintos parámetros para las estaciones terrenas en la República Mexicana	92
Tabla 6.2 Tabla de distintos parámetros para las estaciones terrenas en la República Mexicana (continuación)	93
Tabla 6.3 Tabla de distintos parámetros para las estaciones terrenas en la República Mexicana (continuación)	95
Tabla 7.1 Ubicación de la estación terrena transmisora y receptora	119
Tabla 7.2 Parámetros del enlace ascendente y descendente en banda Ka	126
Tabla 7.3 Parámetros del enlace ascendente y descendente en banda Ka (continuación)	126
Tabla 7.4 Características de azimut, elevación y rango para los enlaces ascendente y descendente	127
Tabla 7.5 Parámetros globales del escenario	128
Tabla 7.6 Comparativa de parámetros del sistema en las bandas C, Ku y Ka	129
Tabla 7.7 Comparativa de parámetros del sistema en las bandas C, Ku y Ka (continuación)	129
Tabla 7.8 Niveles de ganancia de las antenas	129
Tabla 7.9 Rendimiento total del sistema para las distintas bandas	130
Tabla 7.10 Comparativa de parámetros del sistema en las bandas C, Ku y Ka bajo efectos de absorción atmosférica y lluvia	132
Tabla 7.11 Comparativa de parámetros del sistema en las bandas C, Ku y Ka bajo efectos de absorción atmosférica y lluvia (continuación)	132
Tabla 7.12 Rendimiento total del sistema para las bandas C, Ku y Ka bajo efectos de absorción atmosférica y lluvia	137
Tabla 7.13 Datos del sistema de televisión digital por satélite en banda Ku	139
Tabla 7.14 Datos del sistema de televisión digital por satélite en banda Ku (continuación)	140
Tabla 7.15 Características de latitud y longitud de los elementos del escenario	140
Tabla 7.16 Parámetros del escenario para transmisión de video en la banda Ku con STK	144
Tabla 7.17 Parámetros obtenidos con Matlab en la Tesis (Banda Ku)	145
Tabla 7.18 Datos del sistema de televisión digital por satélite en banda Ka	145
Tabla 7.19 Datos del sistema de televisión digital por satélite en banda Ka (cont.)	146
Tabla 7.20 Parámetros del sistema de comunicaciones por satélite para transmisión de video en la banda Ka con STK	147
Tabla 7.21 Parámetros del sistema de comunicaciones por satélite para transmisión de video en la banda Ka con Matlab	148

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificios en todos estos años, gracias a ustedes he logrado alcanzar este nuevo éxito profesional.

A la Universidad Nacional Autónoma de México mi alma máter.

A la Facultad de Ingeniería que me acogió generosa en sus aulas durante el tiempo que duraron mis estudios.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor el Dr. Salvador Landeros Ayala por el valioso tiempo e interés que le brindó al desarrollo de la presente tesis.

Un agradecimiento por los comentarios generados a la Tesis por los miembros del jurado: Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón, Dr. Esaú Vicente Vivas, Dr. Jorge Prado Molina y Dr. Bohumil Psenicka.

A mis profesores de licenciatura y maestría de los cuales me llevo los valiosos conocimientos que me transmitieron en el desarrollo de mi formación profesional. En especial al Dr. Francisco García Ugalde, M.I. Jesús Reyes García y Dr. Oleksandr Martynyuk.

A la Coordinación de Estudios de Posgrado (CEP) de la UNAM por el apoyo económico recibido para la realización de mis estudios de maestría.

A Irving Rendón Salgado que aprecio y considero un amigo, gracias al equipo que formamos logramos alcanzar esta meta.

OBJETIVOS DE LA TESIS

- Establecer un marco teórico sobre los sistemas de comunicación por satélite, en el cual se presenten aspectos históricos, regulatorios y exposición de los elementos involucrados. Así como la explicación de los diversos fenómenos de propagación atmosféricos, las consideraciones de ruido e interferencias.
- Presentar la formulación matemática a través de lo que se conoce como cálculo de enlaces o presupuesto de potencia enfocado al estudio de este campo, en donde se definan las relaciones consideradas para la evaluación del rendimiento tanto individual (ascendente o descendente) y de manera conjunta.
- Haciendo uso de software específico para la experimentación en este medio, generar una serie de proyectos consistentes en simulaciones sobre diversos aspectos y exponiendo los principales parámetros técnicos a través de reportes gráficos y con datos estadísticos, entendiendo cual es su importancia en el desempeño final.
- Exponer una serie de comentarios sobre posibles mejoras que permitan perfeccionar el análisis y diseño de la parte de comunicaciones, adecuándose a las necesidades específicas de una situación particular que no sea considerada.
- Finalmente proponer temas que pudieran continuarse a partir de lo presentando en la tesis con la finalidad de explotar las capacidades ofrecidas por el programa empleado.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

- Ante las diversas consideraciones existentes en el análisis y diseño del entorno satelital y debido a las dificultades que se tienen de estudiarlos de manera más directa, se hace necesario el uso de programas que permitan modelar su comportamiento, lo cual implica la obtención de datos estadísticos de distintas variables a partir de los cuales se produzca un examen de alguna característica en particular o estudio de manera general.
- Por ello la necesidad de realizar un conjunto de simulaciones a través del uso de herramientas de cómputo para examinar y bosquejar diversos tópicos, mediante la alteración de alguna variable o establecimiento de restricciones lo que permitirá entender cual es su impacto en el accionar del modelo de estudio.
- El desarrollo de este conjunto de proyectos no solo facilitará la asimilación de los diversos conceptos empleados en el cálculo de enlaces, sino que pretende además mostrar las cualidades y debilidades que presenta el software elegido para el estudio de cuestiones comprendidas en el aspecto de las comunicaciones.

CAPÍTULO 1

1.1. Introducción a los sistemas de comunicación por satélite

El campo de los satélites¹ tiene ya 56 años² de desarrollo, este ha crecido rápidamente en áreas de servicio clave a pesar del éxito y avances tecnológicos que han tenido las redes terrestres³. De cualquier forma, sus capacidades se complementan en los distintos mercados.

El actual éxito de estos se debe principalmente a los servicios fijos, de banda ancha y de radiodifusión que son los que generan los más grandes ingresos. El proceso llevado a cabo en este tipo de sistemas involucra la emisión de señales radioeléctricas generadas desde alguna estación terrena hacia un satélite, donde es trasladada a otra frecuencia, amplificada y retransmitida⁴ nuevamente hacia otra instalación. Algunos de los últimos diseños involucran el uso de tecnología laser para enlaces cruzados en el espacio, y en un futuro podría ser utilizada para la comunicación bidireccional Tierra-Espacio.

Aunque el origen de los sistemas de comunicación por satélite es confusa, la idea de emplear estos elementos se atribuye al artículo *“Retransmisiones extraterrestres: ¿Pueden las estaciones espaciales ofrecer cobertura mundial de radio?”*⁵ publicado en la revista *Wireless World* en octubre de 1945⁶ por el escritor y científico británico Arthur Charles Clarke⁷ (Fig. 1.1).



Proprietors:
ELIFFR & SONS LTD.
Managing Editor:
HUGH S. FROCK,
M.I.E.E.
Editor:
H. F. SMITH
Editorial, Advertising and Publishing Offices:
ROBERT HODGE,
STAMFORD STREET,
LONDON, S.E.1.
Telephone:
Wander 370 (10 lines).
Telex:
“Edwards,” London.

A
PUBLISHED MONTHLY
Price: 1/6
(Subscribers send 20s of sterling monthly)
Subscription rates flow and abroad will vary.

Wireless World
Radio and Electronics
25th YEAR OF PUBLICATION
OCTOBER 1945

MONTHLY COMMENTARY	259
RADAR PRODUCTION	290
AMATEUR TRANSMISSION By "Bismarck"	295
FUNDAMENTALS OF RADAR—II. By "Antagon, Birmingham."	299
RANDOM RADIATIONS By "Dialist"	303
EXTRA-TERRESTRIAL RELAYS By Arthur C. Clarke	305
CONTRAST EXPANSION (Continued) By J. G. White	309
LETTERS TO THE EDITOR	313
UNDESIGNED, By Vera Gold	315
WORLD OF WIRELESS	317
RECENT INVENTIONS	320

Branch Offices:
CONTENTS:
330, Corporation Street,
Birmingham
"Antagon, Birmingham."
REDACTED:
Cathedral Buildings,
Newington Street,
London S.E.1
"Antagon, Birmingham."
MANCHESTER:
200, Exchange Street,
Manchester S.1
"Antagon, Birmingham."
GLASGOW:
25, Rutland Street, C.2.
"Antagon, Birmingham."
GLASGOW:
25, Rutland Street, C.2.
"Antagon, Birmingham."
GLASGOW:
25, Rutland Street, C.2.
"Antagon, Birmingham."
GLASGOW:
25, Rutland Street, C.2.
"Antagon, Birmingham."

EXTRA-TERRESTRIAL RELAYS
Can Rocket Stations Give World-wide Radio Coverage?

By ARTHUR C. CLARKE

ALTHOUGH it is possible, by a suitable choice of the latitude and vector, to provide telegraphy coverage between any two points or regions of the earth for a large part of the time, long-distance communication is greatly hampered by the presence of the ionosphere, and there are even occasions when it may be impossible. A new wireless service giving constant field strength to all parts over the whole globe would be invaluable, not to say indispensable, in a world society.

Unconsciously through the heliograph and telegraph system is that telegraph system, since ionospheric transmission cannot be employed at all. The service area of a television station, even on a very good site, is only about a hundred miles across. To cover a small country such as Great Britain would require a network of transmitters, connected by suitable lines, comprising a VHF relay link. A recent theoretical study has shown that such a system would require repeaters at intervals of fifty miles or less. A system of this kind could provide television coverage, at a very considerable cost, over the whole of a small country. It would be out of the question to provide a large continent with such a service, and only the main centres of population could be included in the network.

The problem is equally serious when attempting to make a long distance television service in different parts of the globe. A relay chain several thousand miles long would cost millions, and television services would still be impossible. Similar considerations apply to the provision of wide-band frequency modulation and other services, such as high speed facsimile which are by their nature restricted to the ultra-high frequencies.

Many may consider the solution proposed in this book to be far-fetched to be taken very seriously, such an attitude is unreasonable, as everything envisaged here is a logical extension of developments in the last ten years—in particular the perfection of the long-range rocket of which V2 was the prototype. While this article was being written, it was announced that the Germans were conducting a similar project, which they believed possible within fifty to a hundred miles.

Some proceeding further, it is necessary to discuss briefly certain fundamental laws of rocket propulsion and "astro-navigation." A rocket which achieves a sufficiently great speed in flight outside the earth's atmosphere would never return. This "orbital" velocity is 8 km per sec. (16 miles per sec), and a rocket which attains it would become an artificial satellite, circling the world for ever with an expenditure of power—a second moon, in fact.

the atmosphere and left to broadcast wireless information back to the earth. A little later, manned rockets will be able to make similar flights with sufficient reserve power to break the orbit and return to earth.

There are an infinite number of possible orbits, circular and elliptical, in which a rocket would remain if the initial conditions were correct. The velocity of a rocket must, of course, be at least equal to the escape velocity at the point of revolution, which would be about 11 km per sec. As the radius of the orbit increases the velocity decreases, since gravity is diminishing and less centrifugal force is needed to balance it. Fig. 1 shows this graphically. The moon, of course, in a particular case and would be on the curve of Fig. 1 if they were produced. The proposed German space-stations

Fig. 1. Variation of orbital period and velocity with distance from the centre of the earth.

Fig. 1.1 Arthur C. Clarke propone el uso de satélites artificiales en las comunicaciones

«Si los satélites artificiales llegan a ser una unidad, solo habrá una órbita posible, a 42 000 km del centro de la Tierra, y si el plano coincide con el del ecuador terrestre, el satélite girará con la Tierra y permanecerá por tanto geostacionario. Supongamos que en esta órbita se construyera una estación de comunicaciones; podría proveérsela de un equipo transmisor y receptor obligándola a actuar como repetidora de transmisiones entre dos puntos del hemisferio subyacente con solo utilizar una frecuencia que penetre la ionosfera. Una estación no podría cubrir más que la mitad del globo y para asegurar un servicio mundial se necesitarían tres. (Fig. 1.2) [31]»

¹ Un satélite en general puede ser definido como cualquier cuerpo artificial o natural que orbita alrededor de un cuerpo celeste tal como un planeta o una estrella.
² En el año 2013 y considerando el lanzamiento del satélite Sputnik 1 como el evento pionero del desarrollo de este campo.
³ Principalmente las que se basan en fibra óptica.
⁴ Esto bajo un esquema de transpondedor transparente, cuando se involucra además de la translación de frecuencia una regeneración de la señal se trata de un transpondedor regenerativo.
⁵ "Extra-terrestrial Relays: Can Rocket Stations Give World-wide Radio Coverage" (Consultar referencia [31]).
⁶ La segunda guerra mundial concluyó el 2 de septiembre de 1945 a modo de referencia.
⁷ Mejor conocido como Arthur C. Clarke.

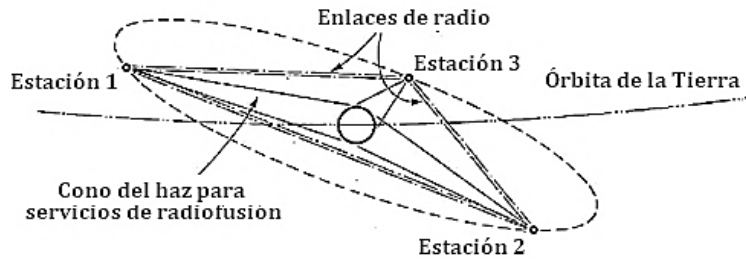


Fig. 1.2 Sistema de comunicaciones por satélite propuesto por Arthur C. Clarke

El empleo de satélites artificiales cambió radicalmente la visión de los sistemas de comunicación de larga distancia, estos actualmente ofrecen una gran cantidad de aplicaciones (científicas, comunicaciones, meteorológicas, exploración de recursos naturales, navegación, militares, radiodifusión, otros).

Como cualquier otro sistema de comunicaciones, estos deben ser normados en diversos aspectos y regirse por las reglas establecidas por organismos internacionales. El aspecto de la regulación es necesario dado que nos asegura un uso eficiente del espectro de radiofrecuencias tanto en medios terrestres como satelitales.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) es el encargado de realizar dicha asignación de frecuencias [3]. Para llevar a cabo dicho proceso se decidió dividir al mundo en tres regiones (Fig. 1.3).

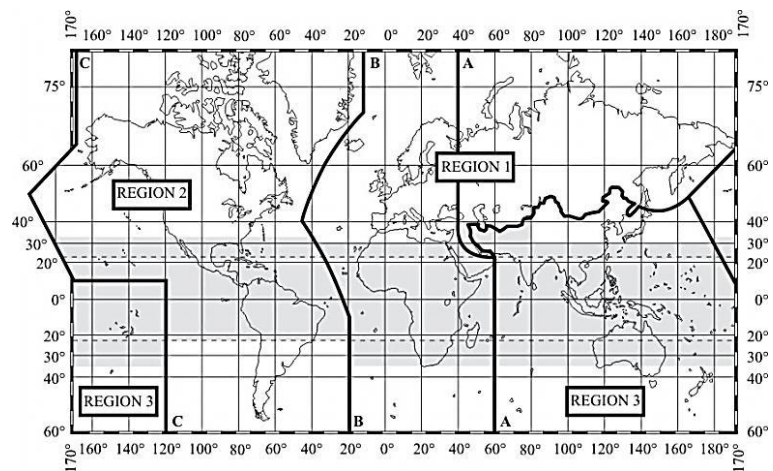


Fig. 1.3 Regiones de la UIT para la regulación de las radiocomunicaciones

La tabla 1.1 presenta los rangos de frecuencias permitidos para los servicios de comunicación fija, móvil y de radiodifusión por satélite, así como la terminología empleada para la designación de cada una de las bandas de operación. Como veremos en los siguientes capítulos este parámetro es el principal factor determinante en el diseño y optimización de cada enlace.

Tabla 1.1 Banda de frecuencias⁸ para servicios de comunicación por satélite [3]

Servicios fijos por satélite (FSS)		Servicios móviles por satélite (MSS)		Servicios de radiodifusión por satélite (BSS)	
6/4 [GHz] ⁹	Banda C	1.6/1.5 [GHz]	Banda L	2/2.2 [GHz]	Banda S
8/7 [GHz]	Banda X	30/20 [GHz]	Banda Ka	12 [GHz]	Banda Ku
14/12 [GHz]	Banda Ku			2.6/2.5 [GHz]	Banda S
30/20 [GHz]	Banda Ka				
50/40 [GHz]	Banda V				

⁸ Banda de frecuencias para la región 2 según la UIT.

⁹ El primer valor corresponde a la frecuencia entorno a la cual se emplean para los enlaces ascendentes, mientras que el segundo valor corresponde a la frecuencia entorno a la cual se emplean para los enlaces descendentes. Por ejemplo, la banda C tiene un rango de frecuencias ascendente de 5.925 [GHz] a 6.425 [GHz] y descendente de 3.7 [GHz] a 4.2 [GHz]. La banda X tiene un rango de frecuencias ascendente de 7.9 [GHz] a 8.395 [GHz] y descendente de 7.25 [GHz] a 7.745 [GHz]. La banda Ku tiene un rango de frecuencias ascendente de 14 [GHz] a 14.5 [GHz] y descendente de 11.7 [GHz] a 12.2 [GHz] para servicios FSS.

1.2. Evolución de los satélites artificiales de comunicaciones

La idea propuesta por Arthur C. Clarke sobre el uso de satélites artificiales geoestacionarios para retransmitir las señales de comunicaciones en Tierra no fue capaz de llevarse a cabo en su tiempo dado que no se contaba con la tecnología necesaria que permitiera poner algún objeto en órbita. No fue sino hasta poco más de una década más tarde que se consiguió colocar el primero el 4 de octubre de 1957 por parte de la antigua Unión Soviética (URSS) el conocido “Sputnik 1¹⁰” (Fig. 1.4).

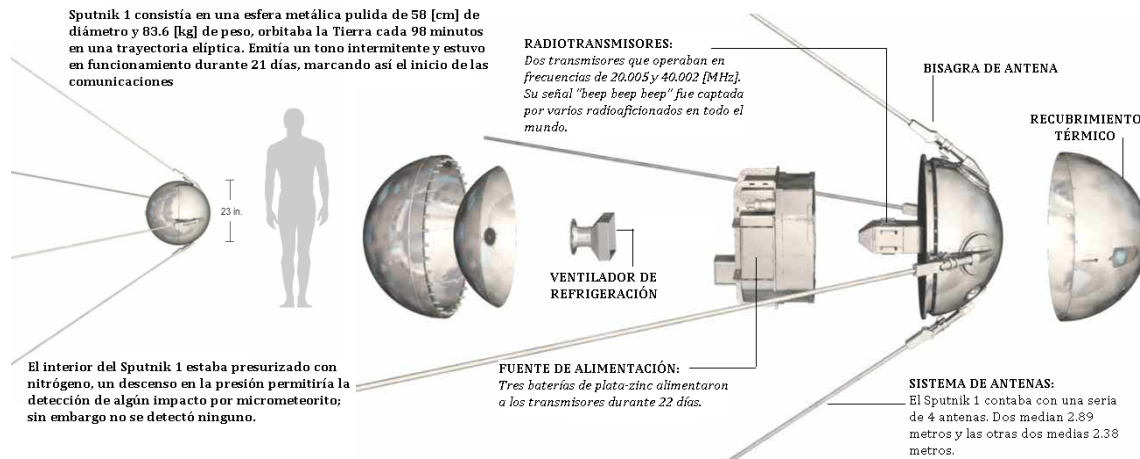


Fig. 1.4 Sputnik 1 primer satélite artificial colocado en órbita alrededor de la Tierra

Con el lanzamiento del Sputnik 1 se dio por sentado el inicio de la “era espacial” y provocó que las principales potencias del momento como lo eran EUA y la URSS establecieran grandes programas enfocados al desarrollo tecnológico y a la creación de diversas aplicaciones para estos elementos.

La respuesta de los EUA se dio el 31 de enero de 1958 cuando situó de manera exitosa¹¹ su primer satélite artificial al cual nombró como el Explorer 1¹² (Fig. 1.5).

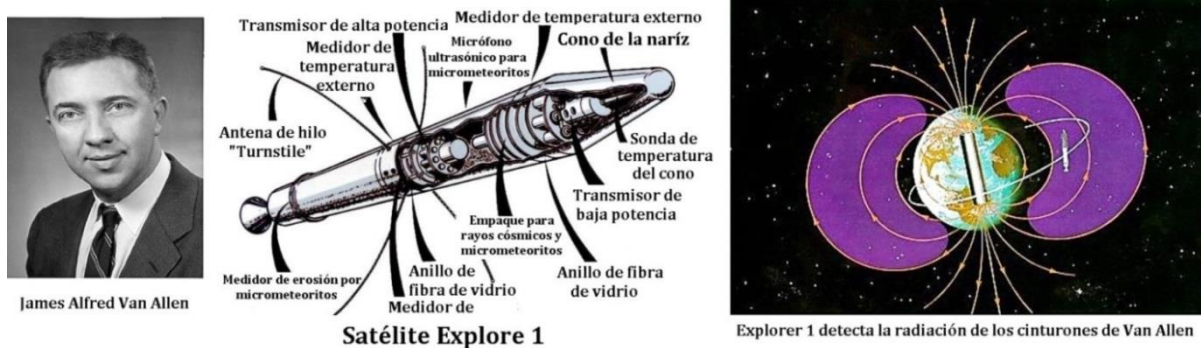


Fig. 1.5 Explorer 1 primer satélite de EUA

Un pequeño resumen¹³ de los principales acontecimientos históricos sobre estos dispositivos se presenta a continuación [1, 5,15]:

¹⁰ Sputnik palabra rusa que significa “compañero de viaje” o “satélite”.

¹¹ Antes del Explorer 1 hubo un intento de EUA por colocar un satélite artificial (Vanguard TV3), además la Unión Soviética ya había puesto en órbita el Sputnik 2 (3/Noviembre/1957).

¹² Oficialmente conocido como Satélite 1958 Alpha.

¹³ Para una información más vasta sobre los distintos satélites generados a lo largo de la historia consultar las referencias bibliográficas.

- **Sputnik 1.** Primer satélite artificial puesto en órbita por parte de la antigua Unión Soviética (URSS) que contaba con un radiotransmisor abordo.
- **Explore 1.** Era una nave cilíndrica que permaneció 162 días girando alrededor de la Tierra, estuvo transmitiendo información de la radiación cósmica y micrometeoritos a frecuencias entorno a los 108 [MHz]. Aportó los primeros datos para el descubrimiento de los cinturones de radiación de Van Allen.
- **SCORE¹⁴.** Es considerado el primer satélite propiamente de comunicaciones¹⁵, lanzado el 18 de diciembre de 1958 por la Fuerza Aérea de EUA. Utilizado para retransmitir un mensaje del presidente Eisenhower. Operaba a una frecuencia de 150 [MHz] y 132 [MHz] (enlace ascendente y descendente). El principal objetivo fue mostrar que un misil Atlas podía ser puesto en órbita, además de demostrar las capacidades de retransmisión desde este elemento.
- **TIROS-1.** TIROS¹⁶-1 colocado el 1 de abril de 1960, fue el primer satélite meteorológico utilizado para transmitir imágenes de televisión desde el espacio. Fue diseñado para operar durante 93 días¹⁷, este llevaba dos cámaras de TV y dos grabadoras de cinta magnética que almacenaban las imágenes cuando se quedaba incomunicado.
- **ECHO.** Uno de los primeros intentos para evaluar la retransmisión de comunicaciones mediante el uso de técnicas pasivas fueron posibles gracias al lanzamiento de los satélites ECHO 1 y ECHO 2 por parte de la NASA¹⁸ el 12 agosto de 1960 y el 25 enero de 1964 respectivamente.

Estos consistían en esferas metálicas cuya superficie funcionaba como un reflector pasivo para las señales transmitidas desde las estaciones terrenas. ECHO¹⁹ 1 y 2 operaban en el rango de frecuencias de 162 a 2390 [MHz].

- **COURIER.** Lanzado el 4 de octubre de 1960, tenía una capacidad de almacenamiento y retransmisión mayor que SCORE. Operaba en el rango de frecuencias de 1.8 a 1.9 [GHz] para el enlace de subida, mientras que para el de bajada empleaba entre 1.7 a 1.8 [GHz]. Fue el primer dispositivo de comunicaciones en hacer uso de celdas solares²⁰ para el suministro de energía.
- **OSCAR²¹.** El primer satélite de radioaficionados fue llamado OSCAR 1 lanzado apenas cuatro años después del Sputnik I (12 de diciembre de 1961). A pesar de estar en órbita por 22 días fue un éxito inmediato con más de 570 operadores de radio en 28 países que siguieron las observaciones del proyecto.
- **TELSTAR.** Colocados por la NASA en julio de 1962 y mayo de 1963 (Telstar 1 y 2), fueron los primeros satélites activos de comunicación de banda ancha. Operaban a una frecuencia de 6.4 [GHz] para el enlace de subida y 4.2 [GHz]²² para el de bajada.

¹⁴ SCORE por sus siglas en inglés **S**ignal **C**ommunication by **O**rbiting **R**elay **E**quipment (Equipo de enlace en órbita para señales de comunicaciones)

¹⁵ Los anteriores satélites eran para aplicaciones científicas.

¹⁶ TIROS por sus siglas en inglés **T**elevision and **I**nfra-**R**ed **O**bservational **S**atellite (Satélite de observación infrarroja por televisión).

¹⁷ Al final solamente duró 78 días.

¹⁸ NASA por sus siglas en inglés **N**ational **A**eronautics and **S**pace **A**dministration (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio)

¹⁹ No contaban con algún sistema de estabilización. Se requería de antenas de grandes dimensiones para recibir las señales reflejadas y se manejaban niveles de potencia típicos de 10 [kW].

²⁰ TIROS-1 fue el primer satélite artificial en hacer uso de celdas solares para el suministro de energía.

²¹ OSCAR por sus siglas en inglés **O**rbiting **S**atellite **C**arrying **A**mateur **R**adio.

²² Esto permitió el uso de la banda C (4/6 [GHz]) que actualmente ofrece la mayor cantidad de servicios fijos por satélite (FSS) a través del mundo.

Telstar 1 ofreció servicios hasta que el subsistema de comandos falló debido a la radiación de Van Allen. El siguiente fue rediseñado con transistores resistentes y puesto en una órbita alta para evitar la región anterior, además operó durante 2 años.

- **RELAY.** Desarrollados por RCA²³ para la NASA, fueron lanzados en diciembre de 1962 y enero de 1964 (Relay 1 y 2 tuvieron una vida útil de 14 meses). Tenía dos repetidores cada uno con un canal de 25 [MHz] y dos de 2 [MHz]. Operaban a una frecuencia de 1.725 [GHz] para el enlace de subida y 4.160 [GHz] para el de bajada.

- **SYNCOM.** Desarrollados por la compañía de aviones Hughes para la NASA, ofrecieron la primera comunicación desde una órbita síncrona. SYNCOM 2²⁴ y 3²⁵ colocados en julio de 1963 y julio de 1964 respectivamente dado que el lanzamiento del primero falló.

Operaban a 7.4 [GHz] para el enlace de subida y 1.8 [GHz] para el de bajada, empleaba dos canales de 500 [kHz] bidireccional y uno de 5 [MHz] para transmisiones de una sola vía (señales de banda estrecha y ancha respectivamente).

- **INTELSAT (EARLYBIRD).** Fue el primer satélite de comunicaciones síncrono de tipo comercial, luego fue llamado INTELSAT 1 (desarrollado por COMSAT) y lanzado por la NASA en abril de 1965. Su diseño era muy similar al SYNCOM 3, tenía dos transpondedores de 25 [MHz] que operaban en la banda C (6.3 [GHz] de subida y 4.1 [GHz] de bajada). Las funciones a través de este elemento entre EUA y Europa comenzaron el 28 junio de 1965²⁶.

- **MOLNIYA.** El 6 de abril de 1965 fue lanzado el primer satélite de comunicaciones militar soviético en una órbita altamente elíptica con una inclinación de 63.4 [°] y con un periodo de alrededor de 12 horas. Esto permite que sean visibles en las regiones polares durante largos periodos, dado que no pueden tener acceso a los geoestacionarios.

1.3. Elementos de un sistema de comunicación por satélite

La configuración de este medio (Fig. 1.6) involucra dos elementos fácilmente distinguibles, el primero es el segmento terrestre que abarca las distintas terminales.

El segundo hace referencia al campo espacial el cual es integrado por el satélite o constelaciones (otro componente que se considera como parte de este es la estación de control y comandos). [3]

La comunicación que va de la estación terrena al satélite es conocido como el enlace de subida o ascendente, mientras que la conexión inversa es el lazo de bajada o descendente.

Además existe una terminología que define otras características empleadas en este campo (Fig. 1.7).

²³ Radio Corporation America.

²⁴ SYNCOM 2 fue el primer satélite de comunicaciones geosíncrono.

²⁵ SYNCOM 3 fue el primer satélite de comunicaciones geoestacionario.

²⁶ Para muchos una fecha que es reconocida como el inicio de las comunicaciones comerciales por satélite.

El desempeño del equipo transmisor se encuentra determinado por el PIRE²⁷, que se refiere a la potencia de alimentación multiplicada por la ganancia de la antena en la dirección considerada.

El rendimiento del receptor por su parte está dado por la relación de la ganancia de la antena y la temperatura de ruido del sistema, expresado como (G/T) que recibe el nombre de “figura de mérito” o “factor de mérito”.

Los enlaces de subida y bajada consisten de portadoras de radiofrecuencia moduladas, mientras que entre satélites pueden ser del mismo tipo u ópticos. El rendimiento de cada conexión puede ser evaluado a través de la razón de la potencia de la portadora (C^{28}) entre la densidad espectral de potencia del ruido (N_0), expresado este parámetro como (C/N_0) cuyas unidades son Hertz²⁹ [Hz].

Los valores de (C/N_0) para cada uno de los eslabones que participan en la conexión entre los extremos terminales determinan la calidad de servicio, especificado en términos de tasas de bit erróneo (BER³⁰) para comunicaciones digitales.

Otro parámetro de importancia para el diseño de un sistema es el ancho de banda (BW^{31}) ocupado por la información. Este depende de la velocidad de transferencia de los datos, el tipo de codificación y de modulación empleado sobre la portadora.

Para los enlaces satelitales el equilibrio entre la potencia y el espectro de frecuencias de la señal es un aspecto muy importante para una conexión rentable.

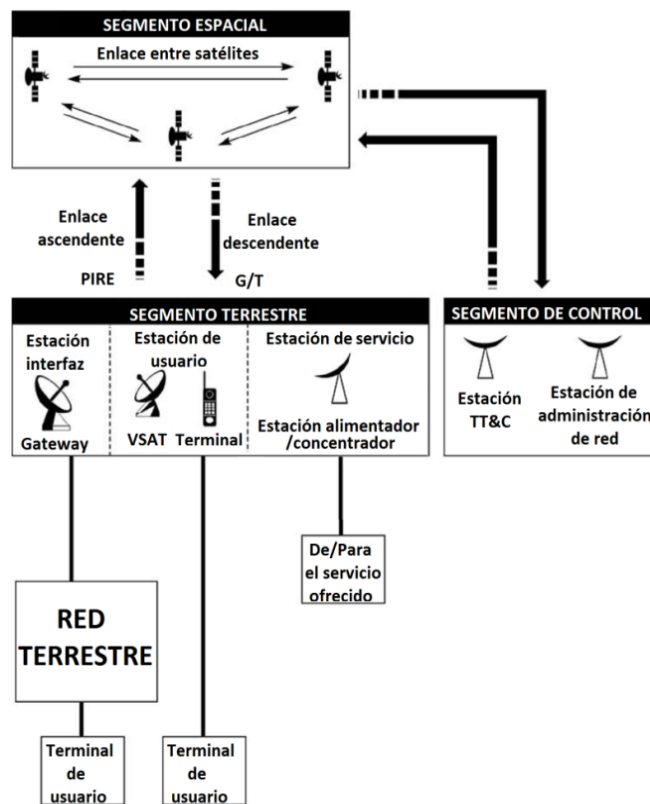


Fig. 1.6 Esquema conceptual de un sistema de comunicaciones por satélite

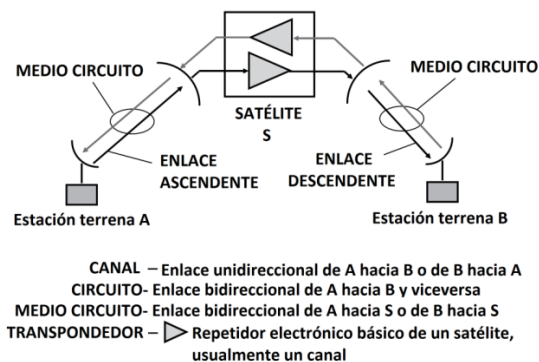


Fig. 1.7 Elementos básicos de un enlace de comunicación por satélite

²⁷ O también EIRP por sus siglas en inglés **Effective Isotropic Radiated Power** (Potencia isotrópica radiada efectiva).

²⁸ C derivado de la palabra en inglés **Carrier**.

²⁹ La potencia de la portadora (C) dado en [W] y la densidad espectral de potencia del ruido (N_0) en [W/Hz].

³⁰ BER por sus siglas en inglés **Bit Error Rate** (Tasa de bits erróneos).

³¹ BW por **BandWidth**.

1.3.1. El segmento espacial

El segmento espacial (Fig. 1.8) vimos que se encuentra conformado por el satélite artificial o conjunto de estos en órbita y una estación que provee el control operacional. Dicha instalación tiene varios nombres para designarla, ya sea de Rastreo, Telemetría y Comando (TTC³²) y Monitoreo (TTCM³³).

Los enlaces de comunicación entre la estación (TTC o TTCM) y el objeto en el espacio usualmente son independientes de los servicios para usuarios, además de que estos pueden operar en la misma banda de frecuencias o utilizar otra [3].

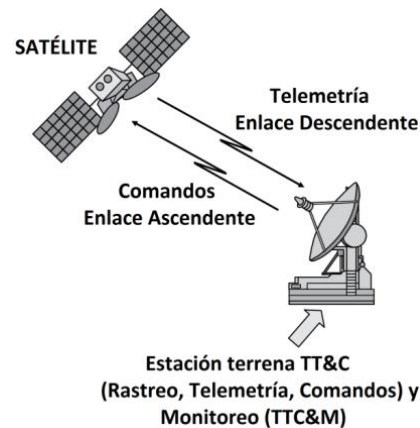


Fig. 1.8 Elementos del segmento espacial

El equipo a bordo del satélite artificial también puede ser clasificado de acuerdo a su función. La carga útil se refiere a los instrumentos empleados para ofrecer los servicios. El bus o plataforma hace referencia no únicamente a la estructura propia de este elemento sino que involucra varios subsistemas que proporcionan la energía, el control de posición, el control orbital, el control térmico y las operaciones de comando y telemetría.

1.3.2. El segmento terrestre

Por otra parte vimos que el sistema de comunicaciones posee un segmento terrestre el cual se encuentra conformado por las distintas estaciones las cuales hacen uso de las capacidades del satélite. Recordando que dentro de las instalaciones no se incluye a la de telemetría, rastreo, comando y monitoreo (TTCM) dado que ella forma parte del otro componente.

En general encontramos básicamente tres tipos de estaciones [3,4]:

- **Estaciones fijas o terminales en sitio.** Están diseñadas para acceder al satélite mientras estas se encuentran en una posición inamovible sobre la superficie terrestre. Estas pueden ofrecer diferentes tipos de servicios, ejemplo de ellas las encontramos en las redes privadas (VSAT³⁴) o los dispositivos ubicados en los edificios para la recepción de señales de radiodifusión.
- **Terminales transportables.** Están diseñadas para tener la capacidad de transportarse a diferentes sitios, pero que durante la conexión con el satélite debe permanecer fija. Ejemplos de ellas las encontramos en los vehículos de recopilación de noticias por satélite (SGN³⁵), los cuales se mueven a locaciones, se detienen y comienzan a desplegar una antena para establecer la comunicación.
- **Terminales móviles.** Son diseñadas para establecer comunicación con el satélite mientras se encuentra en movimiento. Además dependiendo su ubicación de desplazamiento se clasifican en estaciones móviles terrestres, aeronáuticas y marítimas.

³² TTC por sus siglas en inglés Tracking, Telemetry and Command.

³³ TTCM por sus siglas en inglés Tracking, Telemetry, Command and Monitoring.

³⁴ VSAT por sus siglas en inglés Very Small Aperture Terminal (Terminal de apertura muy pequeña)

³⁵ SGN por sus siglas en inglés Satellite News Gathering (Recopilación de noticias por satélite)

La organización general de una estación terrena (Fig. 1.9) comprende un subsistema para la antena el cual tiene asociado un sistema de rastreo, una sección de transmisión y de recepción. También incluye un equipo interfaz para la conexión con redes terrestres junto con varias instalaciones de monitoreo y fuentes de alimentación de energía.

Esta organización no es en principio diferente a las utilizadas en otras infraestructuras de telecomunicaciones para enlaces de microondas. Las únicas características especiales tienen que ver con el sistema de rastreo que en algunos casos puede ser bastante simple.

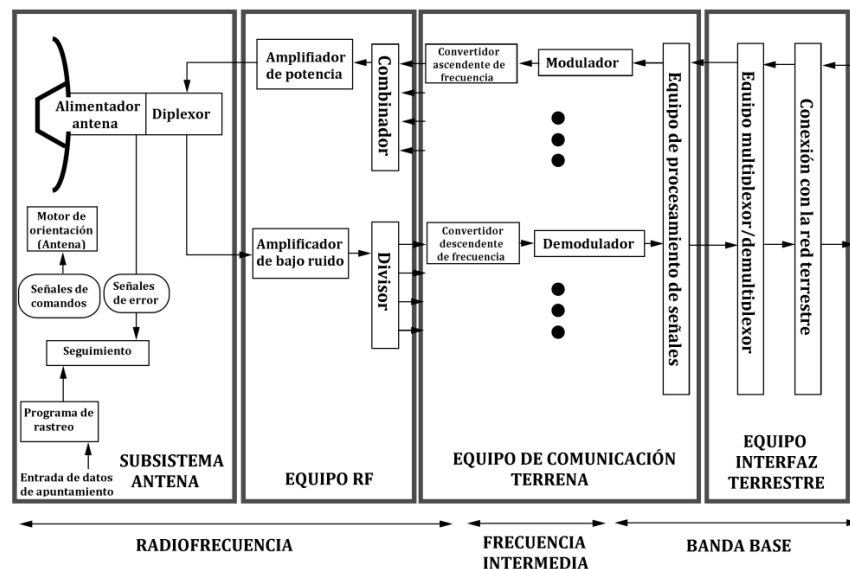


Fig. 1.9 Diagrama de bloques de una estación terrena

En el inicio de las comunicaciones por satélite, las estaciones terrenas han estado en un continuo desarrollo, sin embargo, la organización general se ha mantenido sin cambios. Esta evolución ha sido evidenciada por la reducción en su tamaño. Por ejemplo, el diámetro de las antenas inicialmente eran superiores a los 30 [m] hoy en día estas pueden ser tan pequeñas cuyas dimensiones comprenden decenas de centímetros. Situación similar en el equipo electrónico empleado, todo ello producto de los avances tecnológicos y del cambio de los sistemas analógicos a digitales.

CAPÍTULO 2

2.1. Fundamentos de las antenas

Dispositivo diseñado para enviar o recibir ondas electromagnéticas y que según sus características de radiación y directividad puede aportar ganancia. Estas en principio son clasificadas de acuerdo a su función o modo de operación, ya sean como transmisoras o receptoras (Fig. 2.1a y 2.1b). Aunque los requerimientos son totalmente diferentes, por lo general una sola es frecuentemente usada indistintamente (esto como resultado del teorema de reciprocidad³⁶)[11].

Casi todas las antenas presentan patrones de radiación direccionales, esto es, transmiten o reciben más energía en algunas direcciones que en otras.

Existen tres regiones en donde los valores de intensidad de los campos electromagnéticos que contribuyen a la conformación del patrón de radiación decrecen ya sea con $1/r^3$, $1/r^2$ y $1/r$ siendo r la distancia a la antena donde se realizan las mediciones. La ubicación de estas zonas son función de la mayor dimensión física del dispositivo representado por D ³⁷ y la longitud de onda λ de la señal como se muestra en la figura 2.1c.

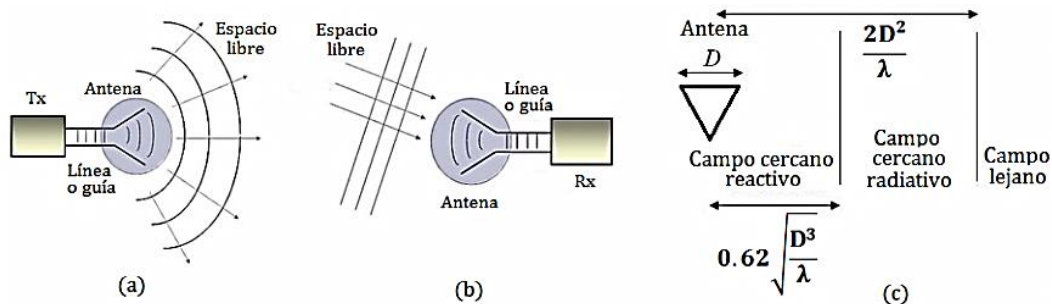


Fig. 2.1 Antena en modo (a) de transmisión (b) de recepción (c) Regiones de radiación

2.1.1. Parámetros básicos

Para analizar y evaluar el funcionamiento de cualquier antena es necesario definir varias características de estos elementos. Dentro de los más importantes tenemos: el patrón de radiación, la ganancia, el ancho del haz, la eficiencia y la polarización.

A continuación precisaremos algunos de estos.

2.1.1.1. Patrón de radiación

Se puede definir a través de una expresión matemática o una representación gráfica como función de las coordenadas espaciales³⁸. Las propiedades presentadas a través de esta figura son: la intensidad de los campos electromagnéticos o los niveles de potencia normalizados con respecto al valor máximo y medidas en

³⁶ "Si un voltaje es aplicado en las terminales de una antena A y la corriente es medida en las terminales de una B, entonces una corriente igual (tanto en amplitud y fase) puede aparecer en las terminales de A si el mismo voltaje es aplicado en B". El teorema de reciprocidad requiere que el patrón direccional del dispositivo operando en modo de transmisión sea el mismo al de recepción. Otra importante consecuencia es que la impedancia del elemento es la misma para ambos esquemas de operación.

³⁷ No confundir con la directividad.

³⁸ El uso de un sistema de coordenadas facilitará el análisis de las características de radiación de una antena, los tres principales son el cartesiano (x, y, z), el cilíndrico (r, θ , z) y el esférico (r, θ , ϕ).

la región de campo cercano o lejano³⁹ a la fuente (cada una de estas zonas presenta características diferentes en la forma final) [8].

En general un patrón de radiación (Fig. 2.2) se encuentra conformado por una serie de lóbulos, es decir, regiones en donde existen concentraciones de energía. El lóbulo principal es la ubicación del máximo valor.

Por otro lado tenemos a los lóbulos secundarios conformados por los laterales y posteriores. Estos usualmente representan direcciones de radiaciones no deseadas (por lo cual deben ser minimizados).

Las zonas ubicadas entre cada uno de los lóbulos donde la intensidad del campo o el nivel de potencia se hace cero se conocen como los nulos de patrón de radiación.

La representación gráfica de esta característica de la antena usualmente se realiza en escalas logarítmicas o decibeles, dado que permite una mejor representación de los detalles en el caso de valores pequeños [22].

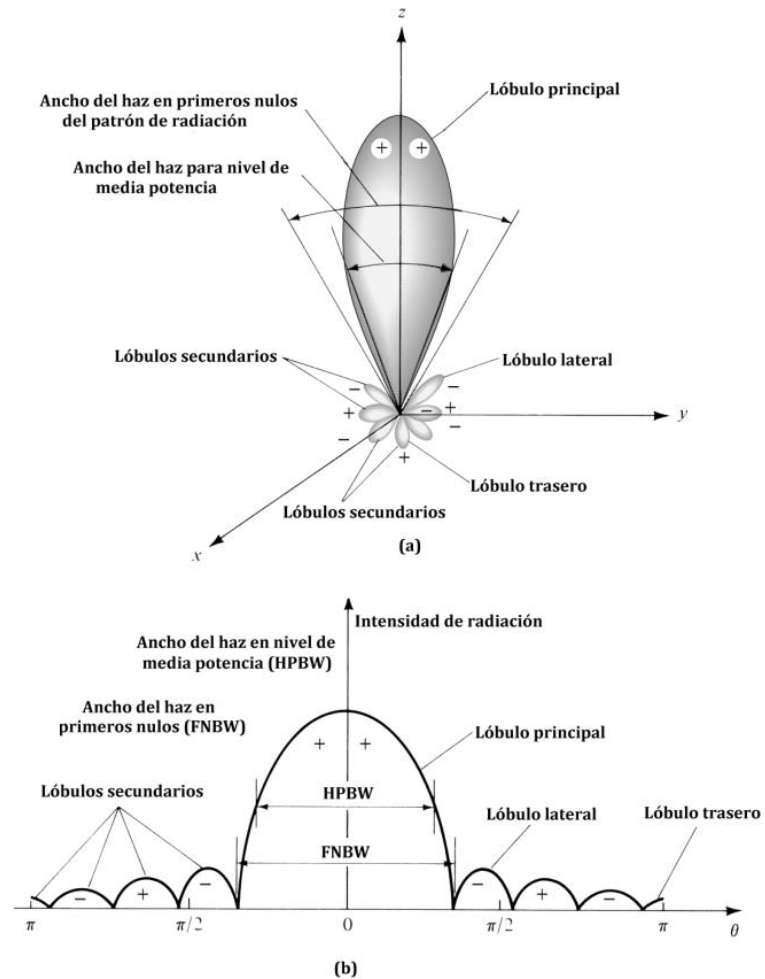


Fig. 2.2 Representación del patrón de radiación (a)3D (b) 2D

2.1.1.2. Ganancia

Es una característica relativa a un radiador isotrópico⁴⁰ aunque también puede ser algún tipo básico (dipolo). Este parámetro se define en términos de la razón de la potencia radiada o recibida por unidad de ángulo sólido por el dispositivo de prueba y la correspondiente por el elemento de referencia alimentada por el transmisor.

La diferencia entre esta ganancia y la directiva radica en el hecho la primera toma en cuenta el valor de la eficiencia (η). Esta propiedad de la antena es generalmente la principal consideración en el diseño de este dispositivo [25]. Es una cantidad adimensional cuando se expresa en unidades lineales, en escalas logarítmicas se habla de decibeles [dBi] o [dBd] dependiendo de cual es el elemento que se toma como referencia (isotrópica o dipolo).

³⁹ El campo lejano hace referencia a medir las características que presenta el patrón de radiación a una gran distancia (que depende de la frecuencia de operación y de las dimensiones de la antena).

⁴⁰ Un radiador isotrópico es un dispositivo ideal físicamente no realizable que irradia la energía en una esfera perfectamente uniforme con la misma intensidad en todas las direcciones y con cero decibeles de ganancia.

Considerando una antena ideal⁴¹ tendremos que el valor de este parámetro se encuentra relacionado con el área de la apertura física (A_f) y la longitud de onda (λ) a la frecuencia de operación (Fig. 2.3).

Apertura física :

$$A_f [\text{m}^2] = \pi r^2 = \frac{\pi D^2}{4}$$

Apertura efectiva :

$$A_e [\text{m}^2] = \eta A_f \quad 0.5 \leq \eta \leq 0.7$$

Ganancia máxima :

$$G_{\text{máx}} [1] = \frac{4\pi\eta A_f}{\lambda^2} = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

$$G_{\text{máx}} [\text{dBi}] = 10 \log_{10} \left[\eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right]$$

Longitud de onda :

$$\lambda [\text{m}] = \frac{c}{f}$$

Relación entre dBi y dBd :

$$x [\text{dBi}] = y [\text{dBd}] + 2.14 [\text{dB}]$$

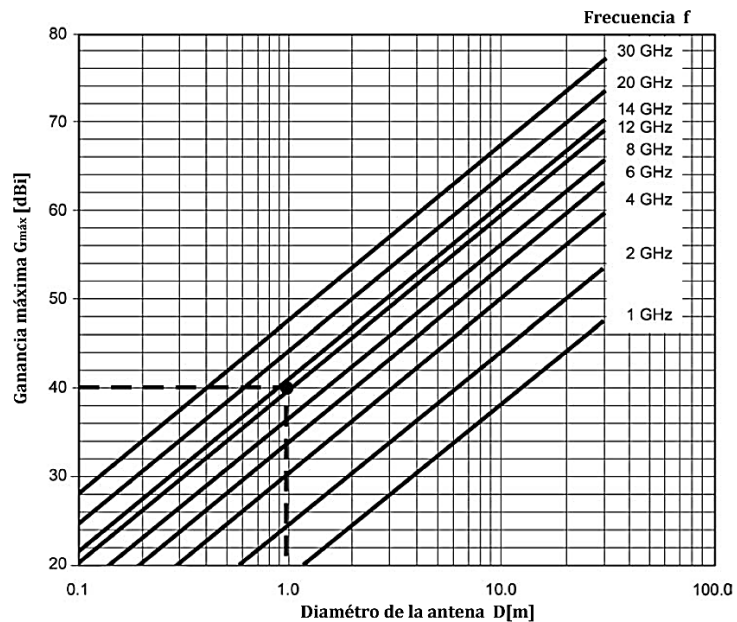


Fig. 2.3 Ganancia máxima de una antena parabólica ($\eta=0.6$)

2.1.1.3. Ancho del haz

Un parámetro asociado con el patrón de radiación de la antena es el ancho del haz ($\theta_{-3\text{dB}}$). Este se define como la separación angular entre los puntos de media potencia lineal normalizado en el lóbulo principal (Fig. 2.4).

O equivalentemente donde la potencia es 3 [dB] menor al punto máximo o cuando la intensidad de los campos electromagnéticos tienen una amplitud de 0.7071 del valor pico.

Para el caso de las antenas con reflector existe una aproximación para el cálculo del ancho del haz que depende de la longitud de onda (λ) y su diámetro (D) [22].

$$\theta_{-3\text{dB}} [^\circ] = \frac{70\lambda}{D}$$

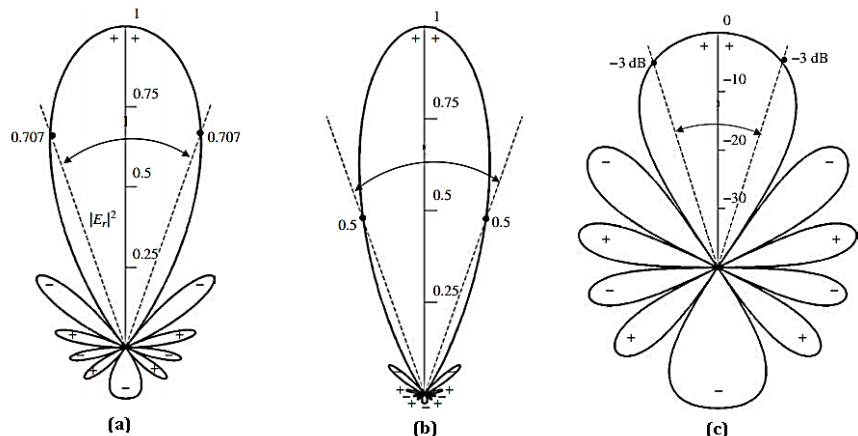


Fig. 2.4 Ancho del haz (a) Intensidad de campo normalizado (b) Potencia lineal (c) en decibelios

2.1.1.4. Eficiencia

Esta se define como la razón de la potencia radiada (P_{rad}) a la total de entrada (P_{total}) aplicada a la antena, la eficiencia denotada por (η) es una cantidad adimensional. El valor de esta propiedad siempre es menor a 1 como consecuencia de los efectos de reflexiones por desacoplamiento debido a los elementos de conexión

⁴¹ Sin pérdidas con una eficiencia $\eta=100\%$.

entre el transmisor (o receptor) y el dispositivo; además de las pérdidas por disipación de la energía en forma de calor (Fig. 2.5).

Los efectos de reflexión son consecuencia de un mal acoplamiento entre la impedancia de la antena (Z_{antena}) y la línea de transmisión ($Z_{\text{línea}}$). Las pérdidas de conducción y dieléctricas se evalúan de manera conjunta a través de cálculos y no de manera directa [22].

$$\eta_{\text{Total}} = (\eta_{\text{Reflexión}})(\eta_{\text{Conducción}})(\eta_{\text{Dieléctrica}}) = (\eta_{\text{Conducción+Dieléctrica}})(1 - |\Gamma|^2)$$

$$\eta_{\text{Conducción+Dieléctrica}} = \frac{R_r}{R_r + R_{\Omega}} \quad \Gamma = \frac{Z_{\text{antena}} - Z_{\text{línea}}}{Z_{\text{antena}} + Z_{\text{línea}}}$$

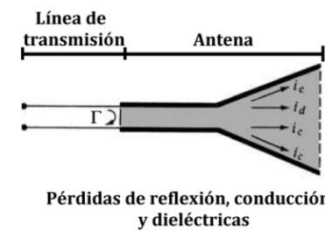


Fig. 2.5 Eficiencia de la antena

2.1.1.5. Polarización

En la región de campo lejano a la antena las ondas radiadas toman una característica transversal, esto es, los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la dirección de propagación. Además estos se encuentran en fase y sus variaciones de amplitud son las mismas, por lo que la polarización puede ser observada tanto en el campo eléctrico como el magnético, aunque por lo general se emplea al primero [8].

Así que la polarización (Fig. 2.6) de este dispositivo está determinada por la curva trazada por la punta del vector campo eléctrico de la onda que está siendo radiada.

El tipo de polarización más general es el elíptico, después tenemos el circular, la diferencia entre estos dos radica en como varían las amplitudes de los campos eléctrico y magnético. Además, existen sentidos de giro en su propagación, rotación horaria (RHCP⁴²) o antihoraria (LHCP⁴³).

Cuando el vector campo eléctrico siempre está dirigido a lo largo de una línea entonces se dice que la onda tiene polarización lineal.

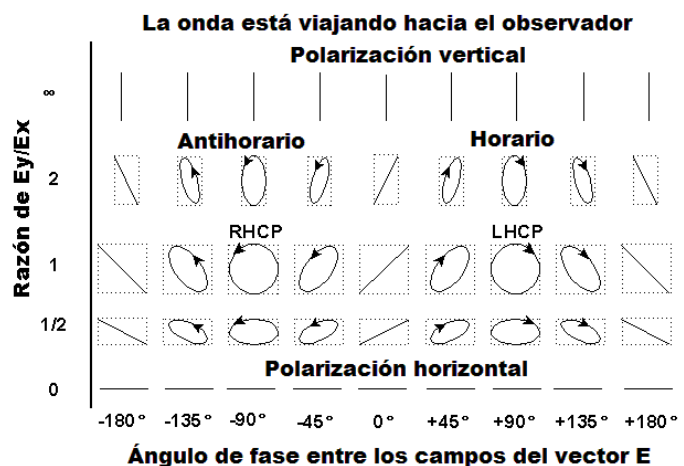


Fig. 2.6 Tipos de polarización

2.1.2. Tipos básicos de antenas

Cada aplicación y banda de frecuencia presentan características peculiares que dan origen a tipos de antenas muy diversas las cuales muestran distintas configuraciones que generan patrones de radiación y niveles de ganancia específicos.

De una forma más amplia y no tan exhaustiva, las más comunes se definen a continuación.

⁴² Por sus siglas en inglés **R**ight **H**and **C**ircular **P**olarization (Polarización circular de mano derecha)

⁴³ Por sus siglas en inglés **L**eft **H**and **C**ircular **P**olarization (Polarización circular de mano izquierda)

2.1.2.1. Dipolos

Es el tipo más común de antena de hilo, su utilización es esencial en los satélites de comunicación (Fig. 2.7).

Su patrón no presenta radiación a lo largo del eje del propio dipolo, por lo cual decimos que es omnidireccional. Tal característica permite su uso para funciones de rastreo, telemetría y comando sobre el satélite tanto durante la fase de colocación cuando no es posible desplegar antenas altamente directivas y en órbita [25].

El dipolo lineal o hertziano opera con polarización lineal en las frecuencias VHF y UHF.

Posee una directividad 1.64 [1] o equivalentemente de 2.15 [dB] con respecto a un radiador isotrópico. Además tiene un ancho de haz de casi 78 [°] y una impedancia de 73 [Ω]. Cuando la longitud del dipolo es mayor o menor que $\lambda/2$ entonces la carga de la antena presenta componente inductiva o capacitiva respectivamente.

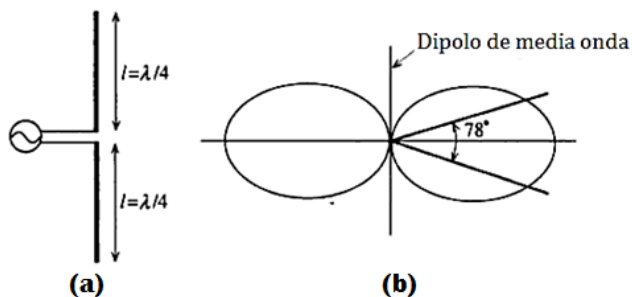


Fig. 2.7 Dipolo de media onda (a) Estructura (b) Patrón de radiación.

2.1.2.2. Antenas de apertura

Las antenas de corneta o bocina (Fig. 2.8) son ejemplo de este tipo que permiten una transición de una guía de ondas a una apertura que se acopla más efectivamente al espacio.

Son utilizadas como radiadores a bordo del satélite para iluminar áreas relativamente grandes de la Tierra, además también son ampliamente usadas como alimentadores principales de un reflector para ambos modos de operación.

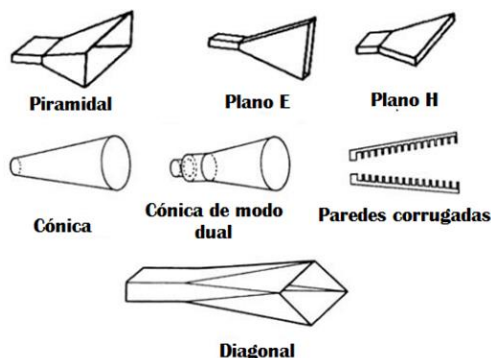


Fig. 2.8 Antenas de bocina más comunes

Existen básicamente dos tipos apertura ya sea cónica o piramidal. Típicamente van conectadas a guías de onda circular y rectangular respectivamente, aunque pueden mezclarse siempre y cuando exista un elemento que permita la conversión [5].

2.1.2.3. Reflectores parabólicos

Son ampliamente empleados para aumentar la ganancia de las antenas, además proporcionan un mecanismo que concentra la energía en una cierta dirección; razón por la cual son utilizadas para establecer comunicación directa entre estación terrena y satélite.

Poseen diferentes configuraciones que dependen de la geometría y de como sean alimentadas (Fig. 2.9). La forma del disco es usualmente una sección de paraboloides o un cilindro. La frecuencia de operación y las dimensiones físicas de este componente están íntimamente relacionadas con las características del ancho del haz y los niveles de ganancia en el patrón de radiación.

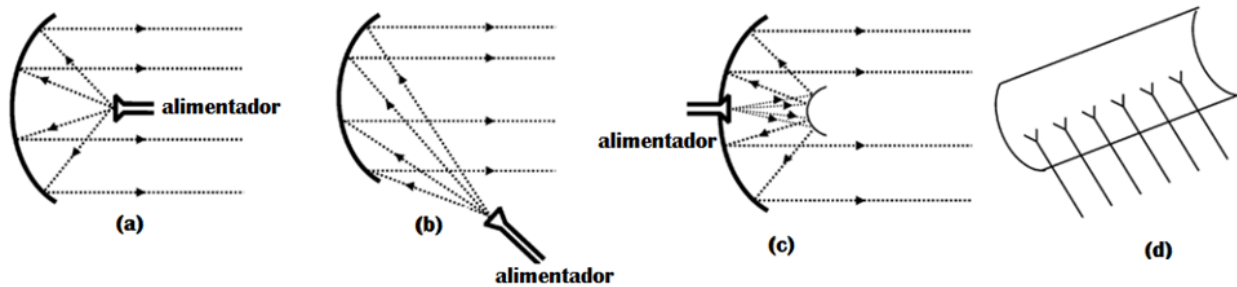


Fig. 2.9 Reflector parabólico con alimentación (a) Focal (b) Desplazada (c) Cassegrain (d) Cilíndrico con un arreglo de alimentadores.

La sección transversal utilizada para un reflector parabólico es circular, existen otro tipo de configuraciones que hacen uso de dos elementos que tienen como ventaja principal la posibilidad de colocar al alimentador y demás componentes en una posición que no alteren la forma del patrón de radiación como suele ocurrir cuando se hace uso de uno solo. Las dimensiones físicas de estos también modifican las características de ganancia y ancho del haz generados [5].

2.1.2.4. Arreglos de antenas

Estas emplean un gran número de elementos distribuidos sobre una curva o superficie que constituye la apertura (Fig. 2.10). El patrón de radiación obtenido es el resultado de una combinación en amplitud y fase de las ondas generadas por cada componente. En principio, su modo de operar es similar al de un arreglo alimentado en el foco del reflector. La diferencia se encuentra principalmente en el número de dispositivos radiantes y el área superficial que determinan el valor de la ganancia y la anchura del haz obtenidos.

Los elementos radiantes pueden ser antenas de bocina, impresas, cavidades resonantes entre otras.

Existen diversas formas de obtener un patrón de radiación específico, ya sea a través de la modificación de la configuración geométrica (lineal, circular o plana), distancia de separación entre los componente, amplitud y fase de la señal de alimentación y concentración de energía relativa de cada elemento.

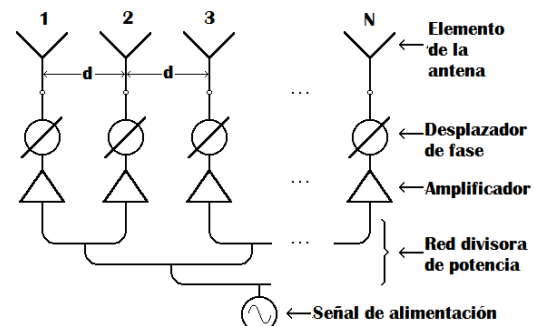


Fig. 2.10 Arreglo de antenas

Los arreglos se clasifican como transversales (a lo largo del eje) o longitudinales (perpendicular) de acuerdo a la dirección de radiación máxima [7].

2.1.2.5. Antenas perfiladas

Son un tipo especial que entraría dentro de la clasificación de antenas con reflector, sin embargo, sus características tanto de alimentación y radiación permiten considerarlas de manera independiente. Dentro de las particularidades de diseño tendremos que su disco ya no es liso, su superficie presenta ahora una serie de irregularidades en función de las características de concentración de la energía y zona de cobertura deseadas.

Dentro de las cualidades que presentan estos dispositivos, destacamos que solo es necesario un elemento alimentador para el reflector perfilado que genere un patrón de radiación tal que su huella de cobertura se

asemeje lo más posible a la zona geográfica donde se desea dar servicio, con lo cual se reducen los costos y el peso generado.

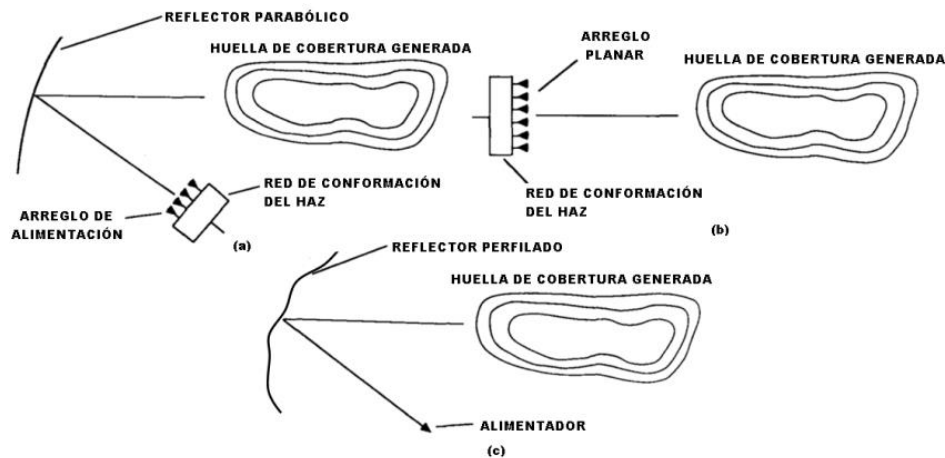


Fig. 2.11 (a) Reflector parabólico con arreglo de alimentación (b) configuración planar con radiación directa (c) antena perfilada

Por lo que antiguos métodos utilizados para la generación de una huella de cobertura particular (Fig. 2.11a y 2.11b) pueden ser remplazados y aprovechar las cualidades que presentan las antenas perfiladas (Fig. 2.11c).

El proceso de diseño para este radiador se fundamenta en la aplicación de conceptos físicos (como por ejemplo el uso de la óptica geométrica para la conformación de la amplitud y fase del patrón) y matemáticos (para la proyección en la región lejana a la fuente a través del uso de las transformaciones de Fourier), además de que dicho algoritmo es iterativo, es decir, se hace uso de resultados previos para generar nuevos valores que permiten optimizar las características del reflector [27].

2.1.2.6. Reflectarrays

Como su nombre lo indica es un arreglo de elementos radiadores que actúan como un proyector (Fig. 2.12). Combinan las ventajas de los reflectores y las agrupaciones de antenas con control de fase.

Se fabrican con arreglos planos de parches impresos, se alimentan con una fuente primaria (usualmente una antena de bocina).

Cada uno de los elementos del reflectarray debe reflejar el campo incidente con el desfase adecuado para producir un diagrama de radiación colimado (área lisa) o conformado (superficie irregular) similar al que produciría un reflector.



Fig. 2.12 Antena Reflectarray

Los reflectarray poseen una mayor eficiencia que los arreglos de fase ya que al ser excitados por una onda que viaja a través del aire no necesitan complejos circuitos de alimentación que introducen pérdidas. Asimismo, son más compactas, pesan poco y cuestan menos que en el caso de los reflectores.

Pueden emitir el haz principal del diagrama de radiación en distintas direcciones perpendiculares al plano de la antena, tienen niveles bajos de polarización cruzada, lo cual las hace muy útiles en aplicaciones de con reuso de frecuencia. Su principal desventaja está en el ancho de banda que es mucho menor⁴⁴ al que se consigue con un reflector convencional [43].

2.1.3 Huellas de cobertura

Una característica importante y propia de la antena en el satélite es la huella o zona de cobertura⁴⁵, la cual representa el área geográfica sobre la superficie terrestre que es iluminada por el haz y donde una estación es capaz de comunicarse (Fig. 2.13).

La forma de los patrones depende de una variedad de factores, entre los que se incluyen: la potencia de transmisión, las técnicas para la conformación del haz, la órbita, etc. Mientras que el área de servicio es función del ancho del haz y la altitud de la fuente de emisión. La zona de cobertura se representa en mapas que muestran los diferentes contornos de radiación desde el satélite (Fig. 2.14).

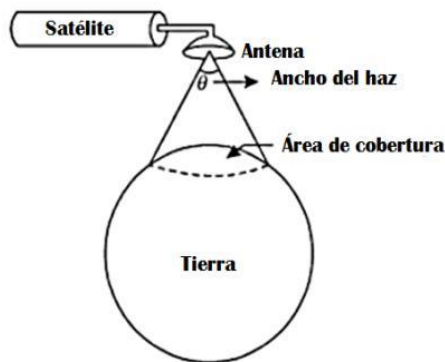


Fig. 2.13 Huella de cobertura

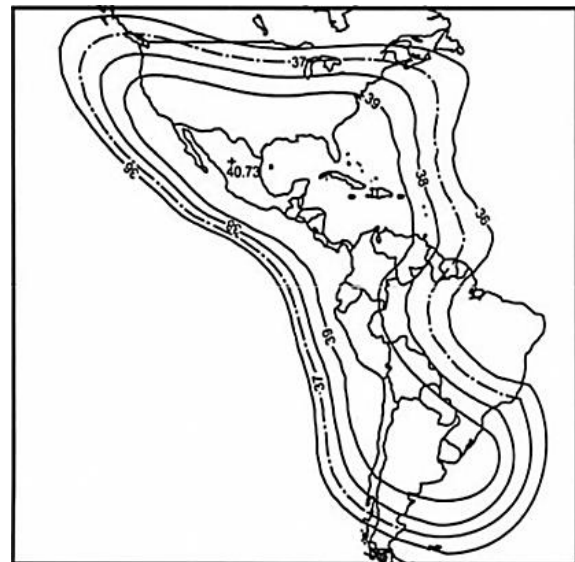


Fig. 2.14 Contornos de PIRE

En esta huella se indica la potencia con que emite la antena desde el satélite hacia esa región en concreto, expresándola en decibeles-watt [dBW⁴⁶] que representa el PIRE. El nivel es máximo en el centro de la zona de cobertura y va disminuyendo al alejarse de él. Además tiene formas irregulares⁴⁷ cuando los haces son asimétricos [14].

Hay que tener en cuenta que los contornos de PIRE dados por el fabricante son para una frecuencia dada. Un mismo satélite puede tener más de una huella de iluminación en la misma o diferente banda, para servicios nacionales o regionales o globales.

⁴⁴ El estrecho ancho de banda de los parches es el factor más restrictivo en el reflectarray de tamaño moderado, y puede ser aumentado con un diseño adecuado de los elementos utilizando parches apilados.

⁴⁵ En inglés **footprint**

⁴⁶ Las unidades de dBW (decibeles watt) son cantidades logarítmicas de los niveles de potencia referidos a una potencia de 1[W], esto es:

$$P_{dBW} = 10 \log_{10} \left[\frac{P[W]}{1[W]} \right]$$

⁴⁷ La razón para generar contornos de PIRE irregulares es con la finalidad de aprovechar mejor la potencia, al no transmitirla a puntos donde hay poco tráfico o pocas antenas terrenas.

2.2. Cálculo de enlaces

El cálculo de enlaces se refiere básicamente a establecer un balance de potencias, ganancias y pérdidas involucradas en la propagación de la señal a través de cada una de las trayectorias establecidas para llevar a cabo la comunicación. Estas operaciones son realizadas en cantidades expresadas en decibeles, dado que simplifican el proceso a simples sumas y restas. A partir de los resultados obtenidos se pueden determinar algunas características de los elementos involucrados en cada segmento (como por ejemplo el tipo de antenas, amplificadores, los niveles de potencia entre otras especificaciones).

El enlace de comunicaciones más básico (Fig. 2.15) involucra una serie de parámetros tales como: la potencia y ganancia de transmisión-recepción $\{(P_T), (G_T), (P_R), (G_R)\}$, la distancia de separación entre los extremos (r), pérdidas de alimentación en el Tx⁴⁸ y Rx⁴⁹, atenuación por propagación en espacio libre y atmosférica.

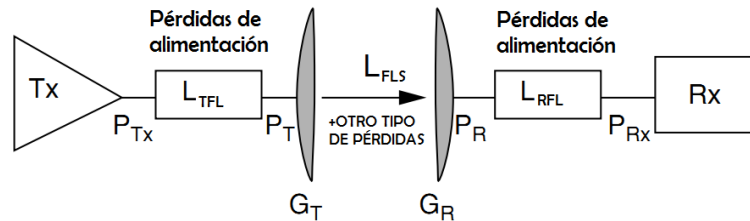


Fig. 2.15 Elementos involucrados en los cálculos de enlace

El PIRE puede ser considerado como el valor de entrada en el transmisor y entonces el problema consiste en determinar el nivel que llega al receptor. Algunas de las pérdidas que aparecen a lo largo de la trayectoria y que van degradando a la señal son constantes (fácilmente cuantificadas); otras que son variantes con el tiempo son ponderadas mediante el uso de datos o modelos estadísticos.

Lo primero que se considera en el cálculo de enlaces es una situación libre de condiciones meteorológicas que toma en cuenta las pérdidas que no varían significativamente con el tiempo. Los atenuantes atmosféricos son considerados después en la ecuación de transmisión para introducir apropiados márgenes de desvanecimiento.

2.3 Pérdidas de transmisión

En su propagación de la señal por espacio libre desde la estación transmisora pasando por el satélite hasta llegar a la instalación receptora, está sufre una serie de degradaciones; la principal y quizá más importante es la atenuación o pérdida de potencia.

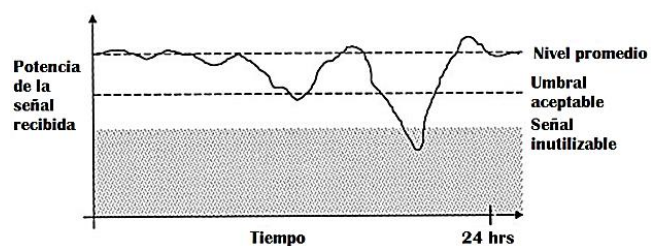


Fig. 2.16 Variación de la potencia de la señal recibida por efecto de pérdidas

En la curva (Fig. 2.16) se muestra el caso de una variación rápida⁵⁰, en donde el nivel promedio es el resultado de las pérdidas constantes (y predecibles) y los atenuantes variables que causan que el valor decrezca y ocasionalmente este por debajo de un umbral aceptable. En donde es inutilizable para propósitos de comunicación debido al excesivo ruido y en el caso de sistemas digitales se traduce en una indeseable alta tasa de errores y en los peores casos puede llegar a darse una desincronización.

⁴⁸ Simplificación para designar al transmisor.

⁴⁹ Simplificación para designar al receptor.

⁵⁰ Referida como un desvanecimiento

La diferencia en decibeles entre el nivel promedio y el umbral es conocido como margen del enlace.

2.3.1. Pérdidas de propagación por espacio libre

Como uno de los primeros factores de pérdidas tenemos la atenuación debido a la propagación de la señal en el espacio libre. Este cálculo es el mismo tanto para el enlace de subida (Estación terrena Tx-Satélite) como para el de bajada (Satélite-Estación terrena Rx). Partiendo de la densidad de flujo de potencia que capta la antena receptora la cual viene dada por la ecuación:

$$\Psi \left[\frac{W}{m^2} \right] = \frac{G_T P_T}{4\pi r^2} = \frac{PIRE}{4\pi r^2}$$

La potencia entregada al receptor está dada por el producto del parámetro anterior (Ψ) y el área efectiva de la antena (A_e). Recordando que (r) es la distancia o rango de separación entre el Tx y Rx, además (G_R) es la ganancia de recepción.

$$P_R [W] = \Psi A_e = \left(\frac{G_T P_T}{4\pi r^2} \right) \left(\frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} \right) = (PIRE) \cdot (G_R) \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$$

$$[P_R]_{dBW} = 10 \log_{10} \left(PIRE \cdot G_R \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \right) = [PIRE]_{dBW} + [G_R]_{dBi} - 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2$$

Como vemos en la ecuación anterior se encuentran involucrados tres términos asociados con el transmisor, el receptor y el espacio libre respectivamente.

Por tanto, las pérdidas por espacio libre L_{FSL}^{51} expresadas en decibeles son:

$$[L_{FSL}]_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi f r}{c} \right)^2 \rightarrow \begin{cases} c : \text{Velocidad de propagación de la luz} \\ f : \text{Frecuencia de operación} \end{cases}$$

Aplicando propiedades de los logaritmos y asumiendo que la frecuencia está dada en [GHz] y la distancia en [km] llegamos a la siguiente expresión.

$$[L_{FSL}]_{dB} = 92.44 + 20 \log_{10}([r]_{km}) + 20 \log_{10}([f]_{GHz})$$

2.3.2. Pérdidas por desalineación de antenas

Cuando un enlace es establecido, la situación ideal sería tener a la estación terrena y el satélite alineados en la dirección de máxima ganancia de acuerdo al patrón de radiación de sus antenas.

Los efectos de pérdidas por desapuntamiento son considerados tanto por el equipo transmisor y receptor (Fig. 2.17).

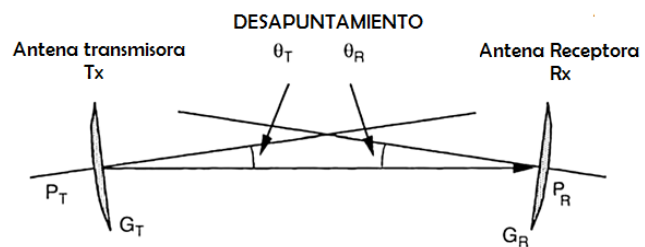


Fig. 2.17 Pérdidas por desapuntamiento

⁵¹ El subíndice FLS viene de Free Space Losses, es decir, pérdidas por espacio libre.

Sus niveles son cuantificados de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$L_{Tx}[\text{dB}] = 12 \left(\frac{\theta_T}{\theta_{3\text{dB}}} \right)^2 \qquad L_{Rx}[\text{dB}] = 12 \left(\frac{\theta_R}{\theta_{3\text{dB}}} \right)^2$$

Además de estas pérdidas, tenemos las ocasionadas por la desadaptación de polarización de la señal que usualmente son pequeñas (con lo cual se consideran en conjunto).

2.3.3. Pérdidas de alimentación

Las pérdidas de alimentación ocurren en la unión de la antena y el transmisor (o receptor). Estas se originan por la conexión entre guía de ondas, filtros, líneas de transmisión, acopladores, etc.

Denotadas como L_{RFL} ⁵² para el equipo Rx y L_{TFL} ⁵³ para el Tx, estas pérdidas son consideradas en el valor del PIRE o la figura de mérito (G/T) [5].

2.4. Efectos atmosféricos en las comunicaciones por satélite

La atmósfera terrestre (Fig. 2.18) influye en la propagación de las señales radioeléctricas que comunican ambos enlaces, es una preocupación constante en el diseño y desempeño de este tipo de sistemas. Los diversos fenómenos cuando se presentan de manera individual o conjunta pueden causar variaciones no controlables en la amplitud, fase, polarización y ángulo de arribo que da como resultado una reducción en la calidad de las transmisiones (señales analógicas) y un incremento en la tasa de errores (señales digitales).

La frecuencia de la señal radioeléctrica es un factor crítico que determinará los diversos impedimentos introducidos por la atmósfera terrestre. La figura 2.18 muestra las distintas capas de este medio de transmisión que impactan sobre las comunicaciones.

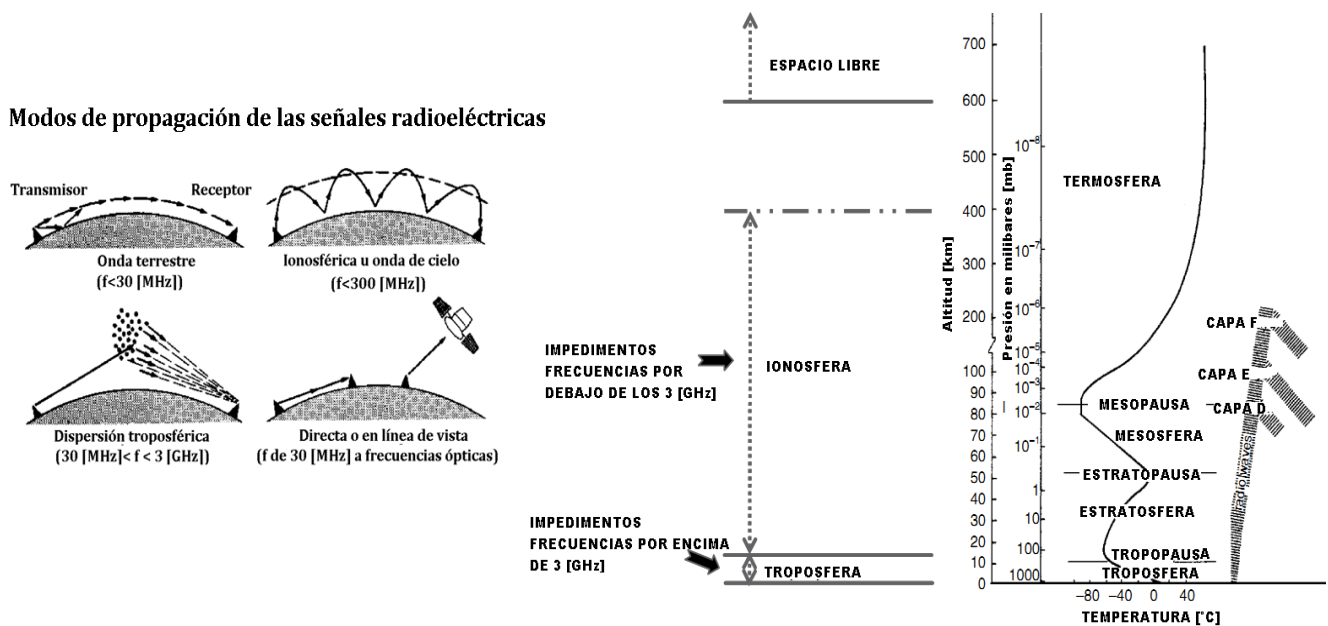


Fig. 2.18 Elementos de la atmósfera que afectan las comunicaciones por satélite

⁵² El subíndice RFL viene de Receiver Feeder Losses, es decir, pérdidas de alimentación al receptor.

⁵³ El subíndice TFL viene de Transmitter Feeder Losses, es decir, pérdidas de alimentación del transmisor

Para frecuencias de operación por encima de los 30 [MHz] se tendrá la capacidad de atravesar la ionosfera, sobrepasando los 3 [GHz] el medio es transparente para las comunicaciones. Distintos modos de transmisión para las señales radioeléctricas pueden ser generados en la atmósfera (Fig. 2.18).

Generalmente los diversos efectos de propagación atmosférica comienzan a ser más significativos a medida que la frecuencia se incrementa o conforme los ángulos de elevación disminuyen. La naturaleza aleatoria y generalmente impredecible de los fenómenos añade además complejidad e incertidumbre en la evaluación de los impedimentos de transmisión sobre las comunicaciones.

2.4.1 Propagación en frecuencias por debajo de los 3 [GHz]

Algunas de las aplicaciones por satélite que operan con frecuencias por debajo de los 3 [GHz] son las siguientes:

- Redes móviles satelitales (terrestres, aeronáuticos y marítimos).
- Telefonía celular satelital.
- Enlaces de comando y telemetría para apoyo de operaciones en el satélite.
- Comunicaciones de espacio profundo.

La ionosfera es la principal fuente de deterioro en la transmisión para estas frecuencias. Las dos principales características que contribuyen a la degradación de las señales radioeléctricas son:

- 1) La ionización de fondo que es cuantificada por el contenido total de electrones (TEC⁵⁴) a lo largo de la trayectoria de propagación.
- 2) Las irregularidades ionosféricas.

La degradación relacionada con el contenido total de electrones incluye la rotación de Faraday, el retraso de grupo, la dispersión, el desplazamiento de frecuencia por efecto Doppler, las variaciones en la dirección de arribo y la absorción. El principal efecto atribuido a las irregularidades ionosféricas es el centelleo.

La ionosfera⁵⁵ es una región ionizada constituida por iones positivos y electrones libres, son estos últimos los que afectan la propagación de las señales.

Esta región de la atmósfera se encuentra dividida en diferentes capas que absorben de distinta manera las radiaciones solares, con lo cual la distribución de iones-electrones es función de la altitud dicha región (en orden de incremento tenemos la D, E y F).

2.4.2. Propagación en frecuencias por encima de los 3 [GHz]

Muchos enlaces de comunicación por satélite operan en frecuencias por encima de los 3 [GHz] que incluyen las bandas C, Ku, Ka y V. Las principales aplicaciones son:

- Para servicios fijos.
- Conexiones de bajada de usuarios para radiodifusión.
- Comunicaciones de espacio profundo.
- Enlaces de conexión para servicios de radiodifusión y móviles.
- Comunicación militar.

⁵⁴ Por sus siglas en inglés Total Electron Content

⁵⁵ Es una región de la atmósfera que se extiende desde los 15 [km] hasta un límite no definido que se encuentra entre los 400 [km] a 2000 [km] sobre la superficie terrestre.

La tropósfera es la fuente principal de deterioro en las comunicaciones por satélite operando a frecuencias mayores a 3 [GHz]. Los efectos presentes en orden decreciente en cuanto a su nivel de importancia e impacto sobre el rendimiento son: la atenuación por lluvia, por gases atmosféricos, por nubes y niebla. Además también se generan cambios en los estados de polarización de la señal.

2.5. Efectos de ruido

Como consecuencia de las enormes distancias involucradas en los sistemas son particularmente susceptibles a los efectos de ruido, dado que los niveles de potencia son muy bajos tanto en el receptor del satélite o de la estación terrena.

El ruido abarca todas las señales no deseadas cuya potencia se mezcla con la portadora. Su efecto es reducir la capacidad para recuperar y reproducir correctamente la información.

Las componentes de ruido natural y artificial (creadas por el hombre) son captadas por las antenas, mientras que los diversos dispositivos electrónicos de los equipos receptores generan otro tipo. Las primeras pueden ser tomadas en cuenta o despreciadas según las consideraciones que se tomen en el diseño y cálculos de enlace.

La principal componente de ruido que se considera importante de analizar y tomar en cuenta sus efectos sobre el rendimiento, es el generado en recepción.

2.5.1. Ruido térmico

Es generado por cualquier componente resistivo de cualquier impedancia debido al movimiento aleatorio de las moléculas, átomos y electrones. Es también conocido como ruido blanco porque el movimiento errático de esas partículas da como resultado que la potencia sea distribuida dentro de todo el espectro de frecuencias.

De acuerdo a la teoría cinética, el movimiento de las partículas da como resultado un valor de temperatura diferente del cero absoluto. Por tanto, la potencia de ruido (P_N) generada por el componente resistivo depende de esta variable y del ancho de banda dentro del cual es medido [12].

Si el resistor es considerado como un generador de ruido con un voltaje equivalente (V_N), entonces este puede transferir la máxima potencia (P_N) a una carga acoplada de acuerdo a la siguiente formula:

Con lo cual quedan definidos el voltaje y corriente de ruido equivalente dado por las siguientes expresiones:

Otro término que usualmente se define es la densidad espectral de potencia del ruido (N_0) que viene dada por la ecuación:

$$P_N [W] = kTB \rightarrow \begin{cases} P_N : \text{Potencia del ruido [W]} \\ T : \text{Temperatura absoluta} \\ \quad \text{en kelvin [K]} \\ B : \text{Ancho de banda} \\ \quad \text{de interés en [Hz]} \\ k : \text{Constante de Boltzmann} \\ \quad (1.38 \times 10^{-23} \text{ [J/K]}) \end{cases}$$

$$P_N [W] = \frac{V_N^2}{4R} = kTB$$

$$V_N [V] = \sqrt{4kTRB} \quad I_N [A] = \sqrt{\frac{4kTB}{R}}$$

$$N_0 \left[\frac{W}{Hz} \right] = \frac{P_N}{B} = kT$$

El modelo de ruido blanco que es el más utilizado en la práctica, considera que la densidad espectral N_0 [W/Hz] es constante⁵⁶ en toda la gama de frecuencias (Fig. 2.19).

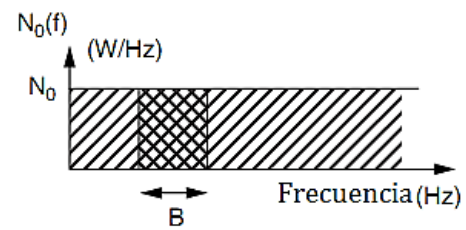


Fig. 2.19 Densidad espectral de potencia para el modelo de ruido blanco

2.5.2. Figura de ruido

Se define como el cociente entre potencias de la señal a ruido a la entrada y su valor a la salida, esto es:

$$NF = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_i}{\left(\frac{S}{N}\right)_o} = \frac{N_o}{N_i \cdot \left(\frac{S_o}{S_i}\right)} = \frac{N_o}{N_i} \left(\frac{1}{G}\right) \rightarrow \begin{cases} S_i : \text{Potencia de la señal a la entrada} & S_o : \text{Potencia de la señal a la salida} \\ N_i : \text{Potencia del ruido a la entrada} & N_o : \text{Potencia del ruido a la salida} \\ G : \text{Ganancia de potencia dentro del ancho de banda} \end{cases}$$

Teniendo en cuenta que la potencia de ruido a la entrada (N_i) puede obtenerse de acuerdo a la siguiente expresión:

$$N_i = kT_i B$$

Donde (T_i) representa la temperatura ambiente a la cual opera el elemento. Por tanto, la expresión para la figura de ruido (NF ⁵⁷) puede ser definida como:

$$NF = \frac{N_o}{kT_i B} \left(\frac{1}{G}\right)$$

Los actuales amplificadores, sin embargo, introducen algo de ruido (ΔN) el cual se suma a la salida del dispositivo:

$$N_o = GkT_i B + \Delta N$$

Para un elemento con ($\Delta N=0$ y entonces $NF=1$) representaría un caso ideal. Cualquier valor para la figura de ruido mayor que uno ($NF>1$) significa que tenemos un dispositivo ruidoso.

$$NF = \frac{GkT_i B + \Delta N}{GkT_i B} = 1 + \frac{\Delta N}{GkT_i B}$$

2.5.3. Temperatura de ruido

Otra manera de expresar los efectos del ruido de un dispositivo es a través del uso de una temperatura equivalente (T_e ⁵⁸). Por lo que el valor de ΔN estaría dado por la siguiente expresión:

$$\Delta N = GkT_e B$$

De esta forma la expresión para la figura de ruido (NF) quedaría como:

$$NF = 1 + \frac{GkT_e B}{GkT_i B} = 1 + \frac{T_e}{T_i}$$

$$T_e = T_i(NF - 1)$$

⁵⁶ Las fuentes de ruido reales no siempre tienen la característica del modelo de ruido de blanco, pero este es una buena aproximación para el ancho de banda limitado que se manejan en los sistemas de comunicación por satélite.

⁵⁷ NF de Noise Figure

⁵⁸ Esta temperatura de ruido equivalente es la temperatura a la que debería de estar una resistencia para generar la misma potencia de ruido a la salida de un dispositivo ideal como el producido a la salida del dispositivo real que tuviera conectado a la entrada una resistencia a una temperatura de cero absoluto, es decir, una resistencia sin ruido.

Las expresiones para la figura de ruido (NF) y la temperatura (T_e) para el caso de un atenuador resistivo con factor de pérdidas (L) son:

$$T_e = T_i(L - 1) \rightarrow NF = L$$

2.5.4. Figura de ruido y temperatura de ruido para etapas en cascada

En general un receptor se encuentra conformado por un gran número de dispositivos conectados en serie, por lo cual es importante determinar los efectos totales del ruido para este arreglo en cascada. Considerando las tres etapas con ganancias individuales⁵⁹ dadas por $\{G_1, G_2 \text{ y } G_3\}$ y con temperaturas $\{T_1, T_2 \text{ y } T_3\}$ como se muestra en la figura 2.20a.

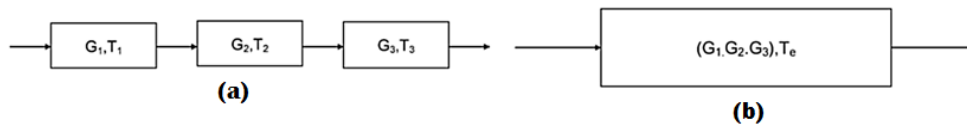


Fig. 2.20 Arreglo (a) en cascada de tres etapas (b) equivalente con una temperatura de ruido

En el caso del arreglo en cascada, la potencia de ruido total a la salida puede ser calculado como:

$$(N)_T = G_3 k T_3 B + G_3 G_2 k T_2 B + G_3 G_2 G_1 k T_1 B \rightarrow (N)_T = G_3 G_2 G_1 k B \left(T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_2 G_1} \right) \dots (A)$$

Si ahora sustituimos el arreglo en cascada de tres etapas por un elemento que presente una temperatura (T_e) y además presente una ganancia dada por $(G_1 G_2 G_3)$ como se muestra en la figura 2.20b.

Entonces la potencia total de ruido a la salida de este elemento equivalente viene dada por la expresión:

$$(N)_T = G_3 G_2 G_1 k T_e B \dots (B)$$

Igualando las expresiones (A) y (B) encontramos el valor de (T_e) en función de las características del arreglo en cascada de tres etapas.

$$T_e = T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_2 G_1}$$

A partir de este resultado se generaliza la expresión para la temperatura de ruido equivalente (T_e) en el caso de un arreglo en cascada de “n” etapas como sigue:

$$T_e = T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_2 G_1} + \dots + \frac{T_n}{G_{n-1} \dots G_2 G_1 G_1} \quad T_e = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} + \frac{NF_3 - 1}{G_2 G_1} + \dots + \frac{NF_n - 1}{G_{n-1} \dots G_2 G_1 G_1}$$

Haciendo un análisis de las expresiones obtenidas anteriormente, se concluye que el desempeño del ruido en todo el sistema se encuentra concentrado principalmente en la primera etapa (por lo que es muy importante asegurar el menor nivel como sea posible).

2.5.5. Temperatura de ruido de la antena

Es una medida del ruido (tanto natural como artificial) que entra al receptor a través de la antena⁶⁰ en modo de recepción, como consecuencia de sus características directivas en el patrón de radiación.

⁵⁹ Los valores de ganancia para las expresiones siguientes no se encuentran expresadas en unidades de decibeles, sino en escalas lineales.

⁶⁰ El ruido de esas fuentes puede entrar al receptor por todos los lóbulos del patrón de radiación de la antena receptora

El desempeño del ruido en una antena es expresado en términos de una temperatura representada como T_A [K]⁶¹.

Existen dos escenarios en donde se realiza la medición de la temperatura (T_A), el primero es medido en el satélite (enlace ascendente) y el otro se realiza en la estación terrena (lazo descendente).

En el caso de la antena del satélite las principales fuente de ruido que son captadas son las correspondientes a la Tierra (Fig. 2.21) (depende de la posición orbital y anchura del haz) y del espacio exterior. [5].

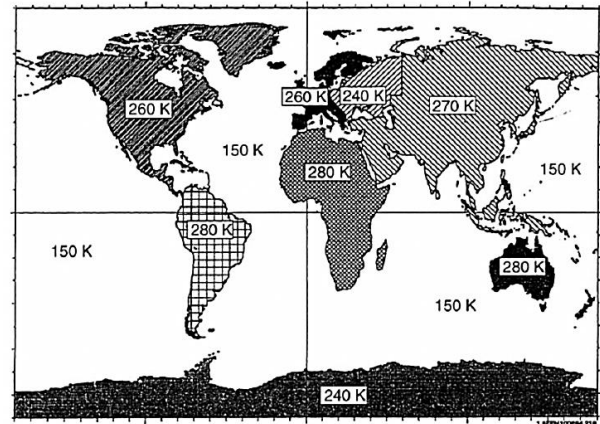


Fig. 2.21 Modelo de temperatura de brillo de la Tierra en la banda Ku

En el caso de la antena en la estación terrena, las contribuciones de ruido a la temperatura de (T_A) abarcan la de cielo (haz principal) y la radiación de la Tierra (lóbulos secundarios).

Existen dos escenarios (Fig. 2.22) a considerar, el primero está libre de cualquier formación meteorológica (nubes, lluvia, niebla, etc.) y el otro considera la presencia de estos fenómenos.

Por tanto, en función de cual situación se presente en nuestro enlace de comunicaciones dependerá que fuentes de ruido sean consideradas en los cálculos de la temperatura (T_A) de la antena.

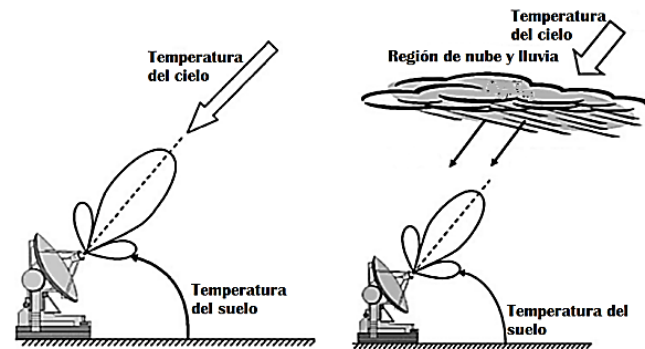


Fig. 2.22 Temperatura de ruido en la antena de la estación

2.5.6. Factor de mérito o figura de mérito

Para evaluar el desempeño del elemento receptor utilizamos el parámetro conocido como factor o figura de mérito denotado como (G/T), el cual se define como la razón de la ganancia de la antena entre la temperatura de ruido del sistema.

$$\left(\frac{G}{T}\right) = \frac{\text{Ganancia de la antena receptora}}{\text{Temperatura de ruido del sistema receptor}}$$

$$\left(\frac{G}{T}\right) \left[\frac{\text{dB}}{\text{K}} \right] = [G_r]_{\text{dBi}} - 10 \log_{10}([T_s]_{\text{K}}) \rightarrow \begin{cases} G_r : \text{Ganancia de la antena receptora en [dBi]} \\ T_s : \text{Temperatura de ruido del sistema receptor [K]} \end{cases}$$

La relación (G/T) tanto para el caso de la antena en la estación terrena como del satélite es un indicador de la sensibilidad en el enlace ascendente y descendente respectivamente. Una de las características de esta relación, es la independencia del punto donde se realice su medición en el equipo receptor, pero es importante que los niveles de ganancia y temperatura de ruido sean calculados en la misma posición.

⁶¹ Dicha temperatura de ruido de la antena representa la potencia de este fenómeno a la salida de este elemento que es igual a la potencia de ruido térmico generado por una resistencia a una temperatura T_A [K].

CAPÍTULO 3

3.1. Fundamentos del diseño

Existen muchos parámetros que afectan el diseño de un sistema de comunicaciones por satélite, los cuales pueden ser enumerados de acuerdo al segmento en donde son de importancia primaria. Los relacionados con la estación terrena son: la ubicación geográfica (que permite estimar ángulos de elevación y azimut, las pérdidas de propagación y atmosféricas, etc.), la ganancia de transmisión y recepción, la potencia empleada, la temperatura de ruido y características de los diferentes módulos (del modulador o demodulador, de los filtros, del amplificador de potencia y de bajo ruido).

En el caso del satélite estos son: el tipo de órbita que determinará la zona de cobertura a ofrecer, así como ángulos de azimut y elevación hacia la estación terrena, la ganancia de transmisión y recepción, la potencia necesaria, así como los niveles de ruido presentes. Y en el caso del canal de transmisión tendremos: el contenido total de electrones y la frecuencia de operación que establecen las pérdidas de trayectoria y que determina el margen del enlace.

El modelo básico consta de dos trayectorias independientes (Fig. 3.1). El diseño del enlace ascendente presenta una serie de ventajas que facilitan la optimización en su rendimiento, debido a que no existen limitaciones de energía a diferencia del satélite para el caso descendente.

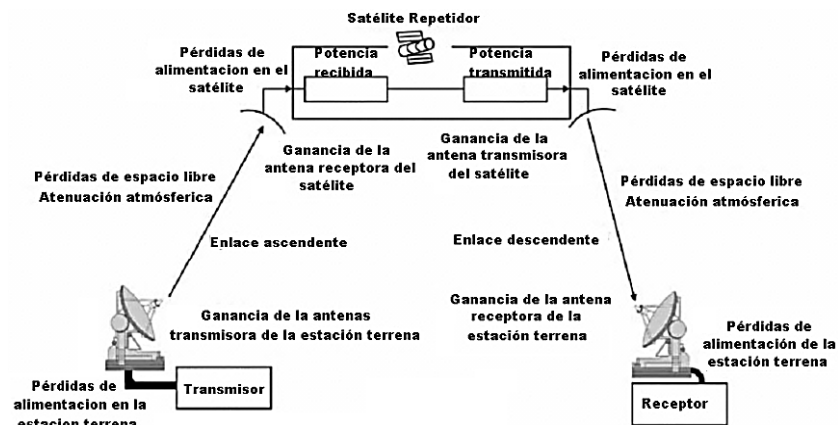


Fig. 3.1 Presupuesto de enlace en un sistema de comunicaciones por satélite

El presupuesto de potencia o cálculo de enlaces es una forma de analizar y predecir el rendimiento del sistema a partir de un conjunto de parámetros vitales que generan una ganancia o pérdida en la señal. El valor final obtenido nos permite conocer la intensidad de la señal disponible en el receptor y saber que tan fuerte es comparada con un valor mínimo aceptable conocido como umbral⁶².

3.2. Rendimiento de un sistema de comunicaciones por satélite

El cociente entre la potencia promedio de la señal portadora (C) y del ruido (N) en el mismo ancho de banda (B_N) define la relación (C/N). Este es uno de los principales datos de interés para definir el rendimiento individual o global en un enlace o sistema, puede ser definido en cualquier punto.

⁶² La diferencia entre el valor actual calculado y el umbral es a lo que se le conoce como margen del enlace. Un valor grande de margen del enlace es equivalente a una mejor calidad del enlace de microondas.

Típicamente se requieren valores de (C/N) entre 6 a 10 [dB], sin embargo, cuando se emplea alguna codificación o esquemas de espectro disperso los niveles para dicha relación pueden ser menores e incluso negativos y aun así mantener niveles aceptables de operación. El rendimiento se puede degradar de dos maneras, el primero es a través de una reducción en la potencia de la señal portadora (C) o con el incremento de los efectos del ruido (N).

La relación portadora a densidad espectral de potencia del ruido (C/N_0) es otra variable utilizada para definir la calidad del sistema, y se encuentra vinculada con (C/N) a través del ancho banda empleado por la información transmitida.

$$\left(\frac{C}{N}\right)[1] = \left(\frac{C}{N_0}\right)\left(\frac{1}{B_N}\right) \Leftrightarrow \left(\frac{C}{N_0}\right)\left[\frac{W}{\text{Hz}}\right] = \left(\frac{C}{N}\right)(B_N)$$

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{dB}} = \left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{dBHz}} - 10\log_{10}(B_N) \Leftrightarrow \left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{dBHz}} = \left(\frac{C}{N}\right)_{\text{dB}} + 10\log_{10}(B_N)$$

El cociente (C/N_0) se comporta de manera similar a (C/N) en términos del accionar del medio.

Para el caso de comunicaciones digitales, la energía de bit (E_b) es más útil que la potencia de la señal portadora (C) y su relación es la siguiente.

$$E_b = CT_b$$

Donde T_b representa el tiempo de duración de un bit en segundos.

La razón (E_b/N_0) es el parámetro más utilizado para describir el rendimiento la comunicación digital, la relación entre dicha variable y (C/N_0) es.

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = T_b \left(\frac{C}{N_0}\right) = \left(\frac{1}{R_b}\right)\left(\frac{C}{N_0}\right)$$

Donde R_b es la tasa de transmisión de bits por segundo [bps].

Dicha expresión permite comparar la calidad de la conexión tanto para técnicas de modulación digital como analógicas y a varias tasas de transferencia de información para el mismo modelo. Nótese también que:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = \left(\frac{1}{R_b}\right)\left(\frac{C}{N_0}\right) = \left(\frac{1}{R_b}\right)\left(\frac{C}{N}\right)(B_N) \rightarrow \left(\frac{E_b}{N_0}\right) = \left(\frac{B_N}{R_b}\right)\left(\frac{C}{N}\right)$$

Es decir, el valor de (E_b/N_0) puede ser numéricamente igual (C/N) cuando la tasa de transmisión R_b es igual al ancho de banda del ruido (B_N) ocupado por la señal.

Las tres relaciones anteriores pueden ser consideradas indistintamente cuando se evalúa la viabilidad de algún enlace de comunicación en términos del rendimiento del sistema.

3.3. Relación portadora a densidad espectral de potencia del ruido ascendente

La potencia recibida en las terminales de entrada del receptor en el satélite está dada por la siguiente expresión [3]:

$$P_{Rx} [W] = \left[\frac{P_{Tx} (G_{Tx})_{máx}}{L_{FTx} L_T} \right] \left[\frac{1}{L_{FSL} L_A} \right] \left[\frac{(G_{Rx})_{máx}}{L_{FRx} L_R L_{POL}} \right]$$

Cada uno de los términos involucrados en la ecuación anterior representa lo siguiente:

- $P_{Tx}, (G_{Tx})_{máx}, L_{FTx}, L_T, L_{FSL}, L_A$ potencia, ganancia, pérdidas de alimentación, por desalineación en el transmisor de la estación terrena, atenuación de propagación por espacio libre y atmosféricas (lluvia, gases atmosféricos, niebla, hielo, nubes entre otros).
- $(G_{Rx})_{máx}, L_{FRx}, L_R, L_{POL}$ ganancia, pérdidas de alimentación, desalineación y por despolarización en el receptor del satélite.

En este caso el nivel de intensidad de la señal a la entrada del receptor en el satélite corresponde con la potencia de la portadora, es decir:

$$C = P_{Rx}$$

Los efectos de ruido en el mismo punto vienen dados por: $N_0 = kT$

En donde (k^{63}) representa la constante de Boltzmann y T es la temperatura de ruido del sistema (Fig. 3.2):

$$T[K] = \frac{T_A}{L_{FRx}} + T_F \left[1 - \frac{1}{L_{FRx}} \right] + T_{eRx}$$

Algunos de los parámetros nuevos incluidos en la ecuación anterior representan:

- T_A, T_F, T_{eRx} temperatura de ruido de la antena, termodinámica del alimentador y del equipo receptor en el satélite.

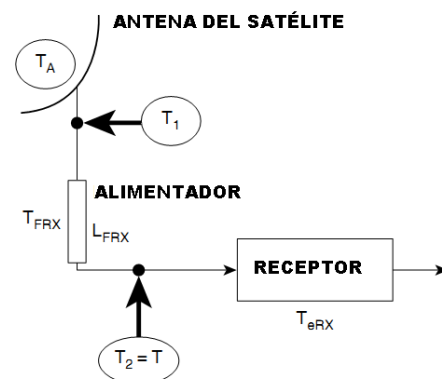


Fig. 3.2 Temperatura de ruido a la entrada del receptor en el satélite

Por tanto, la relación entre la potencia de la portadora (C) a la densidad espectral (N_0) para el enlace ascendentes está dada por la expresión [3]:

⁶³ En unidades lineales $k=1.379 \times 10^{-23} [J/K]$ y expresada en decibels $k=-228.6 [dB/K]$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_U [\text{Hz}] = \frac{P_{Rx}}{kT} = \frac{\left[\frac{P_{Tx} (G_{Tx})_{\text{máx}}}{L_{FTx} L_T} \right] \left[\frac{1}{L_{FSL} L_A} \right] \left[\frac{(G_{Rx})_{\text{máx}}}{L_{FRx} L_R L_{POL}} \right]}{k \left[\frac{T_A}{L_{FRx}} + \left[1 - \frac{1}{L_{FRx}} \right] T_F + T_{eRx} \right]}$$

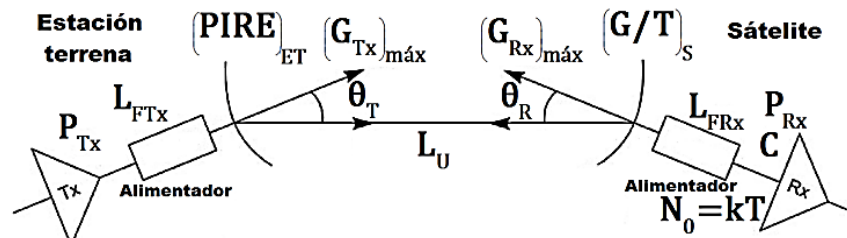


Fig. 3.3 Parámetros del enlace ascendente

Dicha ecuación puede ser interpretada como sigue:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_U = \{ \text{PIRE de la estación Tx} \} \left\{ \frac{1}{\text{Pérdidas de trayectoria}} \right\} \left\{ \frac{\text{Ganancia neta de recepción}}{\text{Temperatura de ruido de la antena del satélite}} \right\} \left\{ \frac{1}{k} \right\}$$

En conclusión la ecuación para la relación $(C/N_0)_U$ en su equivalente simplificado es:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_U [\text{Hz}] = \{ \text{PIRE}_{ET} \} \left\{ \frac{1}{L} \right\}_U \left\{ \frac{G}{T} \right\}_S \left\{ \frac{1}{k} \right\}$$

La relación $(C/N_0)_U$ introduce tres factores:

- La potencia isotrópica radiada efectiva (PIRE) que caracteriza al equipo transmisor en la estación terrena.
- El factor $(1/L)$ que caracteriza al medio de transmisión en el enlace ascendente.
- La relación entre la ganancia neta de recepción y la temperatura de ruido del sistema (G/T) que caracteriza al equipo en el satélite.

3.4. Relación portadora a densidad espectral de potencia del ruido descendente

La relación $(C/N_0)_D$ correspondiente a la conexión descendente se encuentra siguiendo el mismo procedimiento del caso ascendente.

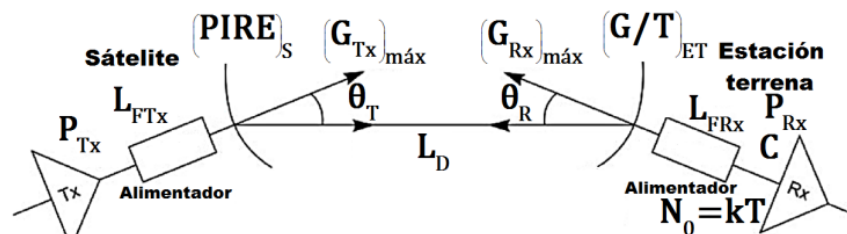


Fig. 3.4 Parámetros del enlace descendente

La forma final de la ecuación para $(C/N_0)_D$ es similar a la de $(C/N_0)_U$ solamente cambian las consideraciones de frecuencia de operación y los cálculos que se realizan en el transmisor del satélite y la estación terrena receptora para los parámetros PIRE y (G/T) [3].

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_D [\text{Hz}] = \{\text{PIRE}_s\} \left\{\frac{1}{L}\right\}_D \left\{\frac{G}{T}\right\}_{ET} \left\{\frac{1}{k}\right\}$$

Para determinar el valor del PIRE en el satélite se emplea la siguiente expresión:

$$\text{PIRE}_s = \frac{P_{Tx} (G_{Tx})_{\text{máx}}}{L_{FTx} L_T}$$

Los términos involucrados en la ecuación representan lo siguiente:

- P_{Tx} , $(G_{Tx})_{\text{máx}}$, L_{FTx} , L_T potencia, ganancia, pérdidas de alimentación y desalineación en el transmisor del satélite.

Para calcular la figura de mérito de la estación terrena receptora $(G/T)_{ET}$ empleamos:

$$\left\{\frac{G}{T}\right\}_{ET} = \left[\frac{(G_{Rx})_{\text{máx}}}{L_{FRx} L_R L_{POL}} \right] \left[\frac{1}{T_D} \right]$$

En donde:

- $(G_{Rx})_{\text{máx}}$, L_{FRx} , L_R , L_{POL} representa la ganancia, las pérdidas de alimentación, desalineación y despolarización que ocurren en el equipo receptor de la estación terrena.
- T_D es la temperatura de ruido descendente del sistema.

3.5. Relación portadora a densidad espectral de potencia del ruido de intermodulación

La intermodulación ocurre cuando múltiples portadoras pasan a través de cualquier dispositivo con características no lineales (amplitud y fase). En nuestro caso esto ocurre en el amplificador de alta potencia (HPA⁶⁴) a bordo del satélite (pudiendo ser un TWTA⁶⁵ o SSPA⁶⁶).

Los productos de intermodulación de tercer orden (Fig. 3.5) caen sobre las frecuencias portadoras vecinas, con lo cual se genera una interferencia. La curva de transferencia de la amplificación de potencia ya sea para un TWTA o SSPA se muestra en la Fig. 3.6.

La relación portadora a densidad espectral de potencia del ruido de intermodulación $(C/N_0)_{IM}$ ⁶⁷ es usualmente cuantificada de manera experimental o en algunos casos puede ser determinada mediante el empleo de métodos computacionales. Una vez que dicha razón es conocida, debe ser considerada dentro de los cálculos de enlace.

⁶⁴ HPA por sus siglas en inglés **H**igh **P**ower **A**mplifier

⁶⁵ Por sus siglas en inglés **T**raveling **W**ave **T**ube **A**mplifiers

⁶⁶ SSPA por sus siglas en inglés **S**olid **S**tate **P**ower **A**mplifier

⁶⁷ El subíndice IM proviene del inglés **I**nter**M**odulation (Intermodulación)

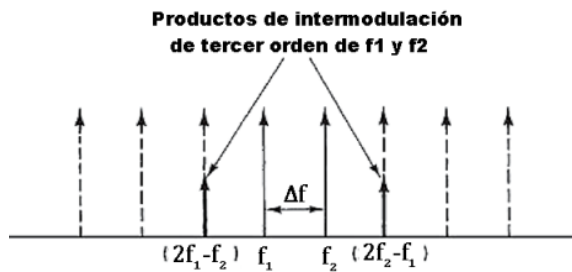


Fig. 3.5 Productos de intermodulación

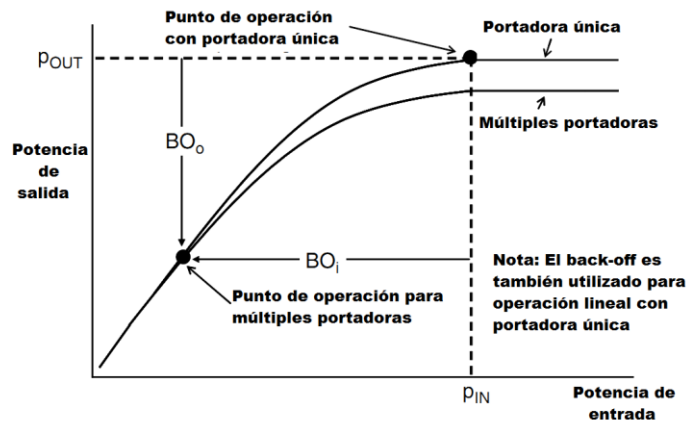


Fig. 3.6 Característica de transferencia de un amplificador TWTA o SSPA

Cuando un número de portadoras se presenta de manera simultánea en un TWTA o SSPA, el punto de operación debe ser regresado a la porción lineal de la característica de transferencia para reducir los efectos de distorsión por intermodulación. Fenómenos presentes en esquemas de acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA)⁶⁸.

El back-off (BO) es un término que es tomado en cuenta en los cálculos dado que nos asegura operar en una región libre de distorsión por intermodulación. La variación del (BO) y $(C/N_0)_{IM}$ se muestra en la figura 3.7 en función del número de portadoras.

El comportamiento de las relaciones involucradas para el cálculo del rendimiento total $(C/N_0)_T$ se muestra a continuación (Fig. 3.8), en dichas curvas se desprecian los efectos del término $(C/N_0)_I$ correspondientes a efectos de interferencia.

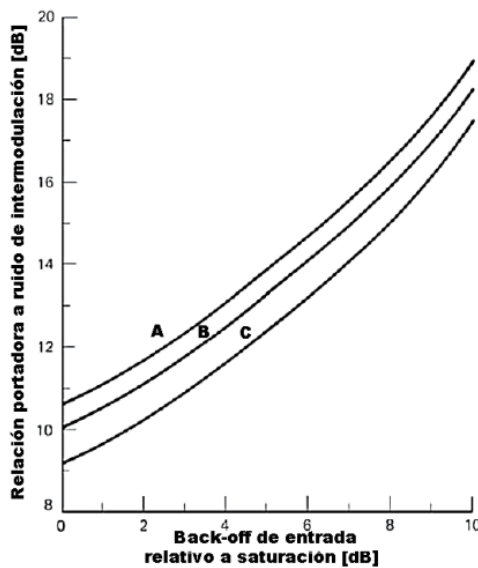


Fig. 3.7 Curvas de intermodulación típicas de un TWTA vs cantidad de portadoras (A) 6 (B) 12 (C) 500

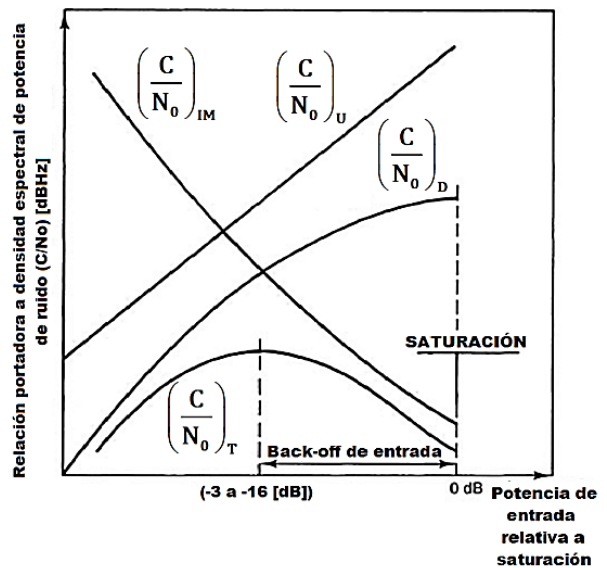


Fig. 3.8 Variación de (C/N_0) del enlace ascendente, descendente, de intermodulación y total vs del back-off de entrada

⁶⁸ FDMA por sus siglas en inglés Frequency Division Multiple Access

Debido a la variación opuesta del término $(C/N_0)_{IM}$ comparado con las relaciones $(C/N_0)_U$ y $(C/N_0)_D$, el valor de $(C/N_0)_T$ pasa a través de un máximo para un nivel de back-off de entrada distinto de cero.

3.6. Relación portadora a densidad de ruido entre satélites adyacentes

Los enlaces entre satélites ISL⁶⁹ (ópticos o de radiofrecuencia) son empleados para interconectar estaciones terrenas cuya ubicación geográfica no cae dentro de la misma zona de cobertura de un satélite (Fig. 3.9).

Los ISL más útiles en operación son [3]:

- LEO↔LEO
- GEO↔GEO
- LEO↔GEO

Las antenas para los ISL son direccionales y el ancho del haz en su patrón de radiación es lo suficientemente ancho para permitir adquirir una señal de rastro que ayude a mantener la alineación en el enlace durante la transmisión de información.

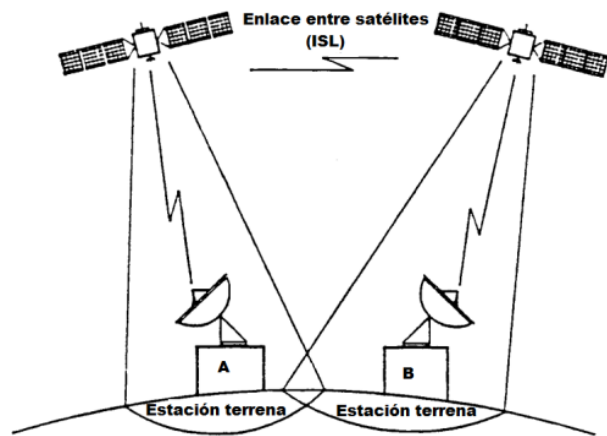


Fig. 3.9 Interconexión de redes a través de un enlace entre satélites (ISL)

La siguiente tabla muestra las frecuencias permitidas para los ISL, las cuales corresponden con aquellas que sufren fuerte absorción en la atmósfera y han sido elegidas para ofrecer protección contra interferencia de enlaces entre satélites y sistemas terrestres.

Sin embargo, estas bandas también son compartidas con otros servicios espaciales y el nivel de interferencia que se genere limita los valores de algunos parámetros elegidos para la comunicación.

Tabla 3.1 Banda de frecuencias para enlaces entre satélites (ISL) [3]

Servicio entre satélites	Banda de frecuencias
Radiofrecuencia RF	22.55-23.55 [GHz]
	24.45-24.75 [GHz]
	32-33 [GHz]
	54.25-58.2 [GHz]
	59-64 [GHz]
	65-71 [GHz]
	116-134 [GHz]
	170-182 [GHz]
185-190 [GHz]	
Óptico	0.8-0.9 [μm] (Diodo láser AlGaAs)
	1.06 [μm] (Diodo láser Nd:YAG)
	0.532 [μm] (Diodo láser Nd:YAG)
	10.6 [μm] (Láser CO ₂)

⁶⁹ ISL por sus siglas en inglés Inter-Satellite Links (Enlaces entre satélites)

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de enlace son similares a las presentadas anteriormente, en el caso de las pérdidas se reducen a las de propagación por espacio libre ya que las señales no pasan a través de la atmósfera.

3.7. Relación portadora a densidad espectral de potencia del ruido total

La expresión total $(C/N_0)_T$ cuando no se consideran los efectos de interferencias e intermodulación, viene dada por la siguiente expresión:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_T^{-1} \left[\frac{1}{\text{Hz}} \right] = \left(\frac{C}{N_0}\right)_U^{-1} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_D^{-1}$$

El efecto de interferencia es similar a un incremento del ruido térmico sobre el enlace afectado, una expresión para la relación $(C/N_0)_I^{70}$ puede ser deducida tanto para el enlace ascendente como el descendente.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_U^{-1} \left[\frac{1}{\text{Hz}} \right] = \left[\left(\frac{C}{N_0}\right)_U^{-1} \right]_{\text{sin interferencia}} + \left[\left(\frac{C}{N_0}\right)_U^{-1} \right]_I \quad \left(\frac{C}{N_0}\right)_D^{-1} \left[\frac{1}{\text{Hz}} \right] = \left[\left(\frac{C}{N_0}\right)_D^{-1} \right]_{\text{sin interferencia}} + \left[\left(\frac{C}{N_0}\right)_D^{-1} \right]_I$$

Con lo cual la expresión total se convierte en:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_T^{-1} [\text{Hz}^{-1}] = \left(\frac{C}{N_0}\right)_U^{-1} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_D^{-1} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_I^{-1}$$

En donde:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_I^{-1} [\text{Hz}^{-1}] = \left[\left(\frac{C}{N_0}\right)_U^{-1} \right]_I + \left[\left(\frac{C}{N_0}\right)_D^{-1} \right]_I$$

Por último necesitamos una ecuación que nos permita evaluar el desempeño total considerando interferencia e intermodulación, está adquiere de la siguiente forma.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_T^{-1} [\text{Hz}^{-1}] = \left(\frac{C}{N_0}\right)_U^{-1} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_D^{-1} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_I^{-1} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{IM}}^{-1}$$

En donde:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{IM}}^{-1} [\text{Hz}^{-1}] = \left[\left(\frac{C}{N_0}\right)_U^{-1} \right]_{\text{IM}} + \left[\left(\frac{C}{N_0}\right)_D^{-1} \right]_{\text{IM}}$$

⁷⁰ El subíndice I hace referencia a Interference, es decir, la relación portadora a densidad de ruido considerando los efectos de interferencia sobre el sistema.

CAPÍTULO 4

4.1. Introducción a STK

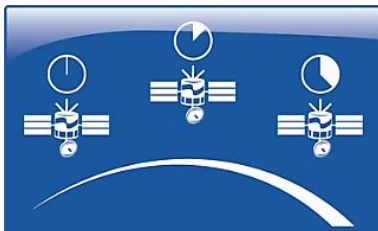
Satellite Tool Kit⁷¹ conocido por sus iniciales STK, es el software de Analytical Graphics, Inc. (AGI) que permite el análisis y diseño de simulaciones complejas y dinámicas de problemas reales en satélites artificiales. Al principio se utilizaba en la comunidad aeroespacial para solucionar problemas sobre estos elementos que orbitaban alrededor de la Tierra, ahora se usa también para cuestiones de defensa y por distintas universidades.



Fig. 4.1 Software Satellite Tool Kit versión 9.2.4

STK es un software comercial empleado para analizar en un entorno gráfico todos los parámetros de una misión espacial. Algunas de las funciones principales del programa son:

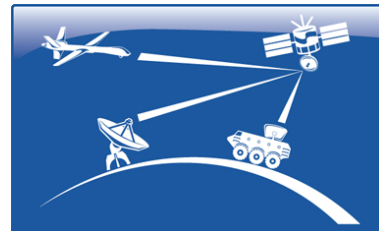
El usuario puede modelar la orientación y posición de manera dinámica (con respecto al tiempo), de diversos vehículos a través de varios algoritmos de propagación o de archivos externos programados.



Esas relaciones pueden ser llevadas a cabo por medio de enlaces entre los distintos elementos o sobre una región de interés.



A partir de estas variaciones (posición y orientación), se puede modelar las características de apuntamiento de un sensor, de las comunicaciones y cualquier otra carga útil.



Se puede determinar la calidad de esos enlaces bajo un amplio número de condiciones limitantes (atmosféricas o ángulos de visibilidad entre otros).



⁷¹ Con el lanzamiento de la versión 10 de STK cambio de nombre a Systems Tool Kit

El programa requiere de una licencia, para el desarrollo de la presente tesis se utilizó una de tipo educativa. La cual nos da acceso a un mayor número de características que el programa nos ofrecería en su versión de prueba gratuita.

Las más relevantes son: el contar con la representación 3D (además de en 2D), un periodo de prueba de algunos meses a comparación de la versión gratuita (una semana). Pero quizá la más importante es que nos permite contar con el módulo de comunicaciones, es decir, tenemos la posibilidad de acceder a los elementos tales como: transmisores, receptores y antenas. Necesarios para realizar todas las simulaciones y llevar a cabo el análisis y diseño en este campo.

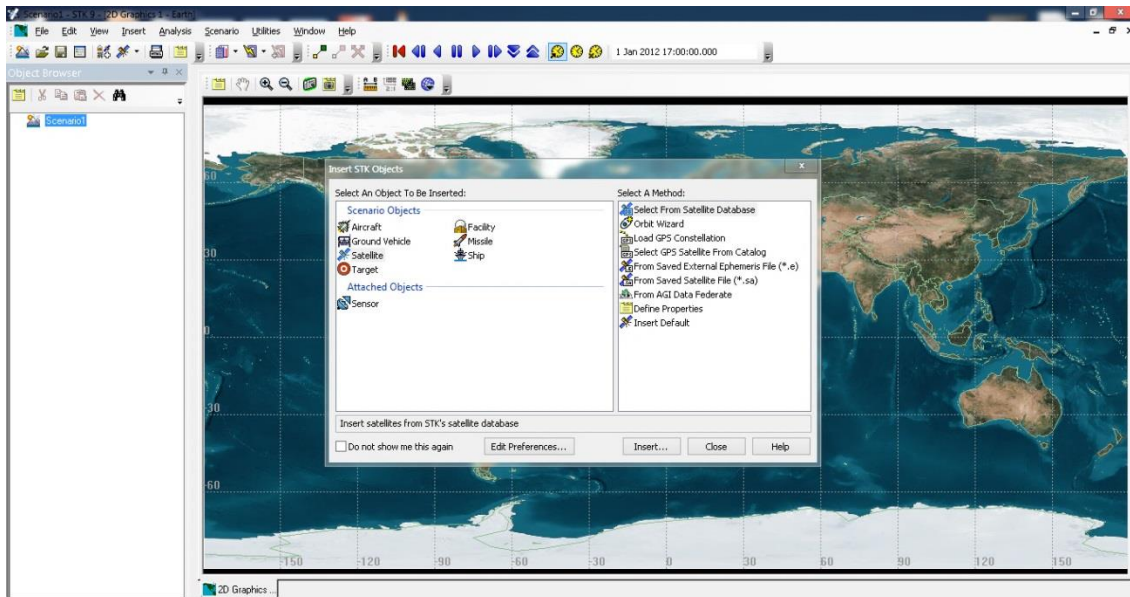


Fig. 4.2 Características del programa STK en la versión gratuita sin licencia educativa

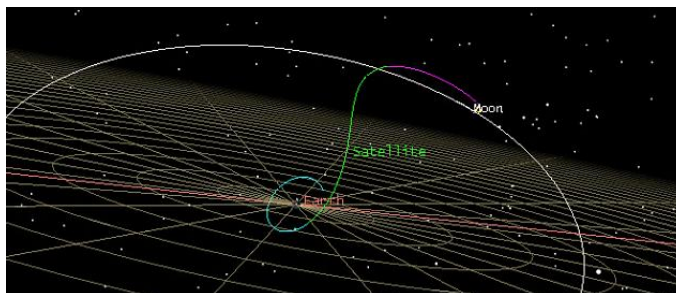
STK se encuentra conformado por una serie de módulos especializados en distintas áreas de interés, dentro de los principales tenemos:

- **STK-Aircraft Mission Modeler.** Es un módulo que ofrece la capacidad para el modelado de misiones de aeronaves.

Además, las rutas de estos elementos son configuradas a través de una secuencia de curvas parametrizadas. Se pueden seleccionar distintos tipos preinstaladas o definidos por el usuario. En base a las características específicas de este objeto, esta herramienta permite elaborar las trayectorias basados en esquemas deterministas específicos para cada estructura particular.

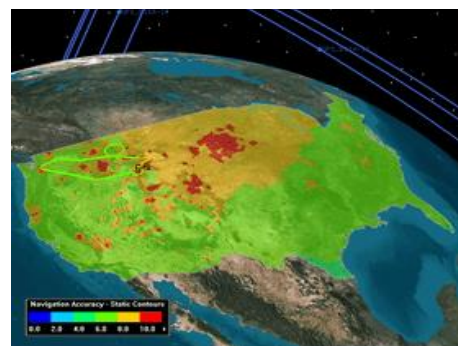


- **STK-Astrogator.** Utilizado para el diseño de las trayectorias de los vehículos espaciales y maniobras en órbita de manera interactiva. Astrogator es el nombre de uno de los propagadores disponibles para emplearlo sobre un satélite. Ofrece una gran flexibilidad en cuanto al uso de modelos de fuerzas, motores y ubicación del satélite; además tenemos la capacidad de resolver y optimizar las soluciones.



- **STK-Coverage.** Este módulo permite analizar la cobertura regional o global debido a uno o más elementos (vehículos, sensores, instalaciones, etc.) teniendo en cuenta todas las restricciones establecidas al acceso.

Se puede definir el área espacial de interés, los elementos (activos), el intervalo de tiempo de análisis y una figura de mérito que medirá la efectividad del sistema.



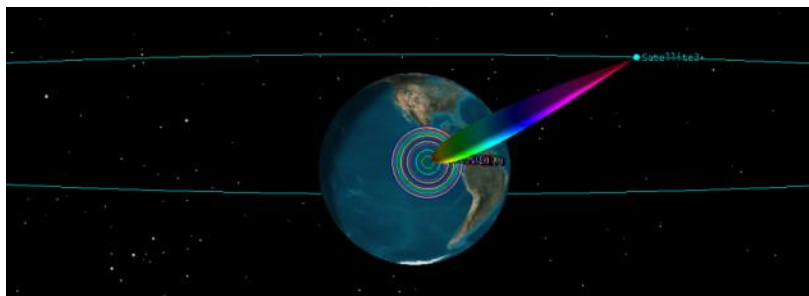
- **STK-Attitude.** Permite el modelado y simulación de la orientación de un objeto, por ejemplo, el de un satélite. La ventaja de tener acceso a los gráficos 3D es la posibilidad de generar una representación clara sobre la disposición del objeto, permitiendo visualizar fácilmente los cambios generados.

La esfera de orientación es una característica que puede ser agregada al elemento y visualizada.



- **STK-Communications.** Con este módulo definiremos y analizaremos detalladamente el aspecto de las comunicaciones entre los distintos objetos incluidos en el escenario. Se cuenta con varios modelos de transmisores, receptores y antenas.

Además tenemos la posibilidad de añadir diversas fuentes atenuantes presentes en la atmósfera (lluvia, absorción atmosférica, niebla, nubes, etc.) y definir restricciones en algunos parámetros clave de nuestro sistema.



A continuación, se describirán algunos conceptos empleados en STK. Un escenario es el elemento básico y de mayor jerarquía donde transcurre la simulación y en donde se almacenan todos los elementos involucrados.

Al ejecutar el programa podremos generar un nuevo escenario de distintas maneras, la primera será seleccionando la opción "Create a New Scenario" en la ventana de bienvenida o desde el menú "File" o haciendo clic sobre el acceso directo o con la combinación de teclas "Ctrl+N".

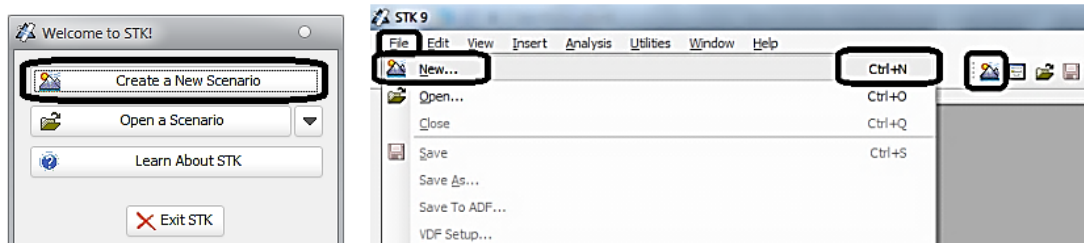


Fig. 4.3 Distintas formas para crear un escenario

Para cada escenario creado habrá que configurar una serie de apartados dentro del cuadro "STK: New Scenario Wizard".

Tendremos que definir un nombre al escenario, una descripción de los objetivos que se pretenden alcanzar, la ruta donde se guardarán los archivos de simulación y un intervalo de tiempo que necesitamos para llevar a cabo la experimentación.

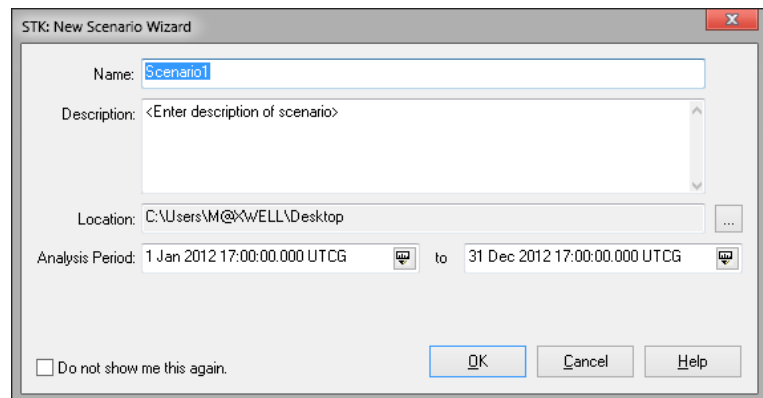


Fig. 4.4 Asistente para configurar un nuevo escenario

Lo siguiente es ingresar los distintos objetos necesarios para llevar a cabo el estudio. Para ello contamos con varias opciones, la principal es a través de la ventana "Insert STK Objects" la cual aparece después de configurar el escenario en el paso anterior.

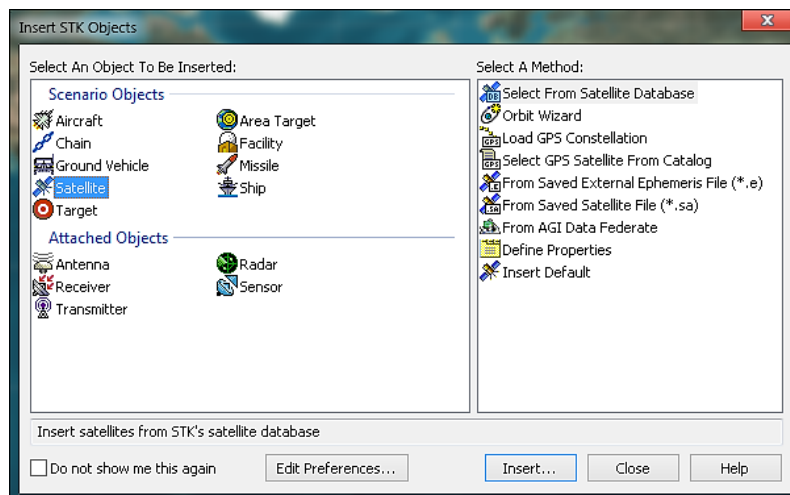


Fig. 4.5 Ventana para insertar objetos dentro del escenario (con licencia educativa)

Los principales objetos que se pueden insertar dentro de un escenario los clasificaremos dentro de dos grupos:

A) Objetos del escenario:

- a. *Aircraft* (Aeronave)
- b. *Facility* (Instalación o Estación terrena)
- c. *Missile* (Misil)
- d. *Ship* (Barco)
- e. *Area Target* (Área objetivo)
- f. *Ground Vehicle* (Vehículo terrestre)
- g. *Satellite* (Satélite)
- h. *Target* (Blanco u objetivo)

B) Objetos adjuntos:

- a. *Antenna* (Antena)
- b. *Receiver* (Receptor)
- c. *Transmitter* (Transmisor)
- d. *Radar* (Radar)
- e. *Sensor* (Sensor)

Además dentro de “*Insert STK Objects*” al seleccionar un elemento debemos definir cual va a ser el método empleado para insertarlo y configurarlo todo esto en la sección “*Select A Method*”.

Por otra parte en dicha ventana se pueden configurar otros aspectos en el apartado “*Edit Preferences*”.

En el cuadro “*Preferences*” podremos agregar otros elementos que no se presentan en la ventana previa o modificar otras características según las necesidades del usuario.

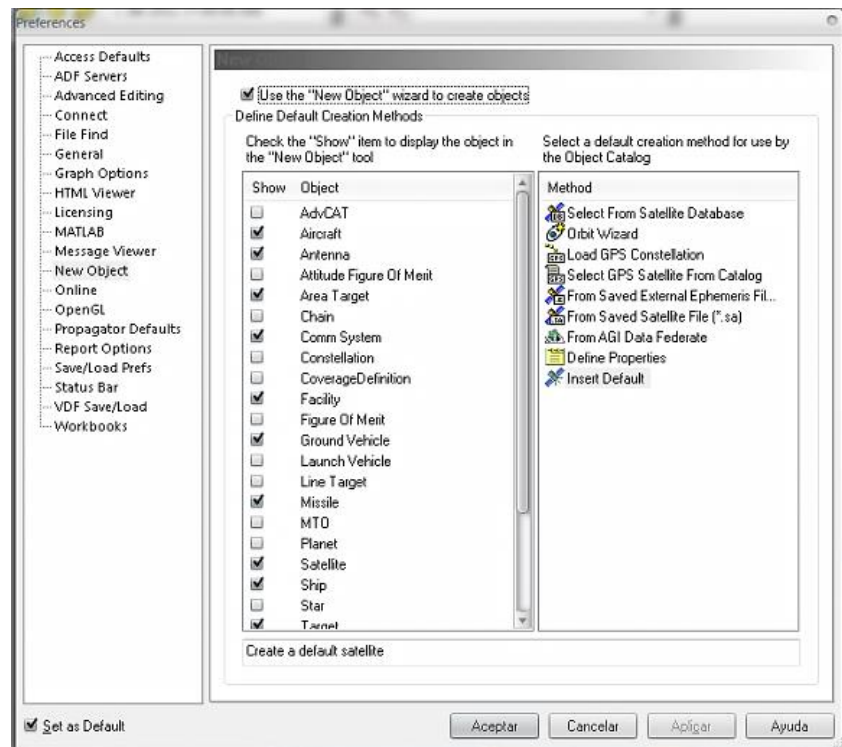


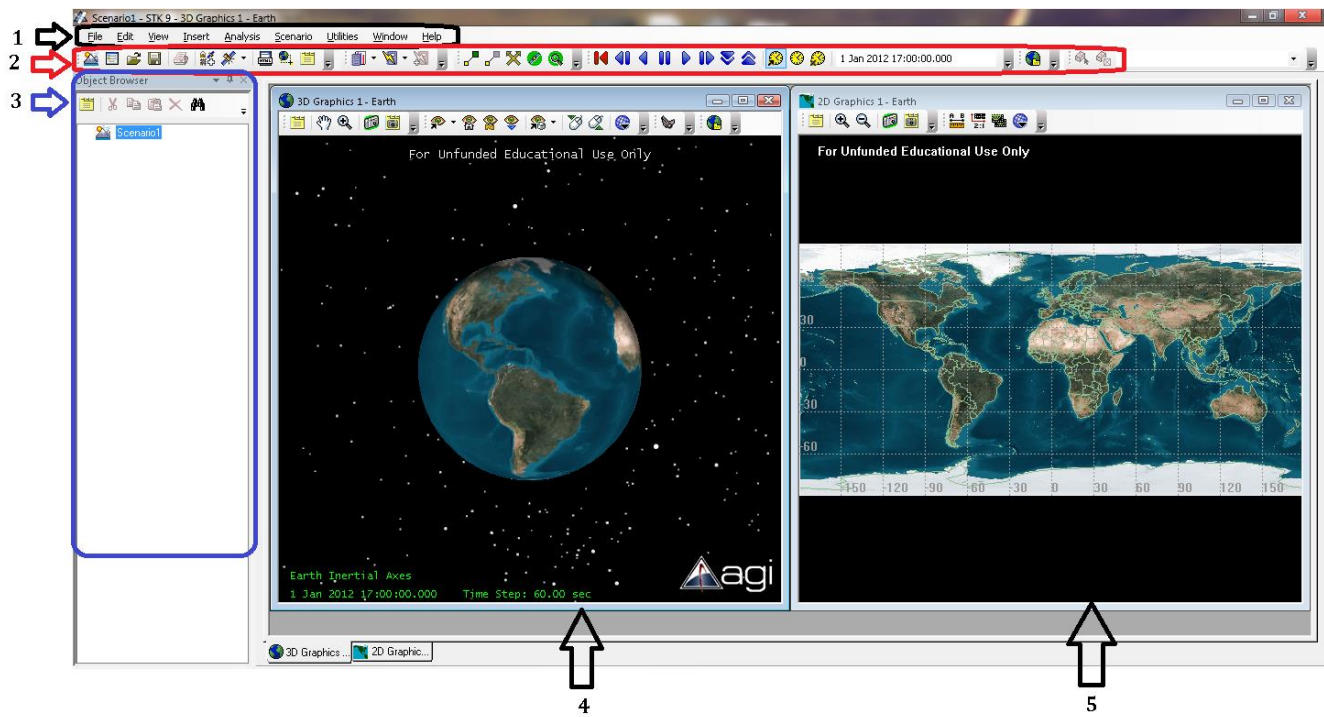
Fig. 4.6 Editor de preferencias en STK

El espacio de trabajo principal se encuentra conformado por dos secciones (explorador de objetos, visualizaciones 2D y 3D), las cuales contiene distintos accesos directos que permiten modificar alguna característica del apartado. Como cualquier otro programa, contamos con una barra de menús y de herramientas.

Para el desarrollo de los siguientes capítulos se hará uso de STK bajo la licencia educativa, generando una serie de proyectos que permitan el análisis y diseño de distintos aspectos involucrados en este medio.

Cada uno de estos diseños estará descrito paso a paso con la intención de que en posteriores trabajos que involucren el uso este programa, sea utilizada la información contenida en esta tesis como una guía para asimilar su uso.

Además podrá ser empleada como material didáctico para asignaturas enfocadas el estudio del campo satelital.



1. Barra de menús 2. Barra de herramientas 3. Explorador de objetos 4. Representación en 3D
 5. Representación en 2D

Fig. 4.7 Espacio de trabajo en STK

4.2. Análisis y diseño de las características de radiación y parámetros de una antena con STK

En este primer proyecto analizaremos los cambios que se generan principalmente en el patrón de radiación al realizar distintas modificaciones en algunos parámetros importantes que definen a una antena según STK. Para ello comenzamos creando un nuevo escenario dentro del cual insertaremos un satélite, una estación terrena, un transmisor, un sensor y un receptor.

Se establece la siguiente configuración del escenario, lo nombramos como **Proyecto_0**, describimos lo que se pretende realizar en dicha simulación, se establece la ruta en la que deseamos guardar los archivos generados y por último el intervalo de tiempo que necesitamos para llevar a cabo el análisis será de 1 día.

Una vez definido el nuevo escenario, lo siguiente es insertar los distintos elementos.

Para ello utilizaremos la ventana “*Insert STK Objects*”. En el caso de la estación terrena, seleccionamos el objeto definido como “*Facility*” y en el método de inserción elegimos la opción “*Select From City Database*”.

Al presionar “*Insert*” se nos abre un cuadro, en donde tendremos tres opciones de búsqueda para ubicar la instalación. Estas posibilidades son: con el nombre de la ciudad “*City Name*” o de la provincia “*Province*” o del país “*Country*”.

En el campo de “*City Name*” ponemos MEXICO⁷² y dando clic en “*Search*” nos generará los distintos lugares que se encuentran definidos en STK dentro de dicha región, escogemos alguna y presionamos “*Insert*”.

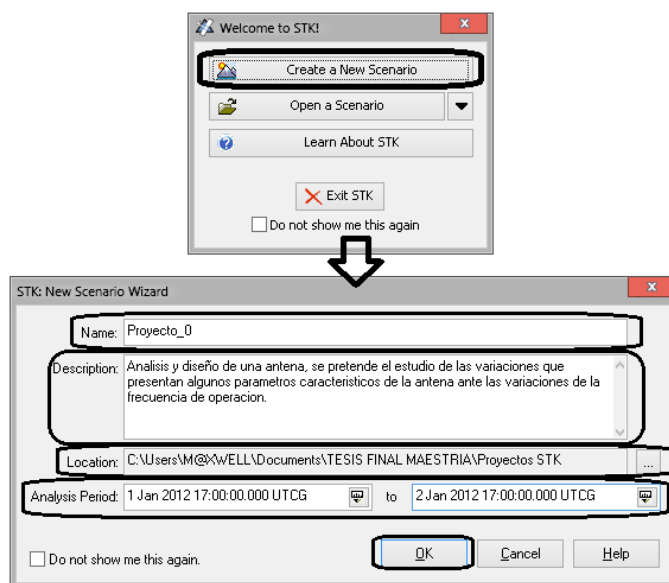


Fig. 4.8 Creación del nuevo escenario para el análisis y diseño de una antena

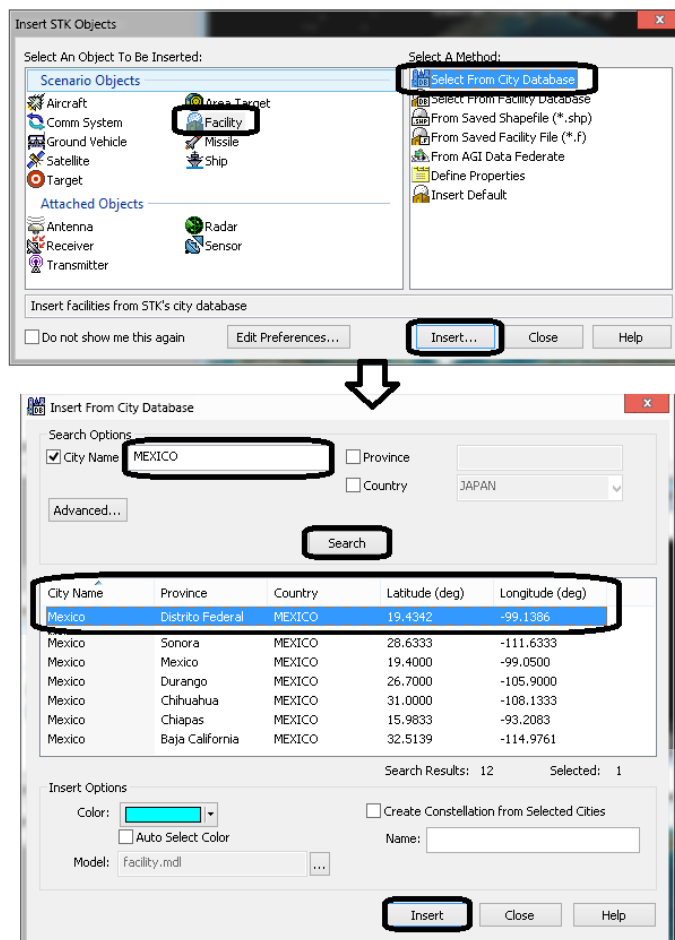


Fig. 4.9 Ubicando una estación terrena en el escenario

⁷² De tener en cuenta que se trabaja en el idioma inglés por lo que no se emplean acentos.

Habiendo hecho lo anterior este elemento ya debe aparecer tanto en el explorador de objetos como en la representación 2D y 3D del escenario.

El siguiente componente en colocar es el receptor para ello elegimos al objeto "Receiver" en la ventana "Insert STK Objects" y en el método de inserción seleccionamos "Insert Default". Al presionar el botón "Insert" se nos abre un cuadro en donde debemos seleccionar al elemento del escenario que tendrá dicho equipo, en este caso elegimos a la estación terrena y damos clic en "Ok".

Ahora introduciremos al satélite, desde "Insert STK Objects" y en el método de inserción seleccionamos la opción "Orbit Wizard".

Se nos abre una ventana después de dar clic en "Insert", en ella estableceremos el tipo de órbita que deseamos; y en función de cual elijamos cambiarán los distintos parámetros que debemos configurar en la sección "Definition".

En este caso seleccionamos el tipo "Geosynchronous", por lo cual debemos definir la ubicación del satélite (113 ° Oeste) y el ángulo de inclinación de dicha órbita respecto al ecuador (0 °).

Por otra parte nos damos cuenta que en el asistente "Orbit Wizard" se encuentra un mapa el cual tiene una escala en grados de las distintas posiciones para ubicar el satélite y que nos sirve de referencia para verificar tanto la ubicación y configuración correcta de la órbita establecida.

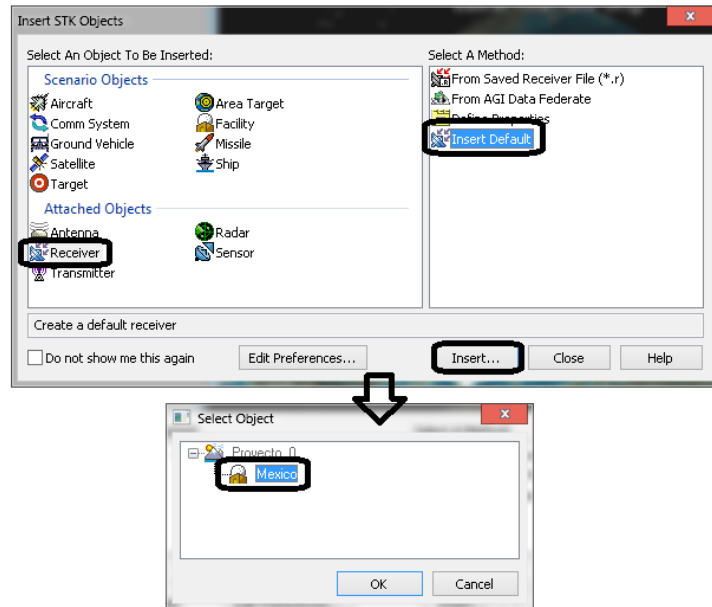


Fig. 4.10 Añadiendo un receptor a la estación terrena

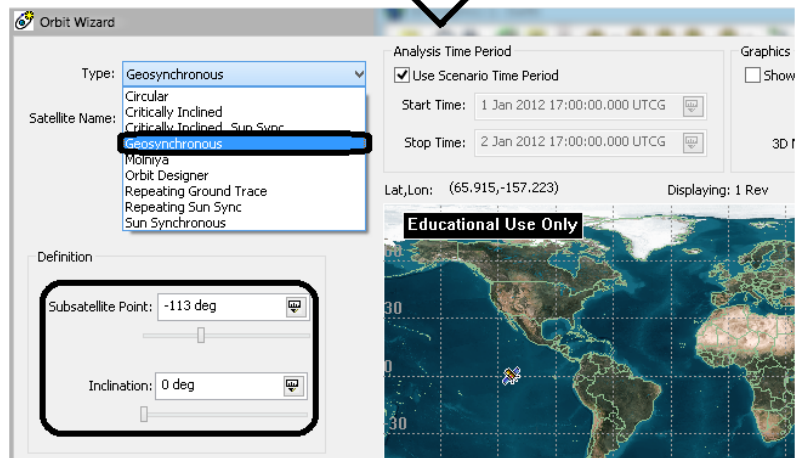
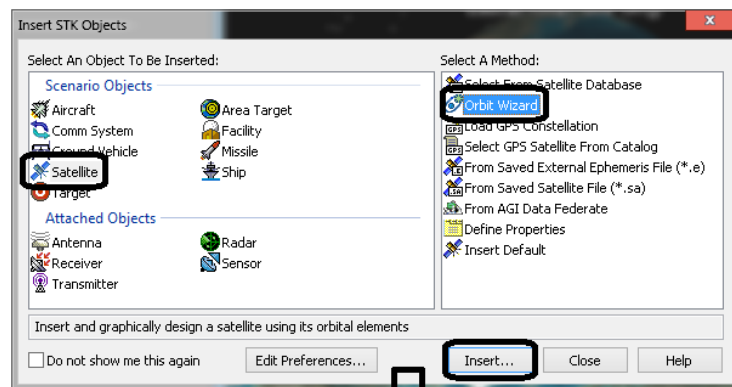


Fig. 4.11 Colocando un satélite en el escenario

Ahora añadiremos un sensor que nos permitirá orientar⁷³ fácilmente la antena del transmisor en el satélite hacia la estación terrena de interés.

Para ello seleccionamos al objeto “Sensor” dentro de la ventana “Insert STK Objects” y en el método de inclusión elegimos “Insert Default” damos clic en “Insert” y se nos abre un cuadro donde escogemos al elemento del escenario que portara al sensor.

Por último necesitamos colocar el transmisor en el satélite, para ello elegimos el objeto “Transmitter” y en el método de inserción seleccionamos “Insert Default”, al dar clic en “Insert” se nos abre una ventana en la cual escogemos al elemento que llevará el transmisor (en este caso es el sensor previamente colocado).

Habiendo ingresado todos los elementos necesarios para llevar a cabo nuestra simulación, podremos verificar que estos ya están cargados al escenario “Proyecto_0” dentro de la parte del explorador de objetos “Object Browser”, así como en las visualizaciones en 2D y 3D.

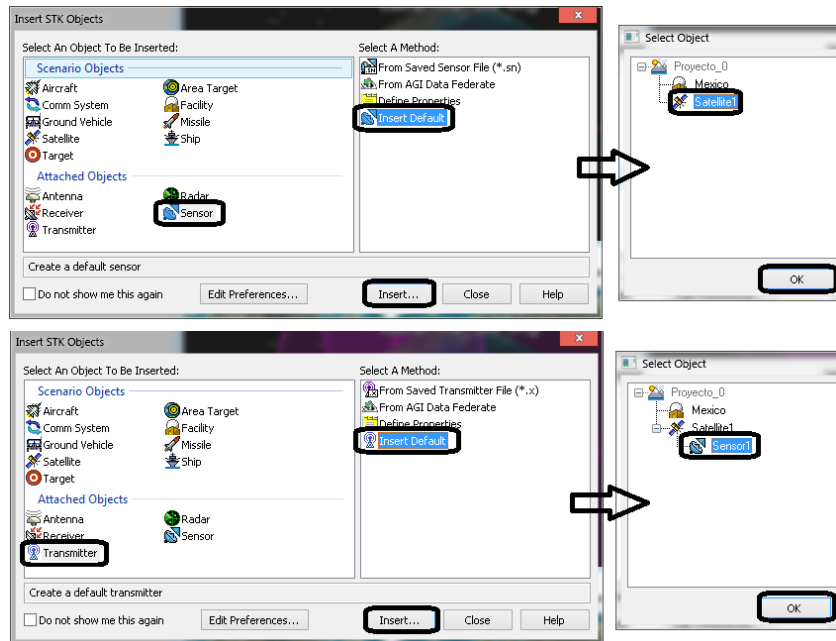


Fig. 4.12 Montando un sensor y transmisor al satélite

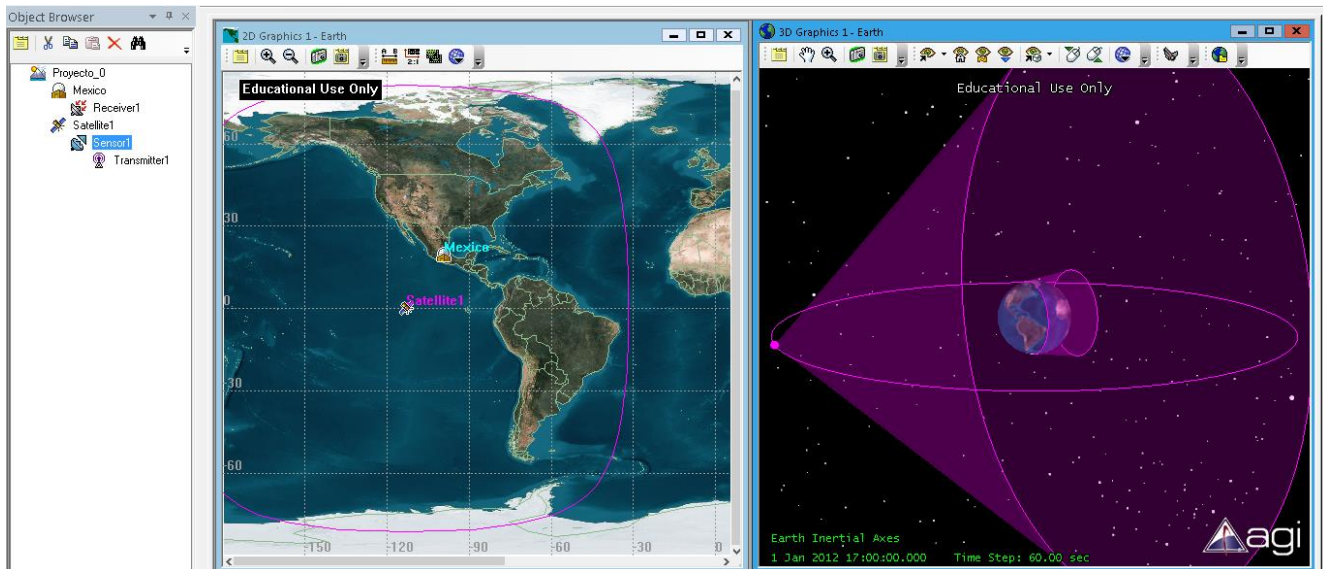


Fig. 4.13 Visualizaciones 2D y 3D del escenario generado

Después de haber definido el escenario e insertado los distintos objetos necesarios para llevar a cabo el análisis, lo siguiente es configurar algunos elementos, primero lo haremos con el sensor.

⁷³ La orientación de la antena también se puede realizar de manera manual.

Damos doble clic sobre el sensor, se nos abre una ventana del lado derecho de “Object Browser” donde modificaremos las características de “Definition” cambiando el tipo de sensor a “Half Power”⁷⁴. En el apartado de apuntamiento “Pointing” seleccionamos el dirigido “Targeted” y en consecuencia debemos elegir al elemento dentro del escenario al cual apuntará, en nuestro caso es el receptor de la estación terrena el cual debemos elegir en la sección “Available Targets”. Guardamos los cambios dando clic en “Apply” y “OK”.

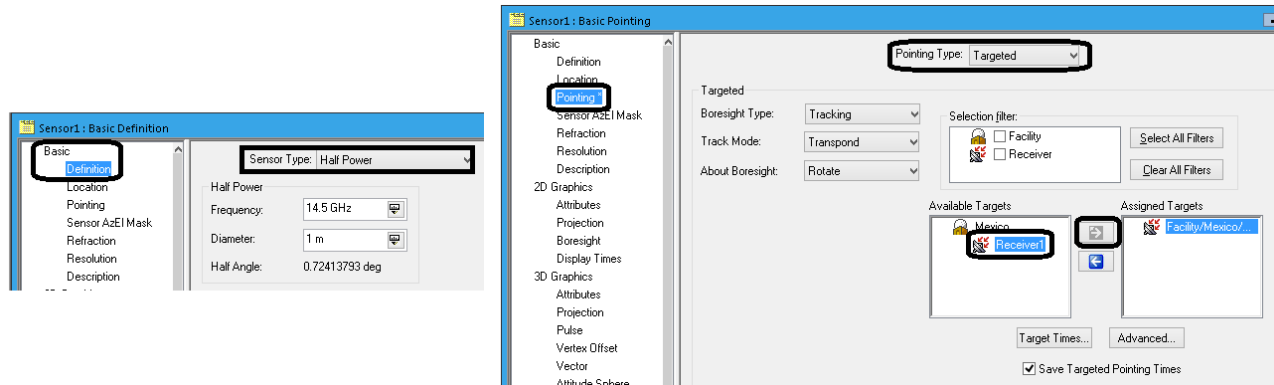


Fig. 4.14 Configurando el tipo y orientación del sensor en el satélite

Continuamos ahora con la configuración del transmisor que contiene la antena, para ello damos doble clic sobre este objeto y se nos abrirá una ventana de propiedades. En este caso tenemos cuatro opciones a modificar: características básicas “Basic”, aspectos de los gráficos en 2D “2D Graphics”, en 3D “3D Graphics” y para establecer restricciones “Constraints”.

En este proyecto solamente modificaremos las rutas “Basic”->“Definition”, “2D Graphics”->“Contours” y “3D Graphics”->“Attributes”.

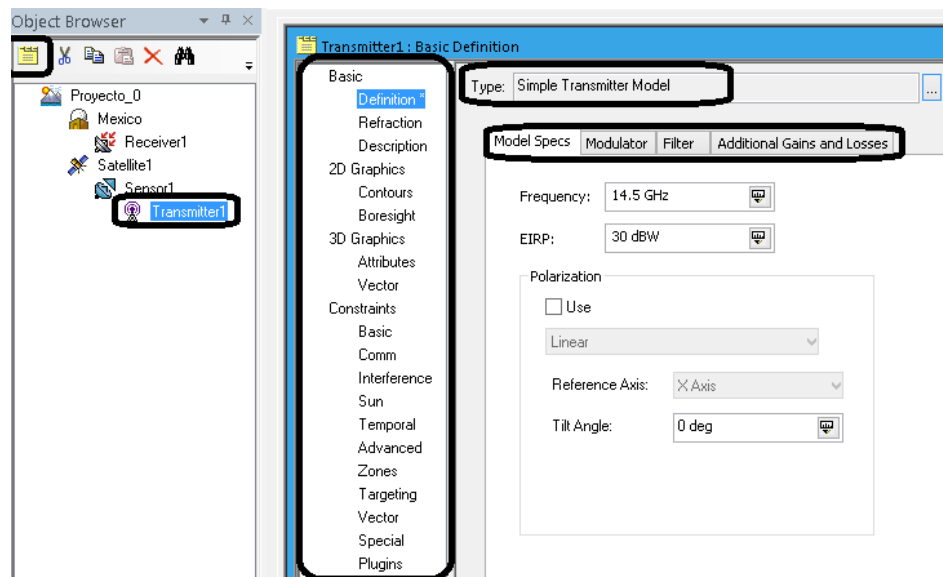


Fig. 4.15 Características del modelo de transmisor simple

⁷⁴ El sensor tipo “Half Power” o de media potencia permite modelar los campos de visión de una antena parabólica.

Comenzamos con el apartado "Basic"->"Definition", dentro de las características que son susceptibles de modificar en principio son: el tipo de transmisor a utilizar.

En este caso utilizaremos el modelo "Complex Transmitter Model" dado que este nos permite realizar la representación gráfica de algunas de sus características: el patrón de radiación y los contornos de ganancia (algo que no se puede realizar con el "Simple Transmitter Model").

Habiendo realizado dicha elección observamos que existen una serie de pestañas las cuales contienen otros parámetros modificables para el modelo específico de transmisor seleccionado. Por tanto, dependiendo de cual escogemos, la cantidad de propiedades que cambiaremos será diferente.

La primera pestaña "Model Specs" nos permite modificar la frecuencia de operación y la potencia a utilizar en el transmisor. Después tenemos la pestaña "Antenna" que nos permite modificar algunas propiedades del tipo de antena escogido.

Después tenemos otras apartados que no vamos a manipular en este proyecto y que permiten establecer las características del modulador "Modulator", los filtros "Filter" y añadir cualquier nivel de ganancia o pérdida adicional "Additional Gains and Losses".

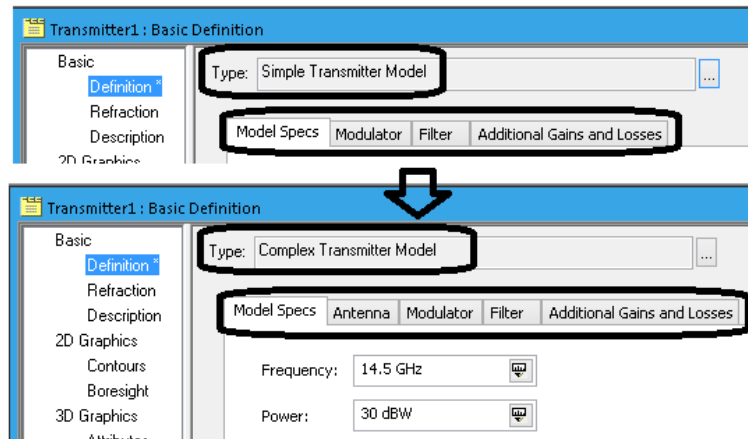


Fig. 4.16 Comparativa de las propiedades de un transmisor simple y uno complejo

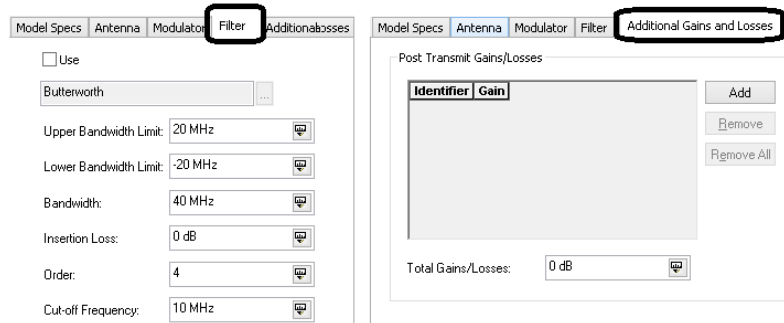
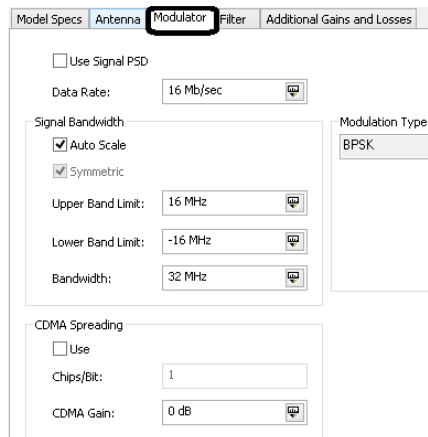
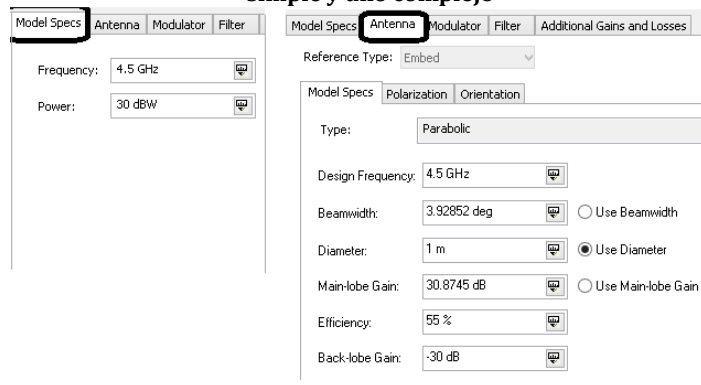


Fig. 4.17 Especificaciones del modelo, de la antena, modulador, filtros y ganancias-pérdidas adicionales en el transmisor complejo

Si nos enfocamos en la pestaña “Antenna”, nos damos cuenta de que se puede seleccionar el tipo de antena en la subpestaña “Model Specs” y en función del modelo escogido deberemos modificar distintas características.

Para el caso “Parabolic” o “Gaussian” las propiedades que se pueden variar son: la frecuencia de diseño, el ancho del haz, el diámetro, la ganancia del lóbulo principal del patrón de radiación, la eficiencia y la ganancia del lóbulo posterior. Además también existe una sección en la cual indicaremos cual variable vamos a controlar (“Beamwidth”, “Diameter” o “Main-lobe Gain”).

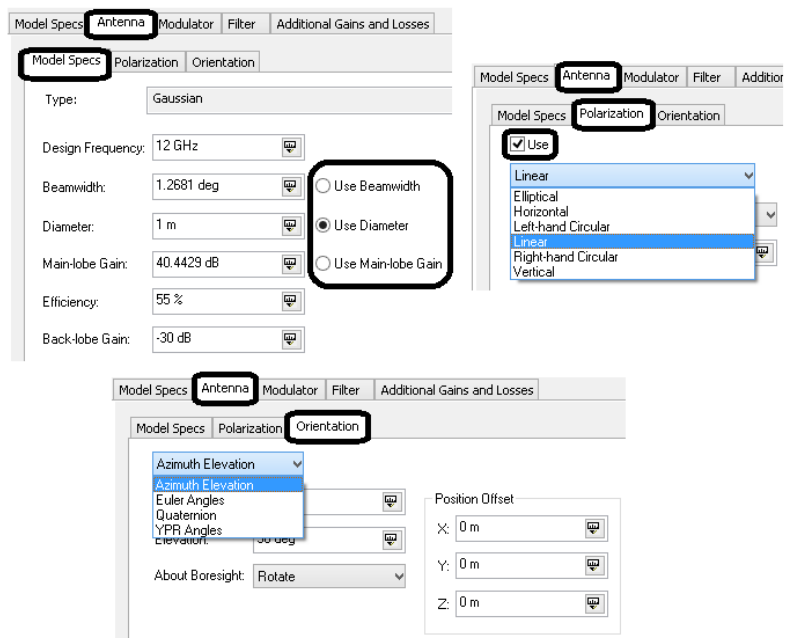


Fig. 4.18 Apartados para la configuración de la antena

Pasando a la subpestaña “Polarization” podremos definir el tipo de polarización a utilizar (elíptica, lineal horizontal o vertical o con cierto ángulo de inclinación, circular en sentido horario o antihorario).

Y por último tenemos el apartado “Orientation” referente a la orientación de la antena en donde tenemos distintos sistemas de referencia (azimut-elevación, ángulos de Euler entre otros) para apuntar el patrón de radiación hacia una zona en particular sobre la superficie terrestre.

Para comenzar veremos cuales son los distintos modelos de antenas con los que cuenta el programa. Para ello damos clic en el botón de la opción “Type” de la pestaña “Antenna”, a continuación se abre una ventana que presenta los distintos tipos instalados en STK

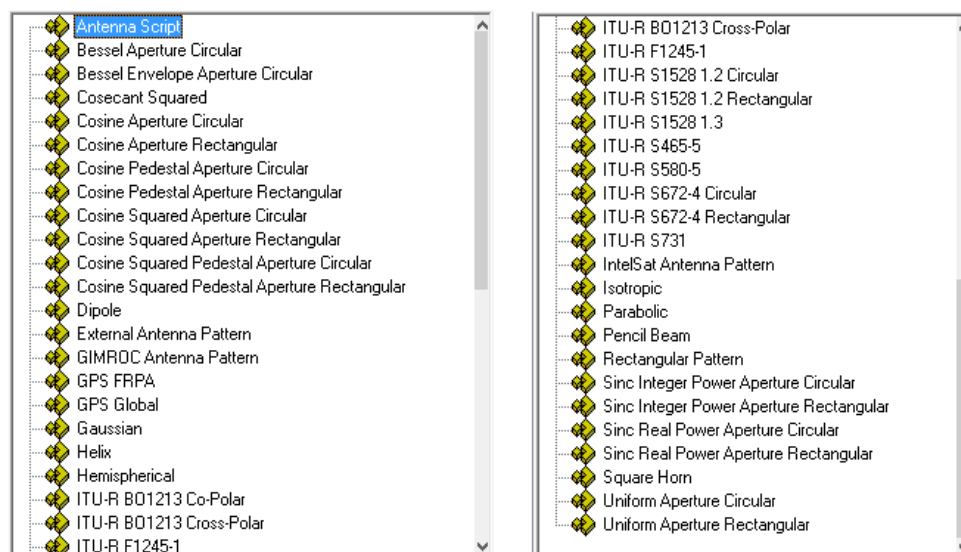


Fig. 4.19 Tipos de antenas definidas en STK

STK cuenta con una gran variedad de antenas físicamente realizables, además de modelos cuyas características no son posibles de obtener en la práctica (radiador isotrópico) pero que nos permiten obtener resultados para un análisis particular.

Para conocer las variables involucradas en cada tipo es necesario revisar la documentación y así entender como modificar adecuadamente los parámetros para obtener los resultados deseados.

Por otra parte existen dos tipos de antenas muy especiales, la primera tiene el nombre “*Antenna Script*” que al seleccionarla tenemos la posibilidad de configurar a este elemento según nuestras necesidades. Está debe ser exportada desde un archivo programado por el usuario en alguno de los distintos lenguajes que STK soporta.

El otro modelo es “*External Antenna Pattern*” que permite ingresar directamente el archivo del patrón de radiación configurado externamente con el uso de algún programa como: “*Satsoft*” o “*Pattern Magus*”⁷⁵.

Para fines prácticos no se analizarán todos los tipos preinstalados, solamente analizaremos dos casos.

Comenzaremos con la antena parabólica uno de los modelos más utilizados este tipo de sistemas, recordemos que dependiendo del tipo de antena seleccionado las características que podremos modificar serán diferentes.

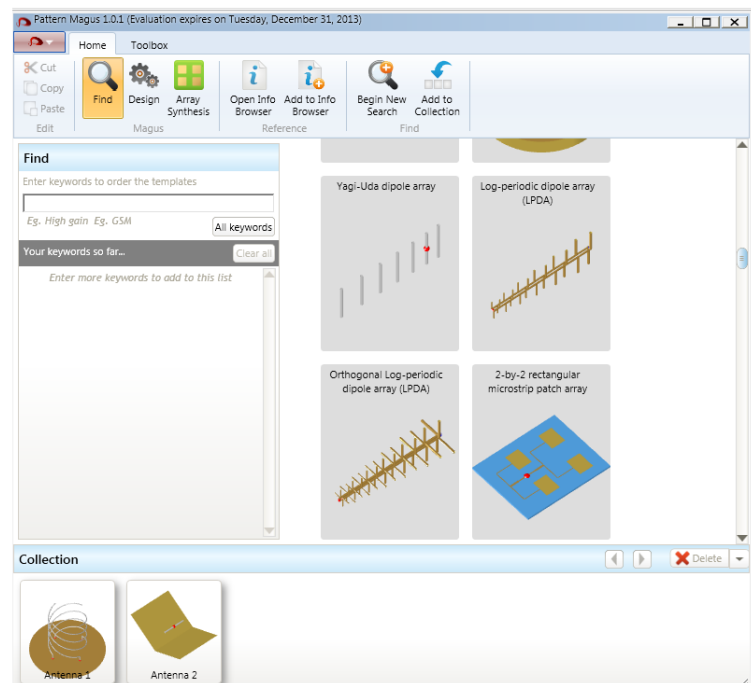
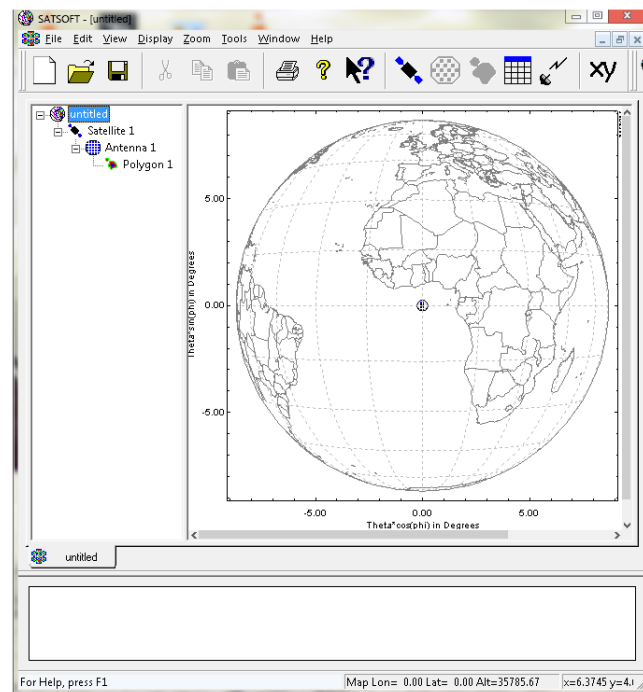


Fig. 4.20 Software para el diseño de antenas Satsoft y Pattern Magus

⁷⁵ Pattern Magus solamente es compatible con la versión 4.0 del Microsoft .NET Framework, así que en caso de tener una versión antigua o más reciente no te permitirá abrir el programa.

Al haber seleccionado la antena parabólica, se nos despliegan los distintos parámetros característicos del elemento. En este caso se puede variar ya sea el ancho del haz “*Beamwidth*” o el diámetro “*Diameter*” o la ganancia del lóbulo principal “*Main-lobe Gain*”.

Antes de proceder a modificar el patrón de radiación debemos configurar la representación 2D y 3D para visualizar los cambios que sufre al cambiar algunos parámetros de la antena.

En el caso de los gráficos 2D nos dirigimos a la siguiente ruta “*2D Graphics*”->“*Contours*”. Marcamos la opción “*Show Graphics*” para que se visualicen los contornos de ganancia generados por la antena en el mapa 2D.

Después habilitamos la opción “*Relative To Maximum*” que nos permitirá normalizar los niveles de ganancia con respecto al máximo valor dentro del patrón de radiación. En el apartado “*Level Adding*” establecemos el nivel de ganancia inicial y final, además de los incrementos.

Habilitando la casilla “*Show*” en el apartado “*Level Labels*” aseguramos que aparezcan los números de los distintos niveles en los contornos que graficamos.

Por último tenemos un apartado para configurar la resolución (tanto en azimut y elevación) en la presentación de los contornos de ganancia. Para ello solamente establecemos el número de puntos que deseamos para las orientaciones.

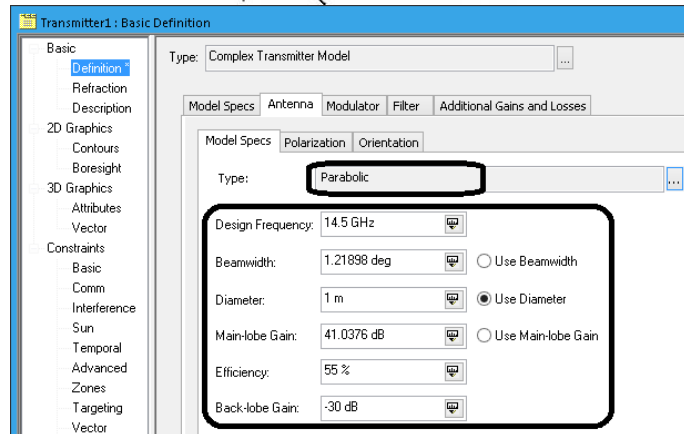
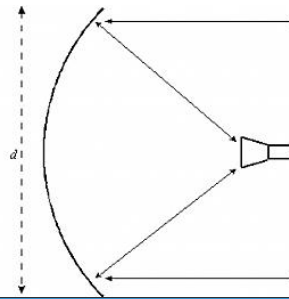


Fig. 4.21 Parámetros de la antena parabólica

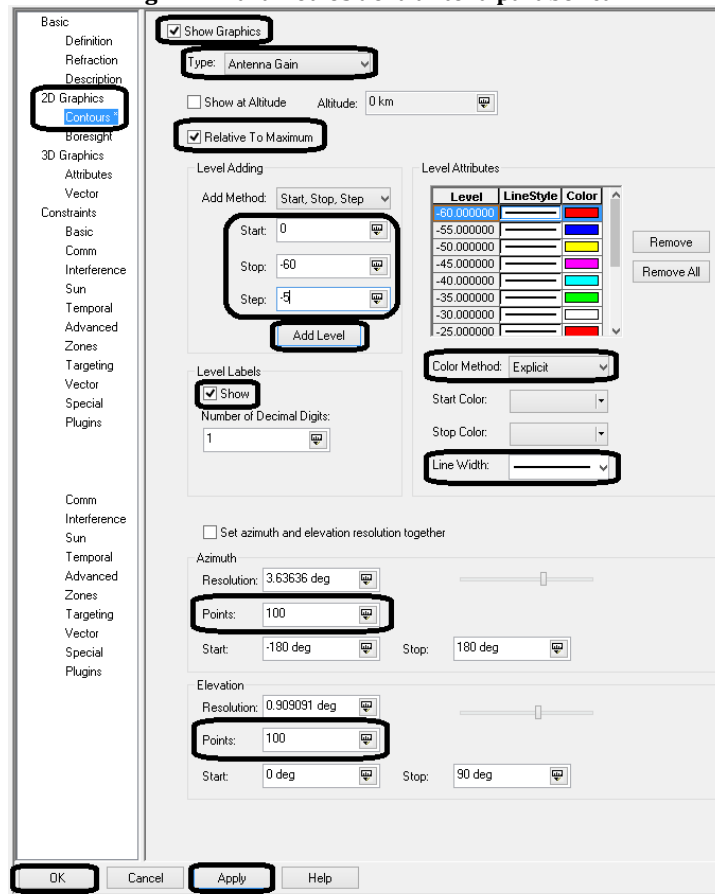


Fig. 4.22 Configuración establecida para la representación 2D

Para el caso de los gráficos 3D nos dirigimos a la siguiente ruta "3D Graphics" -> "Attributes".

Habilitamos las opciones "Show Lines" y "Show Volume", además definimos la escala en decibels por kilómetro y el número de puntos necesarios para la resolución de los contornos de ganancia y el patrón de radiación de la antena en la representación 3D sobre el globo terrestre.

El resultado de las configuraciones anteriores se muestra a continuación.

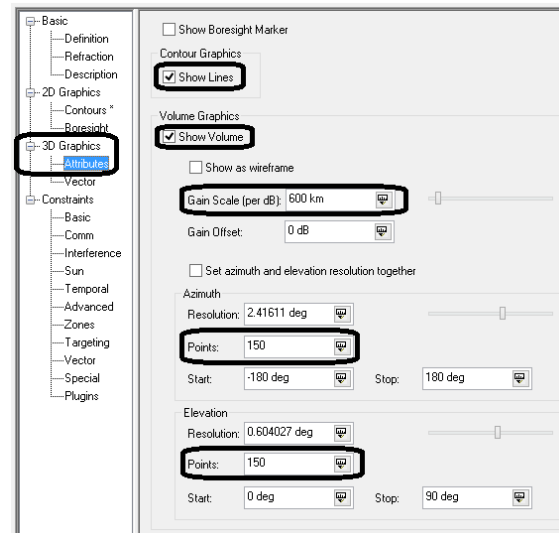


Fig. 4.23 Configuración establecida para la representación 3D

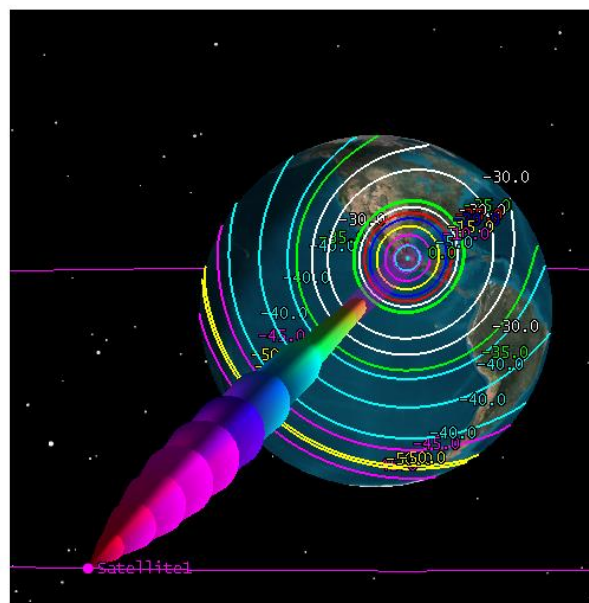
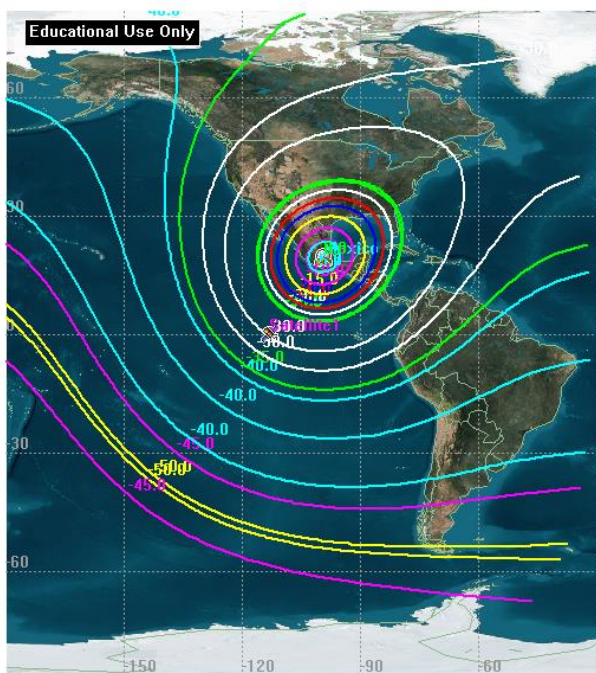


Fig. 4.24 Representación 2D y 3D de los contornos de ganancia de la antena del satélite

Ahora procedemos a establecer distintas frecuencias de diseño para la antena de estudio. En este caso utilizaremos 4.5 [GHz], 12 [GHz] y 18.5 [GHz] que pertenecen a la banda de frecuencias C, Ku y Ka respectivamente.

Analizaremos el comportamiento de los parámetros específicos del tipo seleccionado, así como las variaciones que se presentan en las representaciones 2D y 3D en el patrón de radiación y contornos de ganancia.

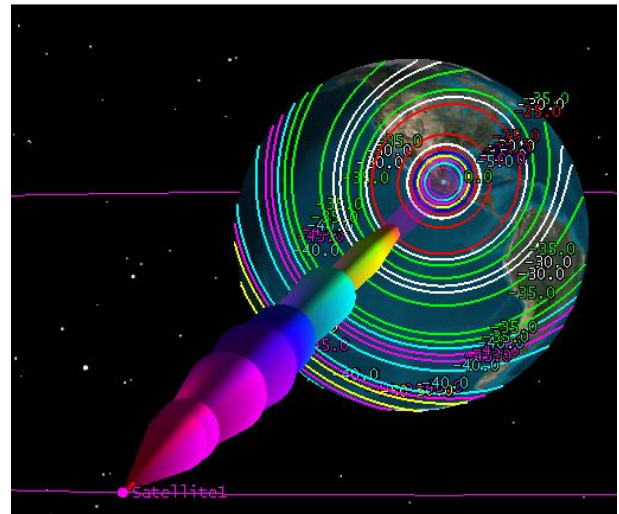
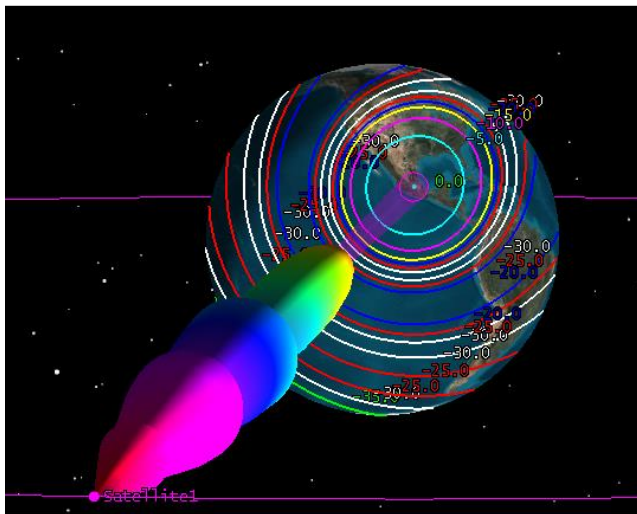
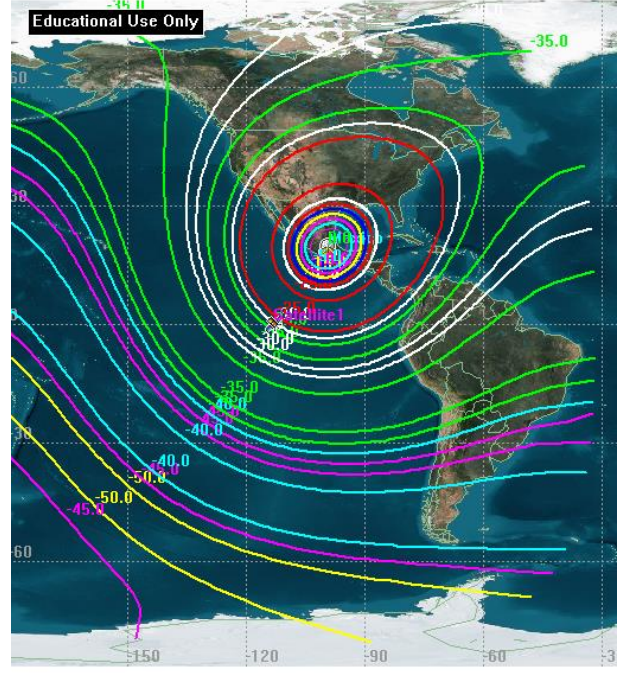
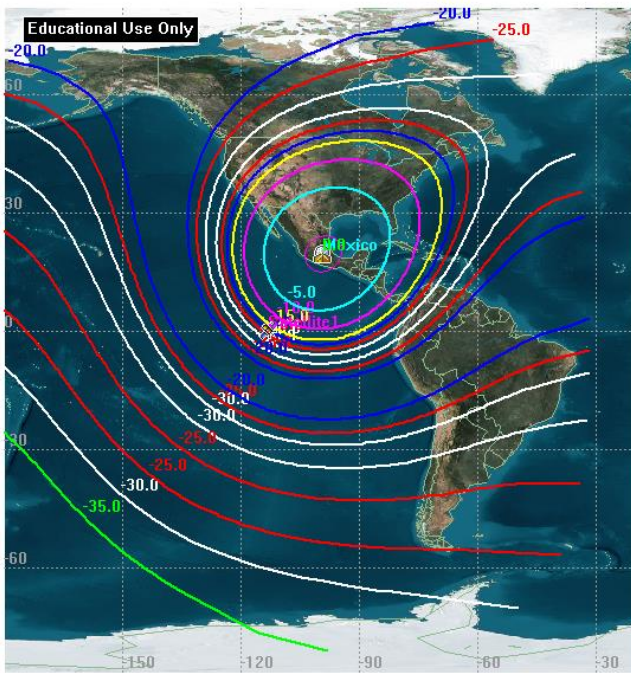
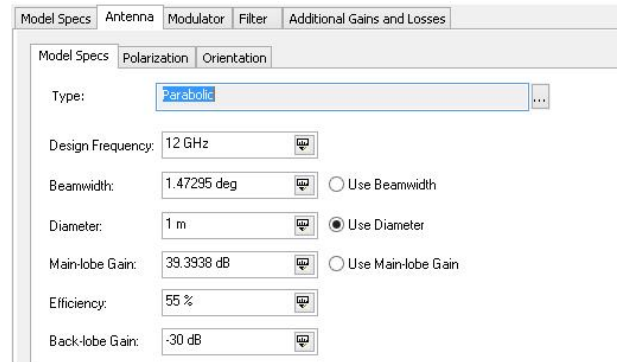


Fig. 4.25 Parámetros de la antena, representación 2D y 3D del patrón de radiación (4.5 [GHz])

Fig. 4.26 Parámetros de la antena, representación 2D y 3D del patrón de radiación (12 [GHz])

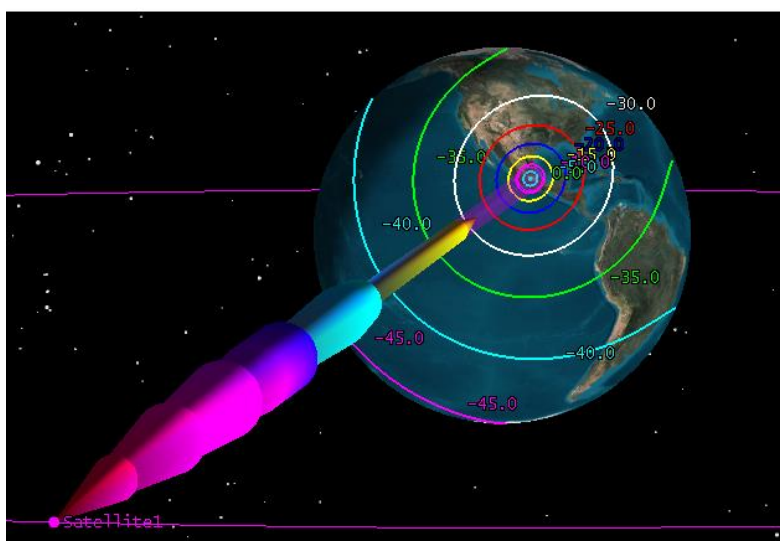
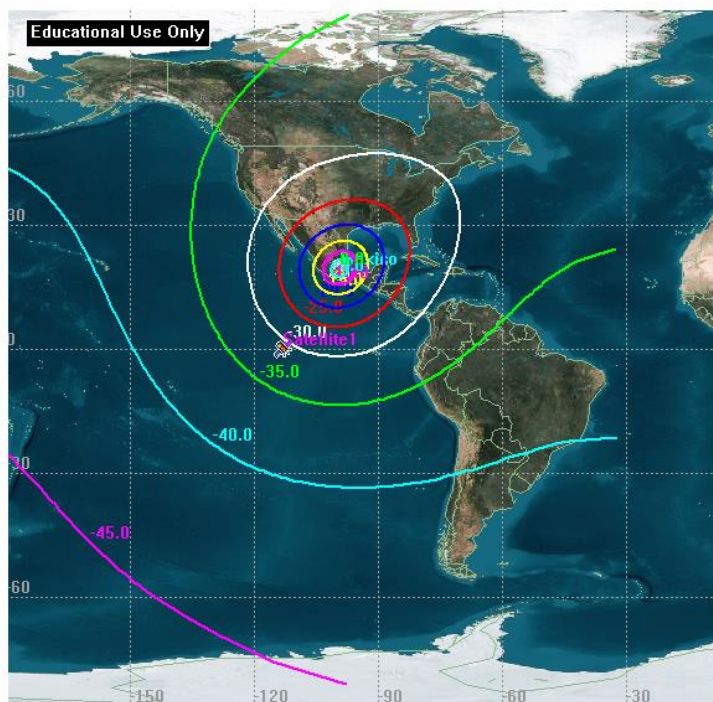
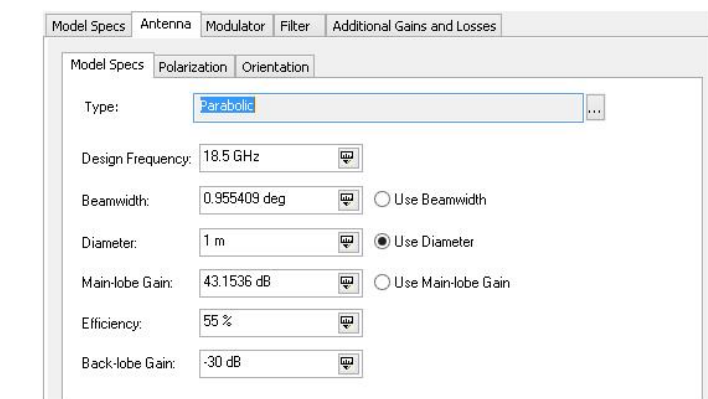


Fig. 4.27 Parámetros de la antena, representación 2D y 3D del patrón de radiación (18.5 [GHz])

A manera de analizar los resultados obtenidos, generamos la siguiente tabla comparativa que resume los valores que adquieren algunos parámetros de diseño de la antena parabólica.

Tabla 4.1 Parámetros de la antena parabólica para distintas frecuencias

Frecuencia [GHz]	Ancho del haz [°]	Diámetro [m]	Ganancia lóbulo principal [dB]	Eficiencia	Ganancia del lóbulo trasero [dB]
4.5	3.92852	1	30.8745	55%	-30
12	1.47295	1	39.3938	55%	-30
18.5	0.955409	1	43.1536	55%	-30

Analizando los resultados anteriores se observa un comportamiento creciente en el nivel máximo de ganancia y decreciente en el ancho del haz del lóbulo principal a medida que incrementamos la frecuencia de operación de la antena.

A partir de los gráficos 2D y 3D (Fig. 4.25, 4.26 y 4.27) resulta claro que conforme pasamos a una banda de operación más alta, el lóbulo principal dentro del patrón de radiación se vuelve más angosto ocasionando que la huella de cobertura sobre la superficie terrestre se vaya concentrando más sobre la región hacia donde apunta la antena.

Los colores empleados van desde el color rojo que representa el máximo nivel de ganancia hasta el color violeta que representa el valor mínimo.

Un estudio similar se puede realizar conociendo la expresión $G(\theta)$ empleada por STK para definir la forma del patrón de radiación y su proyección bidimensional.

$G(\theta)$ toma en cuenta parámetros como: la eficiencia de la antena (η), el diámetro (D), la longitud de onda (λ). Además se ve involucrada la función Bessel de primer orden.

De la gráfica $G(\theta)$ (Fig. 4.28), vemos que el ancho del lóbulo principal (el cual se ubica entorno a $\theta=0$ [rad]) se va haciendo más estrecho conforme incrementamos la frecuencia, mientras que la máxima ganancia obtenida tiene un incremento en su nivel.

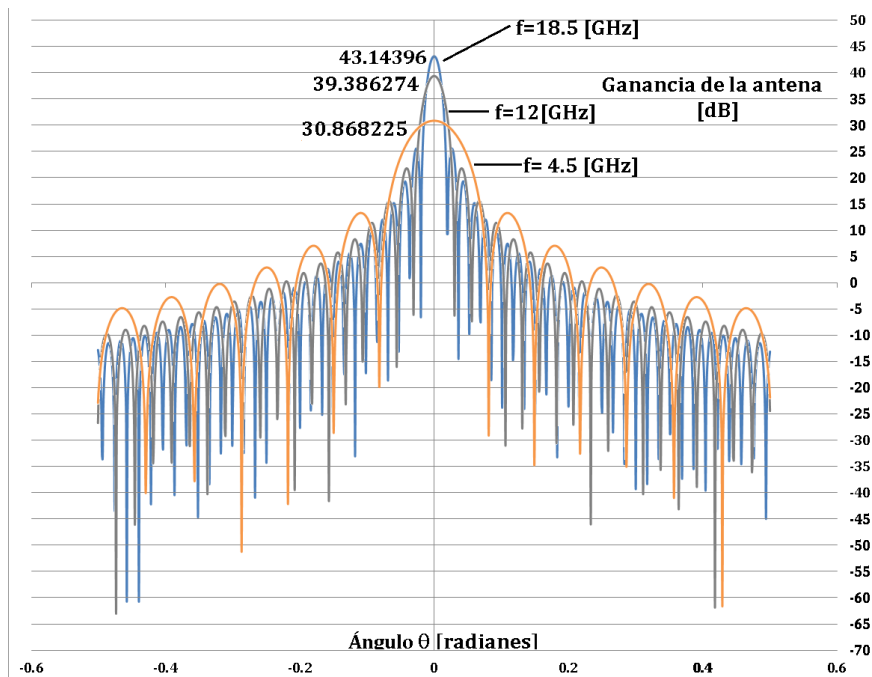


Fig. 4.28 Curvas de ganancia de la antena parabólica

$$G(\theta) = \frac{4\eta}{\text{sen}^2(\theta)} \left(J_1 \left\{ \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right) (\text{sen}(\theta)) \right\} \right)^2 \rightarrow G_{\text{máx}} = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

Además observamos un comportamiento creciente en el número de lóbulos secundarios que conforman al patrón de radiación de la antena conforme cambiamos a una banda superior.

Lo siguiente que haremos será variar la frecuencia entre 4 [GHz] y 28 [GHz] con incrementos de 4 [GHz] manteniendo el valor de diámetro en un valor constante. En dicho proceso obtendremos los valores para el ancho del haz y la ganancia máxima.

Tabla 4.2 Variación de los parámetros de una antena parabólica en función del diámetro y frecuencia de operación

Frecuencia [GHz]	Diámetro 0.5 [m]		Diámetro 1[m]		Diámetro 2 [m]		Diámetro 4 [m]	
	Ancho del haz [°]	Ganancia [dB]	Ancho del haz [°]	Ganancia [dB]	Ancho del haz [°]	Ganancia [dB]	Ancho del haz [°]	Ganancia [dB]
4	8.84622	23.8308	4.41981	29.8514	2.2095	35.872	1.1047	41.8926
8	4.41981	29.8514	2.2095	35.872	1.1047	41.8926	0.552342	47.9132
12	2.94614	33.3732	1.47295	39.3938	0.73645	45.4144	0.368227	51.435
16	2.2095	35.872	1.1047	41.8926	0.552342	47.9132	0.27617	53.9338
20	1.76756	37.8102	0.883752	43.8308	0.441873	49.8514	0.220936	55.872
24	1.47295	39.3938	0.736458	45.4144	0.368227	51.435	0.184113	57.4556
28	1.26252	40.7328	0.631248	46.7534	0.315623	52.774	0.157811	58.7946

A partir de los datos anteriores, notamos una reducción aproximada de la mitad del valor en el ancho del haz y un incremento aproximado de 6 [dB] en el valor de la ganancia del lóbulo principal.

Lo anterior es cierto cuando:

- Se fija el diámetro y duplica la frecuencia.
- La frecuencia se mantiene constante y el diámetro se dobla.

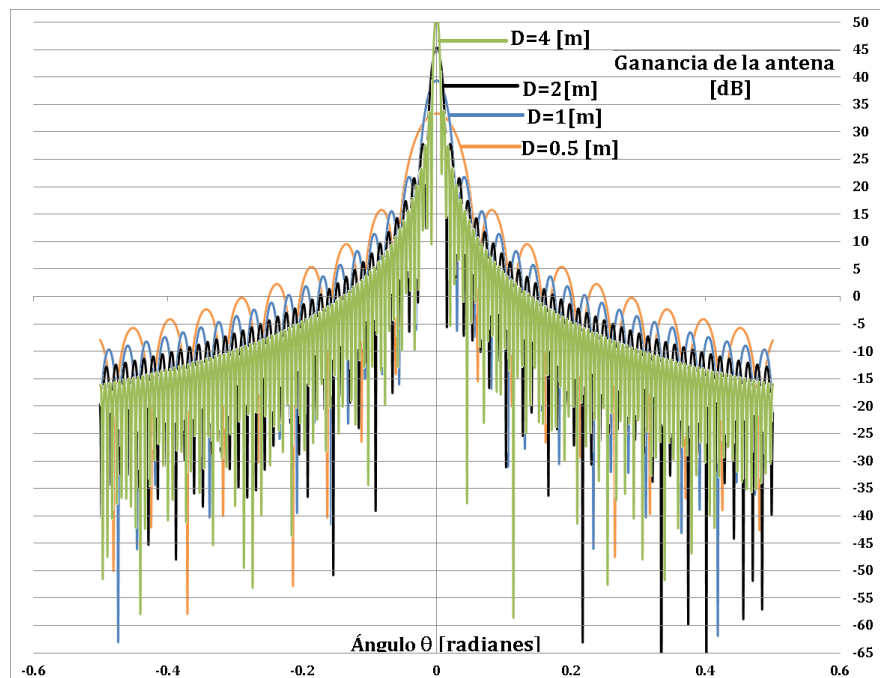


Fig. 4.29 Curvas de ganancia de la antena para distintos diámetros de la antena para una frecuencia de 12 [GHz]

Por otra parte se presenta la gráfica (Fig. 4.29) correspondiente a las variaciones de ganancia de la antena para distintos diámetros manteniendo la frecuencia constante (f=12 [GHz]).

Ahora con ayuda del receptor (este elemento no lo configuramos anteriormente, lo dejamos así como viene por default) obtendremos los valores de algunos datos técnicos específicos en la estación terrena con la finalidad de observar cual es el impacto del diseño de la antena del satélite.

Para ello seleccionamos al receptor y damos clic en el botón “Access” ubicado en la barra de herramientas. Esto nos abre una ventana en donde seleccionamos al elemento vinculado al receptor, que en nuestro caso es el transmisor en el satélite.

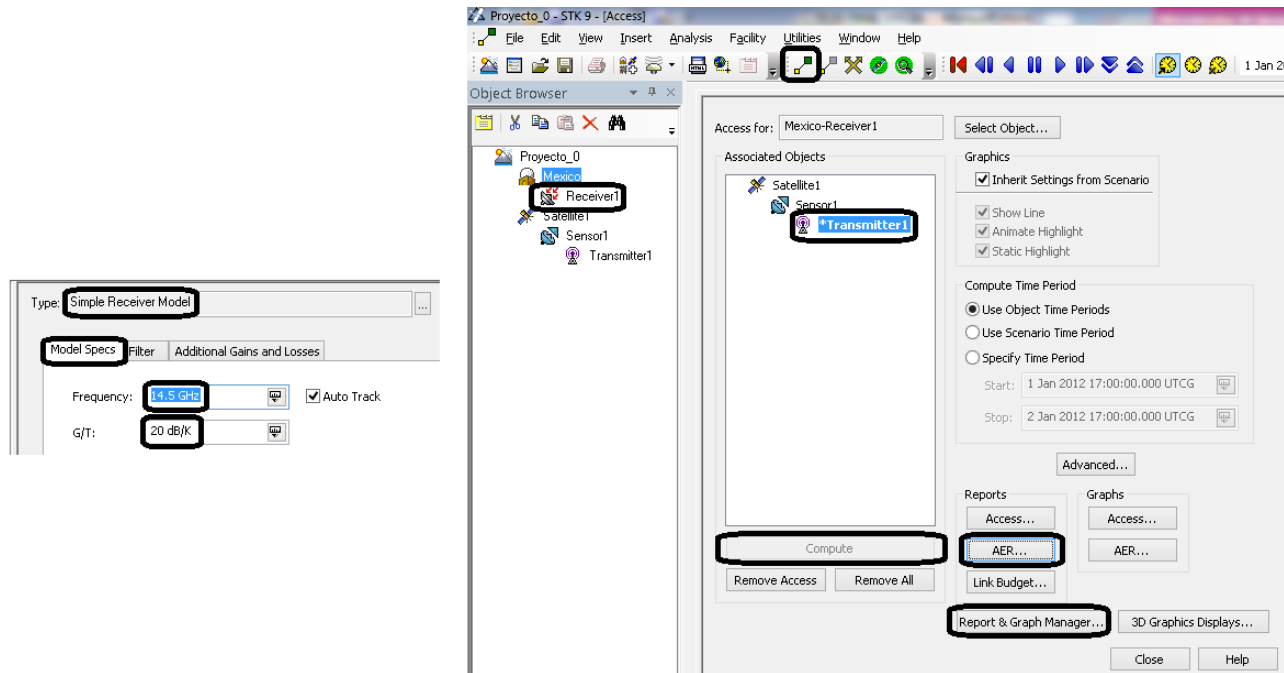


Fig. 4.30 Características del receptor y configurando el acceso al satélite por la estación terrena

Después apretamos el botón “Compute”, seguidamente damos clic en “AER” esto nos manda a otra ventana con el reporte generado de los parámetros azimuth, elevación y rango de la estación terrena dentro del tiempo de simulación definido al comienzo del capítulo.

Después nos regresamos a la ventana previa y presionamos “Report & Graph Manager”

Receiver1-To-Transmitter1				
Time (UTC)	Azimuth (deg)	Elevation (deg)	Range (km)	
1 Jan 2012 17:00:00.000	216.590	62.263	36414.232562	
1 Jan 2012 17:01:00.000	216.590	62.263	36414.232561	
1 Jan 2012 17:02:00.000	216.590	62.263	36414.232561	
1 Jan 2012 17:03:00.000	216.590	62.263	36414.232561	
1 Jan 2012 17:04:00.000	216.590	62.263	36414.232561	
1 Jan 2012 17:05:00.000	216.590	62.263	36414.232560	

Fig. 4.31 Valores de azimuth, elevación y rango de la estación terrena

En la nueva ventana nos dirigiremos a la sección “Styles” dejando marcada solo la opción “Show Reports” y después buscamos el reporte “Link Budget-Detailed” ubicado en la carpeta “Installed Styles”.

Por último damos clic en “Generate” y esto automáticamente nos generará un informe detallado de varios parámetros de interés para el enlace establecido.

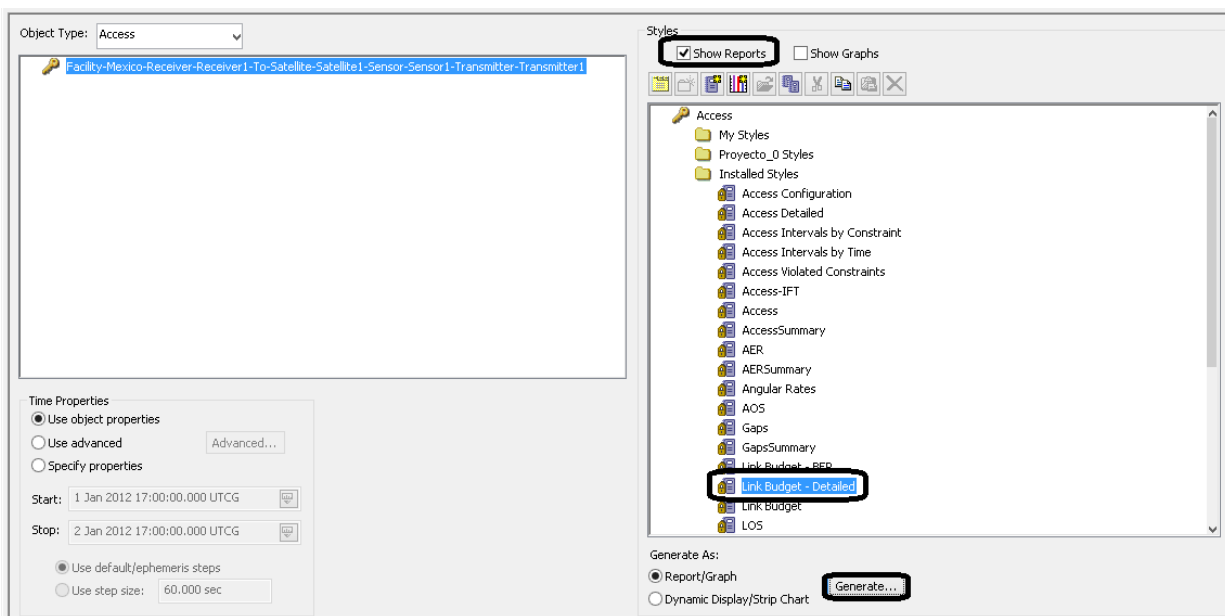


Fig. 4.32 Proceso para obtener un reporte detallado de algunos parámetros del escenario

Time (UTC)	Txr Power (dBW)	Txr Gain (dB)	EIRP (dBW)	Free Space Loss (dB)	Rtnos Loss (dB)	Rain Loss (dB)	CloudsFog Loss (dB)
1 Jan 2012 17:00:00.000	30.000	30.8745	60.874	-196.7375	0.0000	0.0000	0.0000
1 Jan 2012 17:01:00.000	30.000	30.8745	60.874	-196.7375	0.0000	0.0000	0.0000
1 Jan 2012 17:02:00.000	30.000	30.8745	60.874	-196.7375	0.0000	0.0000	0.0000
1 Jan 2012 17:03:00.000	30.000	30.8745	60.874	-196.7375	0.0000	0.0000	0.0000
1 Jan 2012 17:04:00.000	30.000	30.8745	60.874	-196.7375	0.0000	0.0000	0.0000

Fig. 4.33 Reporte generado sobre las características de recepción en la estación terrena

Para las distintas frecuencias de operación seleccionadas generamos un reporte. Los datos obtenidos se resumen a continuación.

Tabla 4.3 Parámetros de recepción en la estación terrena como función de la frecuencia de operación

Frecuencia de operación [GHz]	PIRE ⁷⁶ [dBW]	Pérdidas de propagación [dB]	RIP ⁷⁷ [dBW]	Densidad de flujo [dBW/m ²]	C/N ₀ [dBHz]	C/N [dB]	E _b /N ₀ [dB]
4.5	60.874	-196.7375	-135.863	-101.343061	112.736143	37.6846	40.6949
12	69.394	-205.2568	-135.863	-92.823688	112.736141	37.6846	40.6949
18.5	73.154	-209.0166	-135.863	-89.063877	112.736138	37.6846	40.6949

La interpretación de los resultados anteriores es la siguiente:

- El valor que adquiere el PIRE del satélite conforme variamos la frecuencia de diseño viene dado por la suma en decibeles de la ganancia de transmisión (correspondiente al valor del lóbulo principal) y la potencia.

$$[PIRE]_{dBW} = [G_{Tx}]_{dB} + [P_{Tx}]_{dBW}$$

⁷⁶ PIRE: Potencia Isotrópica Radiada Efectiva

⁷⁷ RIP: Received Isotropic Power (Potencia isotrópica recibida)

- Después tenemos las pérdidas de propagación por espacio libre que dependen de la frecuencia de operación (f) y la distancia de separación entre la estación terrena y el satélite (R).

$$[L_{FSL}]_{dB} = 10\log_{10}\left(\frac{c}{4\pi Rf}\right)^2 \rightarrow c = 2.99792458 \times 10^8 \left[\frac{m}{s}\right]$$

- En el caso de la potencia isotrópica recibida (RIP), su valor viene dado por la suma del PIRE y las pérdidas de propagación por espacio libre (L_{FSL}).

Además observamos un comportamiento constante en este parámetro, algo que se justifica al analizar la expresión para la (RIP) que se presenta a continuación.

$$[RIP]_{dBW} = [PIRE]_{dBW} + [L_{FSL}]_{dB} \rightarrow [RIP]_{dBW} = [P_{Tx}]_{dBW} + 10\log_{10}\left[\eta\left(\frac{\pi f D}{c}\right)^2\right] + 10\log_{10}\left(\frac{c}{4\pi Rf}\right)^2$$

$$[RIP]_{dBW} = [P_{Tx}]_{dBW} + 10\log_{10}\left[\eta\left(\frac{D}{4R}\right)^2\right]$$

De la última expresión concluimos que su nivel es independiente de la frecuencia, pero es dependiente de potencia de transmitida, el diámetro de la antena, la eficiencia y la distancia de separación de la estación terrena al satélite.

- En el caso de la densidad de flujo de potencia, su comportamiento está relacionado con el PIRE y un factor que depende del cuadrado de la distancia de separación entre el transmisor y receptor.

$$\text{Densidad de flujo} = [PIRE]_{dBW} - 10\log_{10}(4\pi R^2)$$

- Después tenemos la relación portadora a densidad espectral de potencia del ruido (C/N_0) cuyo valor se genera por la suma del PIRE, las pérdidas de propagación por espacio libre, la figura de mérito (G/T) y un factor que depende de la constante de Boltzmann.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{dB-Hz} = [PIRE]_{dBW} + [L_{FSL}]_{dB} + \left[\frac{G}{T}\right]_{dB/K} - 10\log_{10}(k) \rightarrow \begin{cases} \left[\frac{G}{T}\right]_{dB/K} = 20\left[\frac{dB}{K}\right] \\ k = 1.3806 \times 10^{-23} \left[\frac{J}{K}\right] \end{cases}$$

En este caso observamos de la tabla que (C/N_0) presenta un comportamiento constante independiente de la frecuencia de operación. Esto último se puede justificar si se desarrolla un proceso de análisis similar al caso del parámetro RIP, como se muestra a continuación.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{dB-Hz} = [RIP]_{dBW} + \left[\frac{G}{T}\right]_{dB/K} - 10\log_{10}(k)$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{dB-Hz} = [P_{Tx}]_{dBW} + 10\log_{10}\left[\eta\left(\frac{D}{4R}\right)^2\right] + \left[\frac{G}{T}\right]_{dB/K} - 10\log_{10}(k)$$

De la última expresión nos damos cuenta que el único término dependiente con la frecuencia es la figura de mérito (ganancia antena receptora), sin embargo, recordemos que no configuramos el equipo de la estación terrena (dejamos que (G/T) se mantuviera constante).

- Y por último las relaciones (C/N) y (E_b/N_0) están dadas por las siguientes expresiones.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{dB}} = \left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{dB-Hz}} - 10\log_{10}(\text{BW}) \quad \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{dB}} = \left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{dB-Hz}} - 10\log_{10}(R_{\text{bps}})$$

En donde el ancho de banda ocupado es $\text{BW}=36$ [MHz] y la tasa de transmisión es $R=16$ [Mbps], estos valores vienen pre-configurados en el equipo transmisor del satélite en el apartado “*Modulator*”.

Ahora analizaremos el comportamiento de una antena de bocina cuadrada, es decir, aquella cuyas dimensiones de la apertura son las mismas. Este elemento también es un tipo común utilizado en los satélites de comunicaciones.

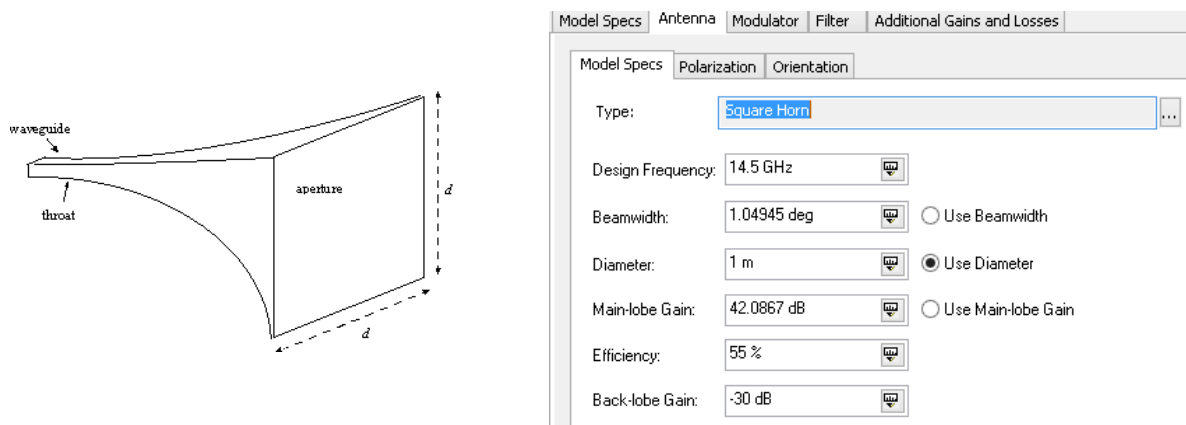


Fig. 4.34 Parámetros de la antena de bocina cuadrada

De tener en cuenta que si queremos conservar el escenario anterior, debemos guardarlo desde el menú “*File*”->“*Save*”.

Después cambiamos el tipo de antena del transmisor en el satélite de “*Parabolic*” a “*Square Horn*”. Lo siguiente es renombrar el nuevo escenario desde el menú “*File*”->“*Save as*”.

Se presentan a continuación las representaciones 2D y 3D de las características del patrón de radiación para la bocina cuadrada conforme aumentamos la frecuencia de operación (Fig. 4.35, 4.36 y 4.37).

Realizando una comparación de los gráficos obtenidos para los dos tipos de antenas, observamos claramente que las huellas de cobertura se concentran más en la apertura cuadrada que para la parabólica a medida que aumentamos la frecuencia de operación.

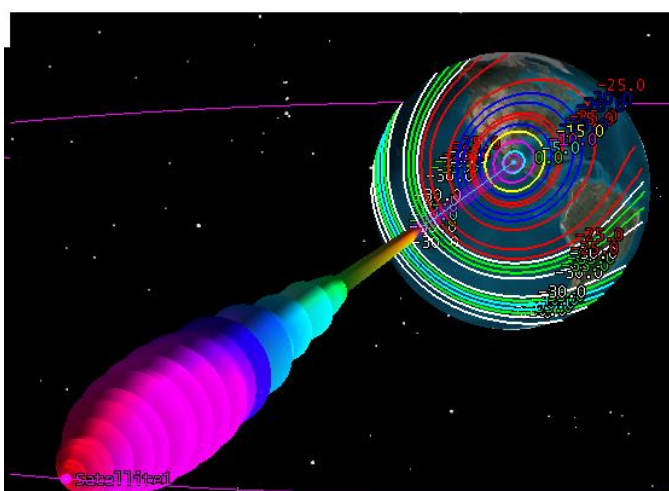
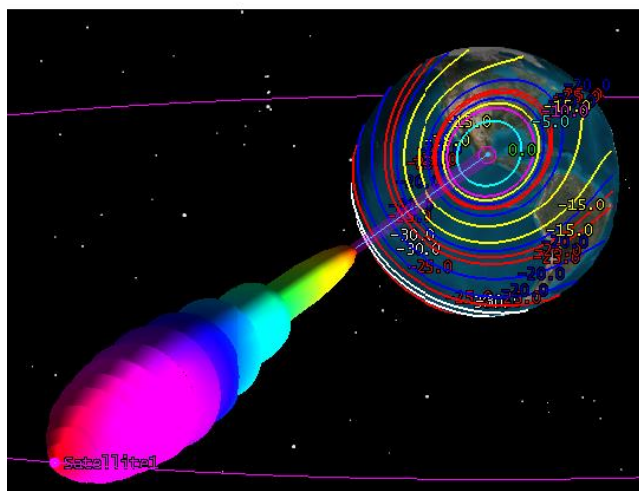
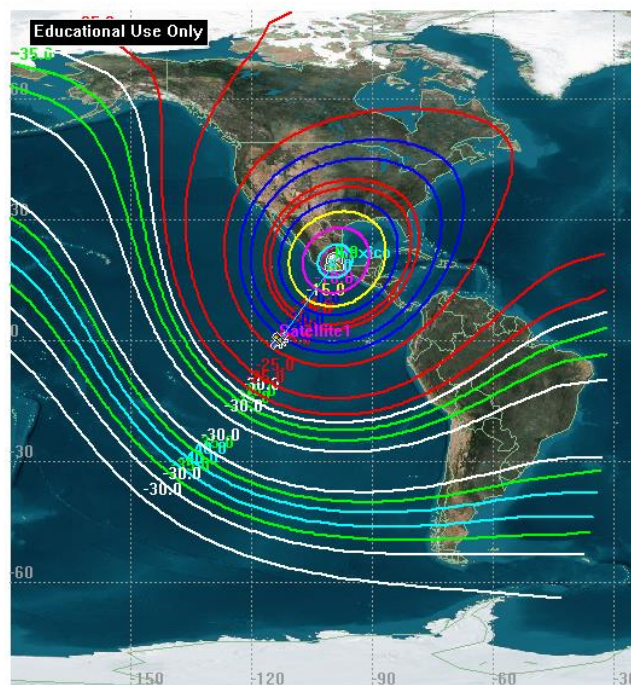
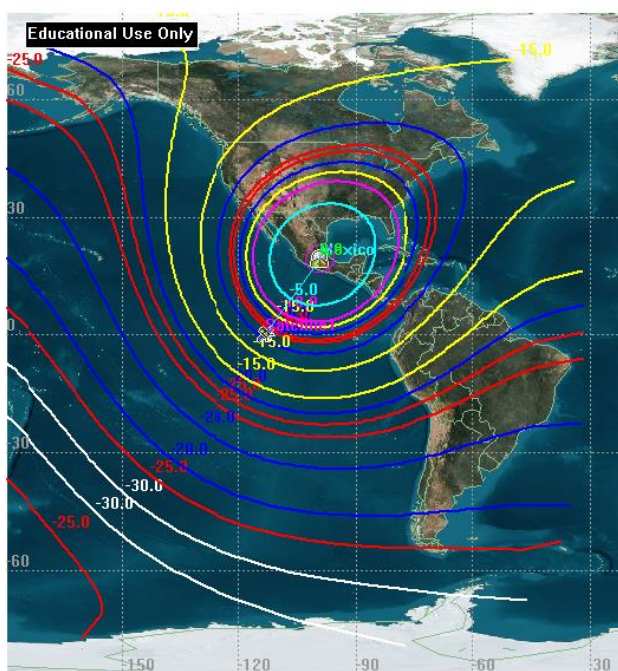
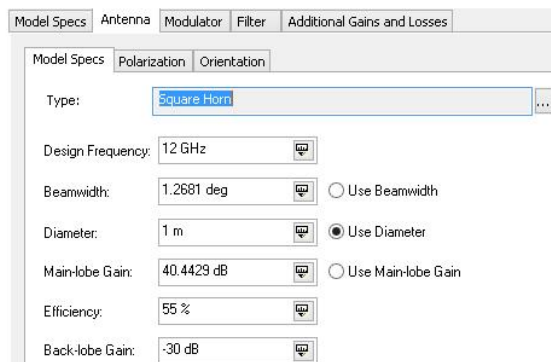
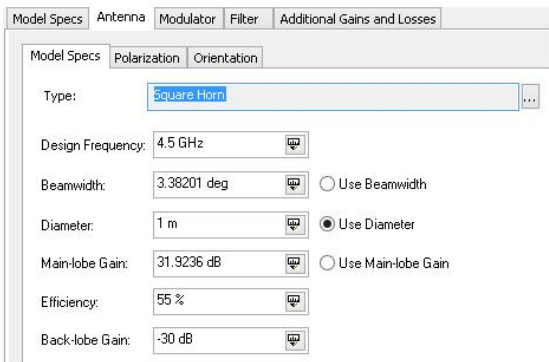


Fig. 4.35 Representación 2D y 3D del patrón de radiación de la antena de bocina (4.5 [GHz])

Fig. 4.36 Representación 2D y 3D del patrón de radiación de la antena de bocina (12 [GHz])

Model Specs	Antenna	Modulator	Filter	Additional Gains and Losses
Model Specs Polarization Orientation				
Type:	Square Horn			
Design Frequency:	18.5 GHz			
Beamwidth:	0.822539 deg		<input type="radio"/> Use Beamwidth	
Diameter:	1 m		<input checked="" type="radio"/> Use Diameter	
Main-lobe Gain:	44.2027 dB		<input type="radio"/> Use Main-lobe Gain	
Efficiency:	55 %			
Back-lobe Gain:	-30 dB			

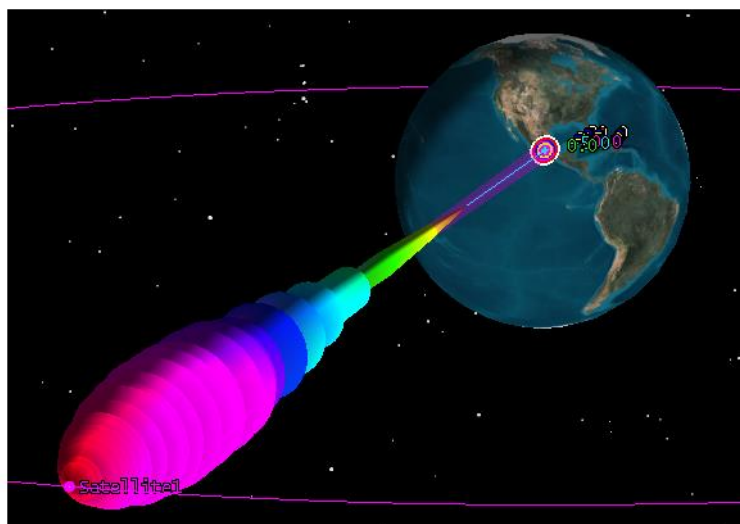


Fig. 4.37 Características de la antena de bocina y representación 2D y 3D del patrón de radiación (18.5 [GHz])

A continuación se presenta la siguiente tabla comparativa entre las dos antenas elegidas para este proyecto.

Tabla 4.4 Comparativa de los parámetros de las antenas tipo parabólica y de bocina cuadrada como función de la frecuencia

Frecuencia [GHz]	Parabólica	Bocina	Parabólica	Bocina
	Ancho del haz [°]	Ancho del haz [°]	Ganancia lóbulo principal [dB]	Ganancia lóbulo principal [dB]
4.5	3.92852	3.38201	30.8745	31.9236
12	1.47295	1.2681	39.3938	40.4429
18.5	0.955409	0.822539	43.1536	44.2027

Para la antena de bocina cuadrada, la expresión que emplea STK para definir la forma del patrón de radiación es la siguiente:

$$G(\theta) = \left(\frac{4\eta}{\pi \sin^2(\theta)} \right) \sin^2 \left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin(\theta) \right)$$

La ecuación anterior toma en cuenta las dimensiones de la apertura (d) y la eficiencia (η) de la antena.

En este caso se muestran las curvas de ganancia para las distintas frecuencias de operación empleadas (Fig. 4.38).

Si nos enfocamos en el lóbulo principal (entorno a θ=0[rad]), notaremos que su comportamiento tiende a ser más angosto y la ganancia máxima obtenida crece a medida que incrementamos la frecuencia.

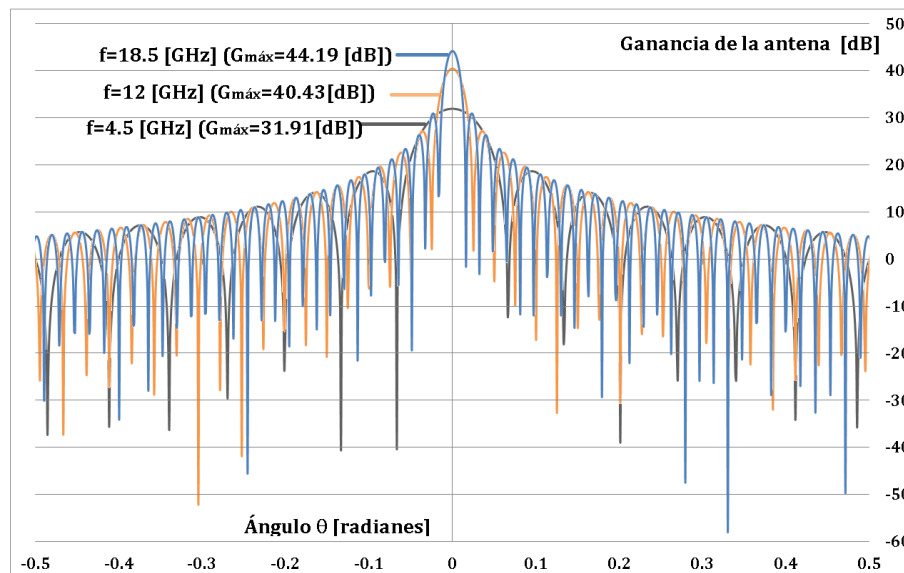


Fig. 4.38 Curvas de ganancia de la antena de bocina cuadrada para las distintas frecuencias

Por otra parte si comparamos el comportamiento de las curvas de ganancia para las dos antenas previamente simuladas veremos lo siguiente:

Notamos de las curvas de ganancia que:

- La antena de bocina cuadrada presenta mayores valores ganancia en el lóbulo principal, aunque la diferencia no es mucha respecto a los datos presentados en la tabla anterior (la diferencia es igual a 1.0491 [dB] en cada frecuencia de operación).
- Mientras que el ancho del haz siempre es menor en el caso de la bocina cuadrada. Sin embargo, la diferencia entre dichos valores se reduce conforme la frecuencia de operación se incrementada.
- Sin embargo, la antena parabólica presenta mejores características en los lóbulos secundarios del patrón de radiación. Los niveles de estos son menores, algo que se busca en el diseño de las antenas dado que minimiza el impacto de interferencia con algún otro sistema de comunicaciones terrestre o espacial.

Por tanto, al momento de elegir una de las dos antenas resultaría más conveniente elegir a la parabólica dadas las características que presentan sus lóbulos secundarios a pesar del menor nivel de ganancia máxima dentro de su patrón de radiación.

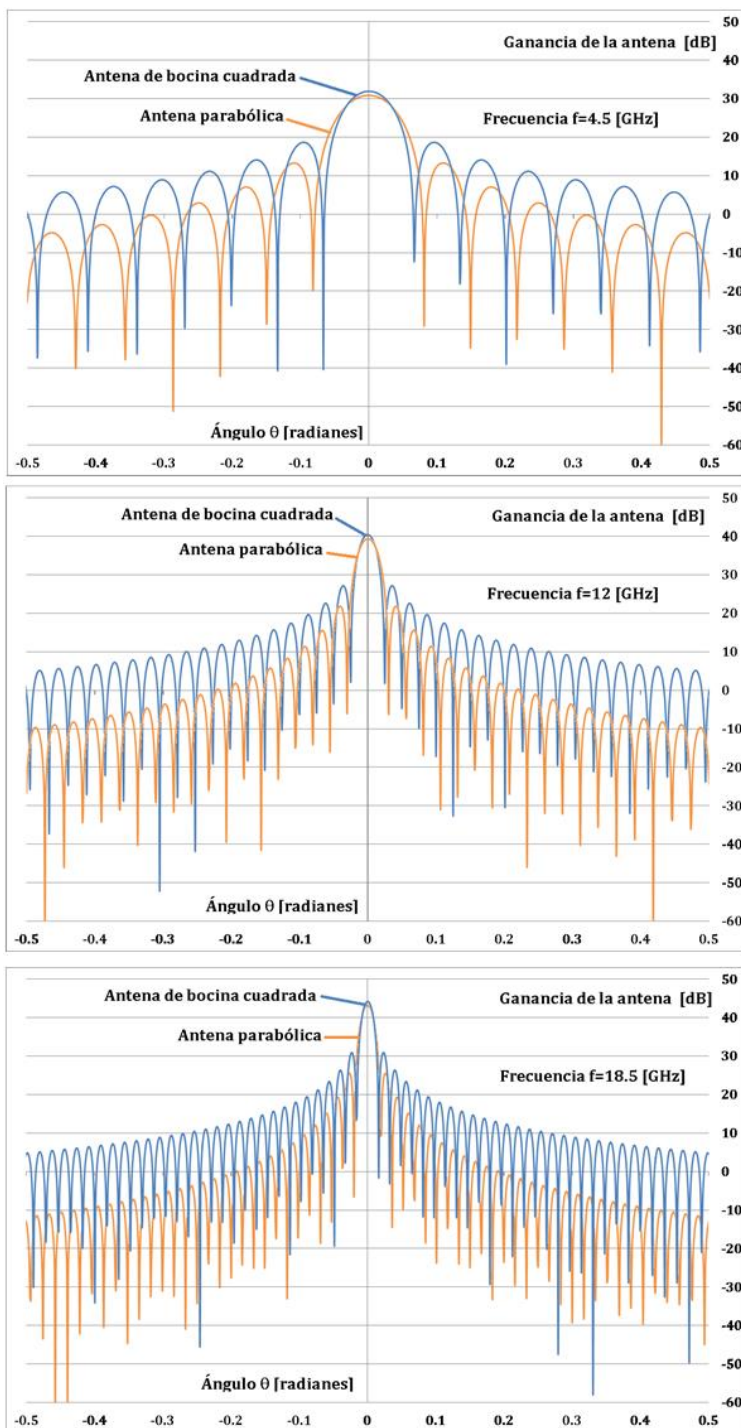


Fig. 4.39 Comparativa de las curvas de ganancia (antenas parabólica y bocina cuadrada)

Por último, empleando el equipo receptor de la estación terrena obtenemos los valores de algunos parámetros para el caso de la bocina cuadrada.

Los datos de los reportes generados se presentan en la siguiente tabla, el comportamiento de las distintas columnas es descrito por las expresiones matemáticas presentadas para el caso de estudio de la antena parabólica.

Tabla 4.5 Parámetros de recepción en la estación terrena para una antena de bocina cuadrada como función de la frecuencia

Frecuencia de operación [GHz]	PIRE [dBW]	Pérdidas de propagación [dB]	RIP [dBW]	Densidad de flujo [dBW/m ²]	C/N ₀ [dBHz]	C/N [dB]	E _b /N ₀ [dB]
4.5	61.924	-196.7375	-134.814	-196.7375	113.785244	38.7337	41.7440
12	70.443	-205.2568	-134.814	-91.774588	113.785241	38.7337	41.7440
18.5	74.203	-209.0166	-134.814	-88.014782	113.785238	38.7337	41.7440

Debido a los mejores niveles de ganancia en la bocina cuadrada, los valores que adquieren algunos datos de la tabla anterior son mayores a la tabla de la antena parabólica.

Con lo presentado en este primer proyecto se abordó el estudio de algunas propiedades de un par de antenas predefinidas en el programa para su uso dentro del escenario.

Observamos el comportamiento de las características del patrón de ganancia de manera visual a través de las representaciones en 2D y 3D. De tener en cuenta el análisis que se pudiera realizar con los demás tipos de antenas en STK.

Como se mencionó al principio de este proyecto no es de interés fundamental el examinar todos los tipos de antenas, con el par seleccionado es más que suficiente para entender lo que se pretende al momento de estudiarlas y diseñarlas.

Otro aspecto a tener en cuenta es que no todas las antenas posibles de seleccionar son para uso del satélite o de la estación terrena, existen modelos específicos que son empleados para otros elementos insertables en dentro del escenario (barcos, aviones, vehículos terrestres o en radares).

Para determinar cual antena es adecuada para cierta aplicación se debe conocer la información referente a cada modelo ya sea a través de libros o en Internet. En algunos casos será necesario consultar las recomendaciones de la UIT para entender cuales son los parámetros que definen el comportamiento de dicho dispositivo.

Por otra parte en STK tenemos la posibilidad de observar no solamente el nivel de ganancia obtenido por la antena, sino que también se puede analizar el valor del PIRE, la densidad de flujo de potencia y la (RIP).

El estudio generado entorno al diseño de elemento lo focalizamos en dos parámetros principales: el nivel de ganancia máximo y el ancho del haz presentes en el lóbulo principal del patrón de radiación.

Por otra parte no nos quedamos limitados a solamente emplear las antenas predefinidas, sino que contamos con la opción de emplear patrones de radiación específicos que no podamos obtener por el programa. Esto lo logramos a través del uso de aplicaciones externas a STK, lo que nos permitiría en principio evaluar las características de un modelo nuevo del cual no se tenga referencia.

CAPÍTULO 5

5.1. Análisis y diseño de un sistema de comunicaciones multihaz y multiportadora con STK

En este proyecto, lo que realizaremos será el análisis y diseño de un sistema de comunicaciones multihaz a través del uso de antena específica.

Después se configurará el caso multiportadora a través del uso de una antena ligada a los distintos equipos transmisores y receptores presentes en el escenario.

Se configura las características del entorno de simulación.

A través de la ventana “*Insert STK Objects*” podremos ingresar los distintos elementos en el escenario creado, en este caso ingresaremos un sistema base conformado por tres estaciones terrenas (*Facility*), tres receptores (*Receptor*), un satélite (*Satellite*), y un transmisor (*Transmitter*).

Primero insertamos las distintas estaciones terrenas a través del objeto “*Facility*” y en el método de inserción elegimos “*Select From City Database*”. Para su colocación habilitamos la opción “*Country*” y buscaremos por país.

En este caso particular ubicaremos las tres instalaciones en distintas regiones, la primera estará en Japón, la segunda en Australia y la última en Indonesia. Por lo que habrá que cambiar el nombre del “*Country*”.

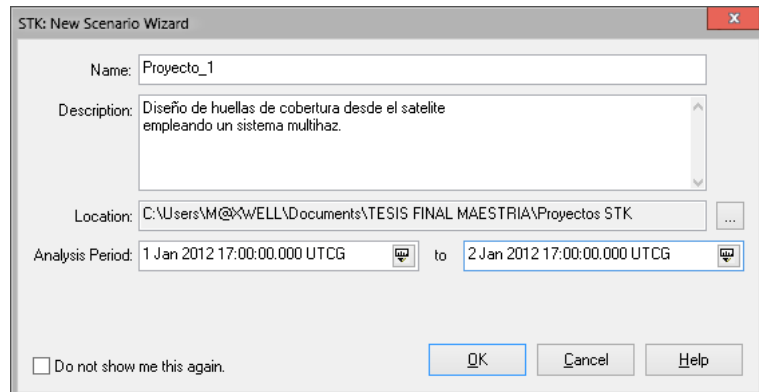


Fig. 5.1 Definición del escenario para el análisis y diseño de huellas de cobertura

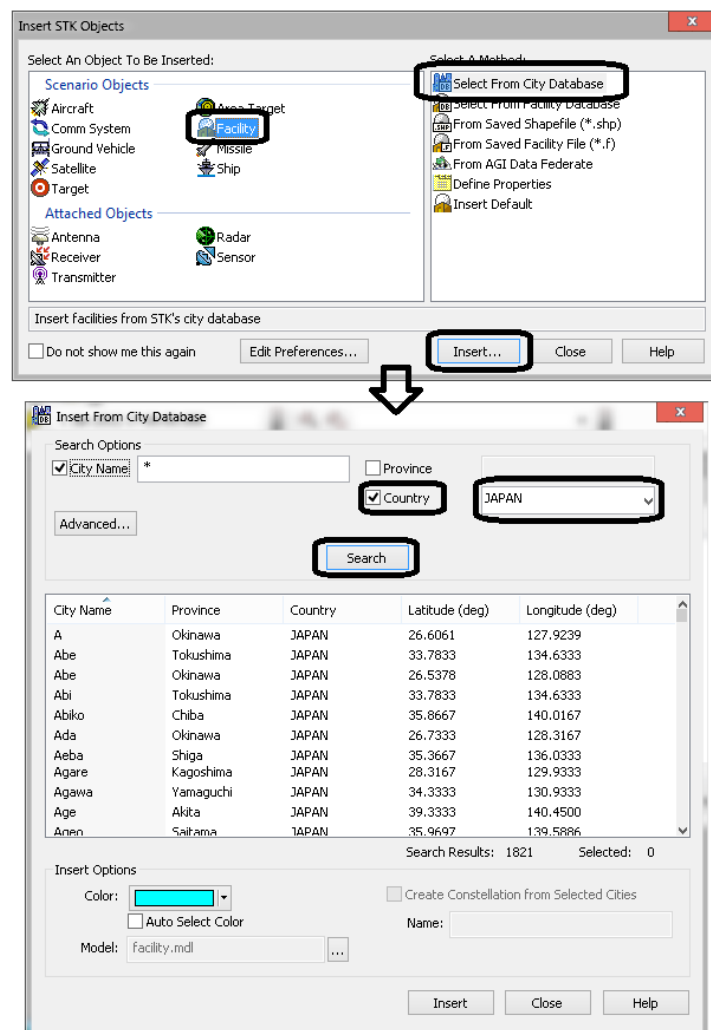


Fig. 5.2 Insertando y ubicando la estación terrena dentro del escenario

En este caso los valores de ubicación de las estaciones terrenas seleccionadas según STK son las siguientes:

Tabla 5.1 Datos de ubicación de las estaciones terrenas

Estación terrena	Latitud [°]	Longitud [°]
Japón	34.2333	132.6
Australia	-28.0833	120.5
Indonesia	2.3	116.883

A continuación ingresaremos el satélite al escenario con el objeto "Satellite" y elegimos el método "Orbit Wizard". Seleccionamos el tipo "Geosynchronous", definimos su posición orbital (130 ° Este) y un ángulo de inclinación de 0 [°].

Lo que sigue es insertar el transmisor en el satélite. Cambiaremos el modelo para este equipo en la ruta "Basic"->"Definition" y seleccionamos el tipo "Multibeam Transmitter Model".

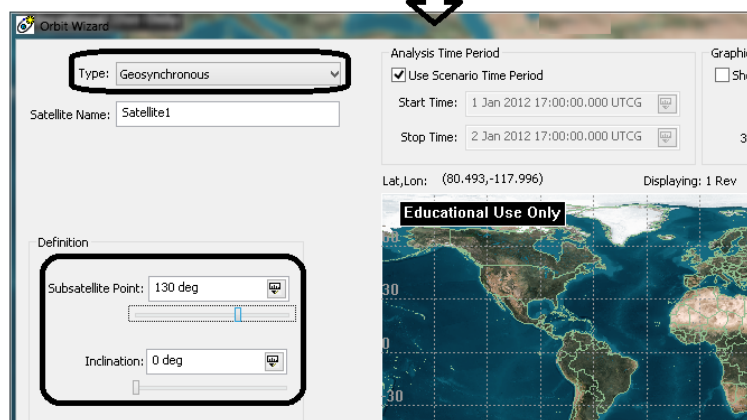
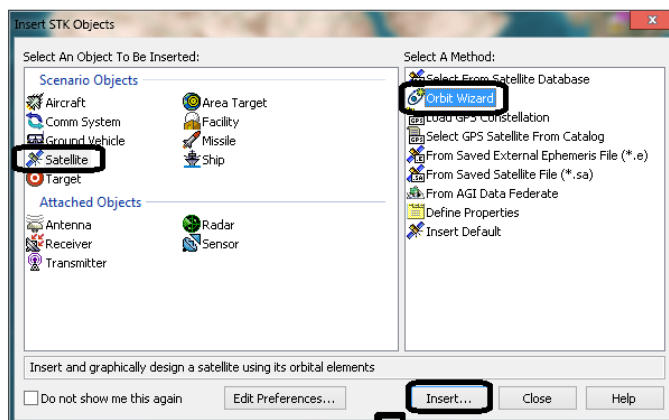


Fig. 5.3 Insertando y configurando el tipo órbita del satélite

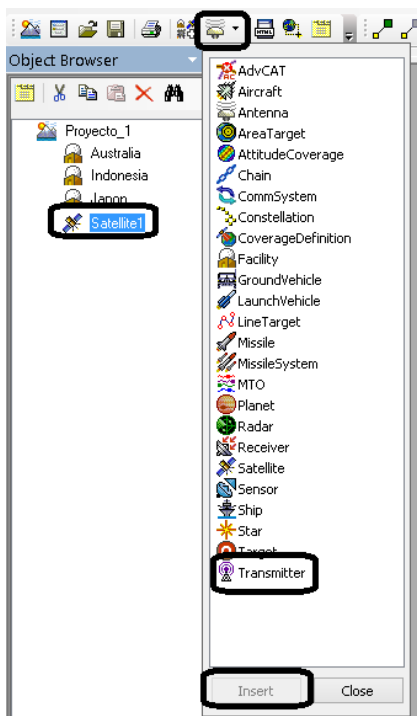


Fig. 5.4 Añadiendo un transmisor al satélite

El tipo elegido nos permite trabajar con un arreglo de antenas, cada haz es modelado de manera independiente con su propio patrón de radiación, ganancia, frecuencia, polarización y orientación.

Existen cuatro apartados a configurar. El primero es "Beams" en donde se puede: añadir, remover, duplicar y orientar los distintos haces.

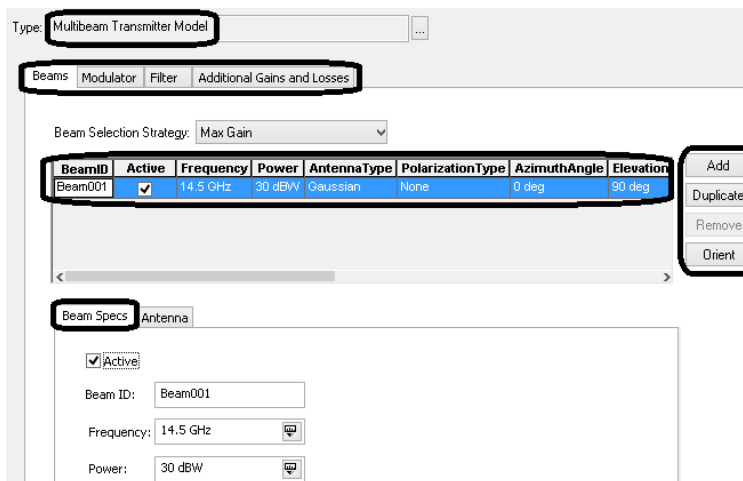


Fig. 5.5 Características del modelo de transmisor multihaz

Además cada haz posee distintos parámetros a configurar en las subpestañas "Beam Specs" y "Antenna".

En el caso del subapartado “*Beams Specs*” estableceremos que haz estará activo durante el proceso de simulación (habilitando o deshabilitando la opción “*Active*”), un identificador “*Beam ID*”, frecuencia de operación y niveles de potencia.

Mientras que en el subapartado “*Antenna*” tenemos tres secciones a configurar: las especificaciones del modelo “*Model Specs*” en donde elegimos el tipo de antena, la parte de la polarización “*Polarization*” y por último el aspecto de la orientación “*Orientation*”. Cada una de las modificaciones que realicemos para cada haz se visualiza en forma de tabla.

Los apartados restantes (“*Modulator*”, “*Filter*” y “*Additional Gains and Losses*”) ya fueron descritos en el capítulo anterior.

Para continuar con el proyecto, daremos dos veces clic sobre el botón “*Add*” para añadir los dos haces restantes.

Las principales características que modificaremos serán: la frecuencia de operación (que será distinta para los 3 haces), la antena (en este caso será de tipo “*Parabolic*”).

Lo siguiente que debemos hacer es orientar cada haz para que ilumine la región donde se encuentra la estación terrena correspondiente.

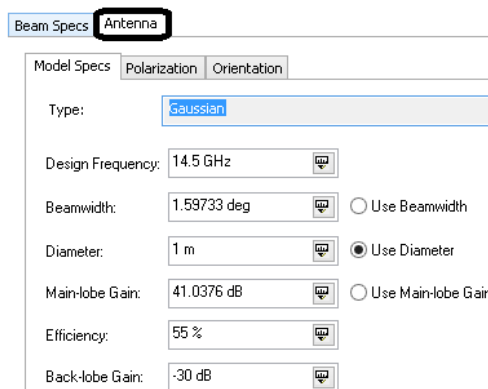


Fig. 5.6 Características de la antena para el sistema multihaz

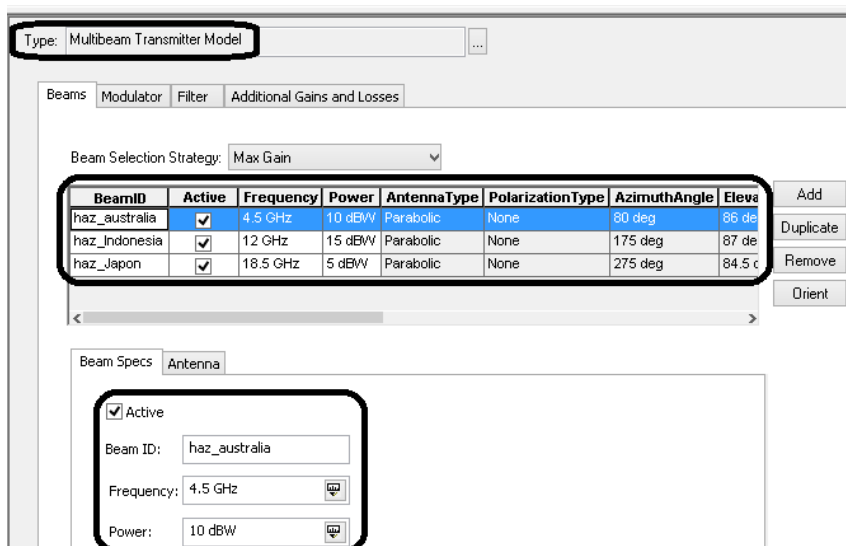


Fig. 5.7 Configurando los tres haces del sistema multihaz

En este caso no emplearemos a los objetos sensores dado que no es posible⁷⁸ para este tipo de transmisor, así que habrá que configurar manualmente la orientación de cada haz. Las siguientes tablas resumen los valores definidos para las tres antenas.

Tabla 5.2 Características de orientación de los distintos haces en el satélite

Haz	Azimut [°]	Elevación [°]
Haz hacia Australia	80	86
Haz hacia Indonesia	175	87
Haz hacia Japón	275	84.5

⁷⁸ Se puede emplear un sensor para orientar los patrones de radiación del sistema multihaz en conjunto y no de manera individual.

Tabla 5.3 Parámetros de los distintos haces en el satélite

Haz	Frecuencia [GHz]	Potencia [dBW]	Diámetro [m]	Ganancia [dB]	Ancho del haz [°]	Eficiencia
Haz hacia Australia	4.5	10	3.9278	42.7574	1	55 %
Haz hacia Indonesia	12	15	2.94582	46.815	0.5	55 %
Haz hacia Japón	18.5	5	1.06156	43.6726	0.9	55 %

No modificaremos las características de los otros apartados de definición.

Ahora procedemos a configurar la representación 2D del patrón de radiación, para ello nos dirigimos al apartado "2D Graphics" de las propiedades del transmisor y en el subapartado "Contours".

En este caso graficaremos los contornos de ganancia generados por el sistema multihaz. Los cuales estarán normalizados al valor máximo obtenido.

Establecemos un rango de variación 0 [dB] a -30 [dB] con incrementos de -3 [dB]. Configuramos también la resolución para la representación de dichos contornos de ganancia.

Además también especificaremos las características de la representación 3D en el apartado "3D Graphics" y subapartado "Attributes".

La siguiente imagen muestra las configuraciones 2D y 3D.

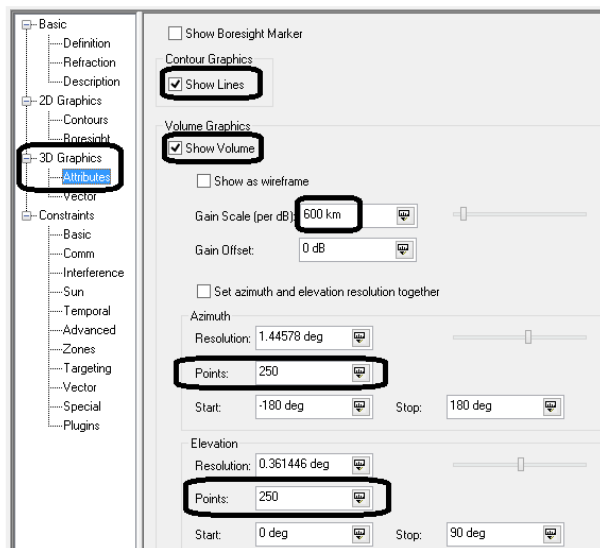
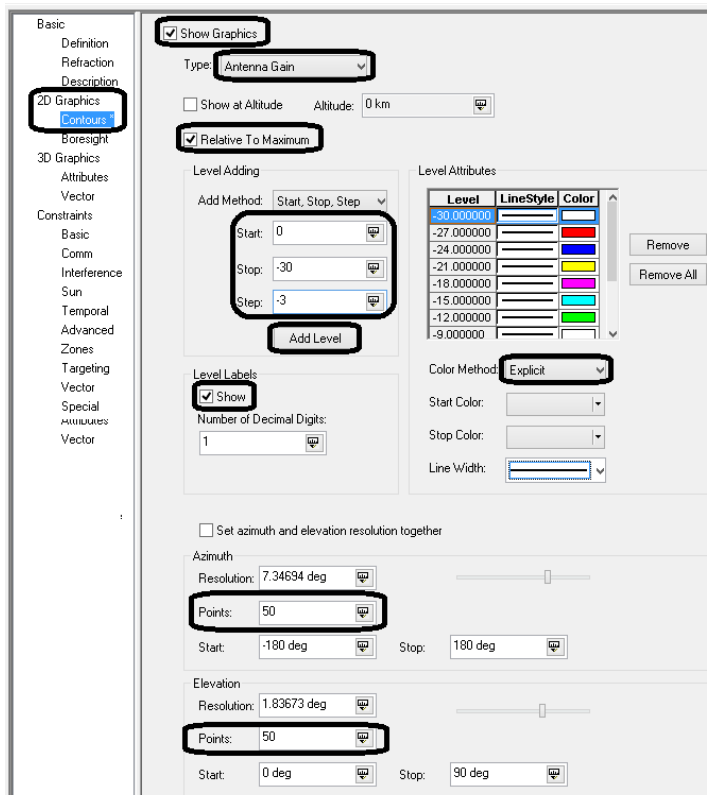


Fig. 5.8 Configurando los gráficos 2D y 3D

A continuación se muestran las huellas de cobertura generadas por el sistema multihaz.

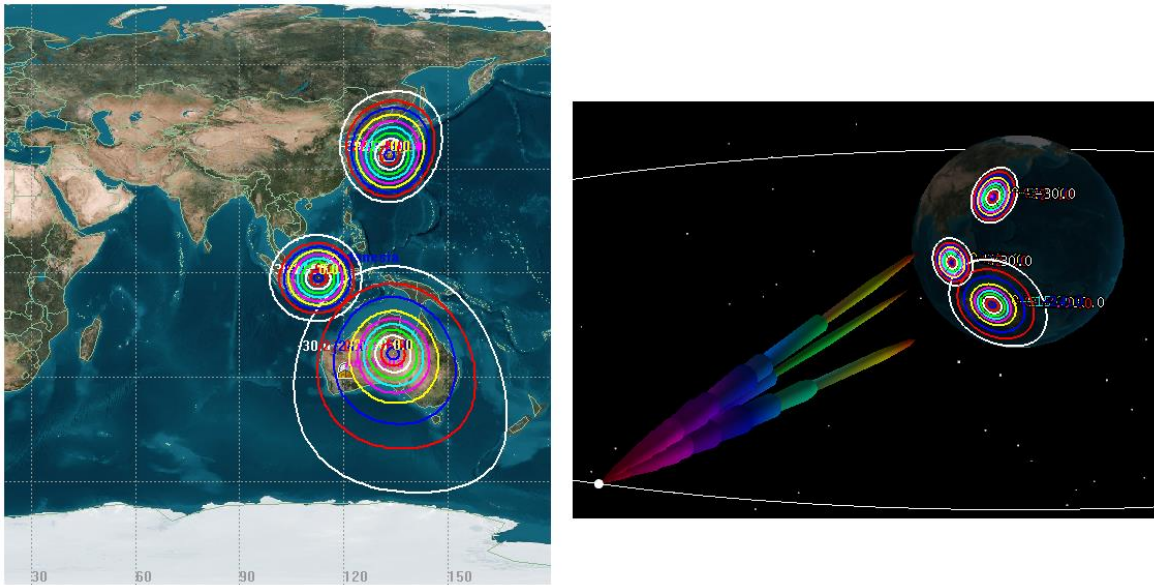


Fig. 5.9 Representación 2D y 3D de las huellas de cobertura y patrón de radiación del sistema multihaz

A continuación añadiremos un receptor a cada estación terrena con la finalidad de obtener datos de ciertos parámetros.

En cada uno de estos equipos mantendremos habilitada la opción “Auto Track” para sincronizar la frecuencia de recepción con la del haz (correspondiente al que ilumina la zona donde se encuentra la estación terrena). Además dejaremos el nivel de la figura de mérito (G/T) en 20 [dB/K].

A continuación debemos obtener los reportes, para ello seleccionamos al receptor de cada estación terrena y damos clic en el botón “Access” ubicado en la barra de herramientas de STK.

Esto nos abrirá una ventana dentro de la cual seleccionamos al transmisor del satélite en el apartado “Associated Objects” y después dar clic en “Compute” para calcular el acceso.

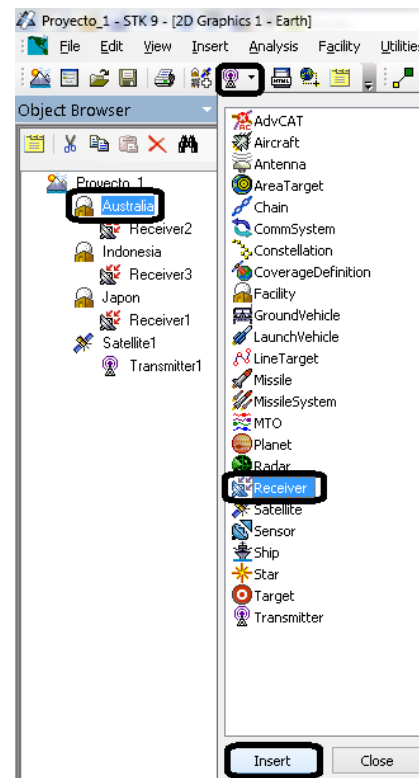


Fig. 5.10 Insertando un receptor a cada estación terrena

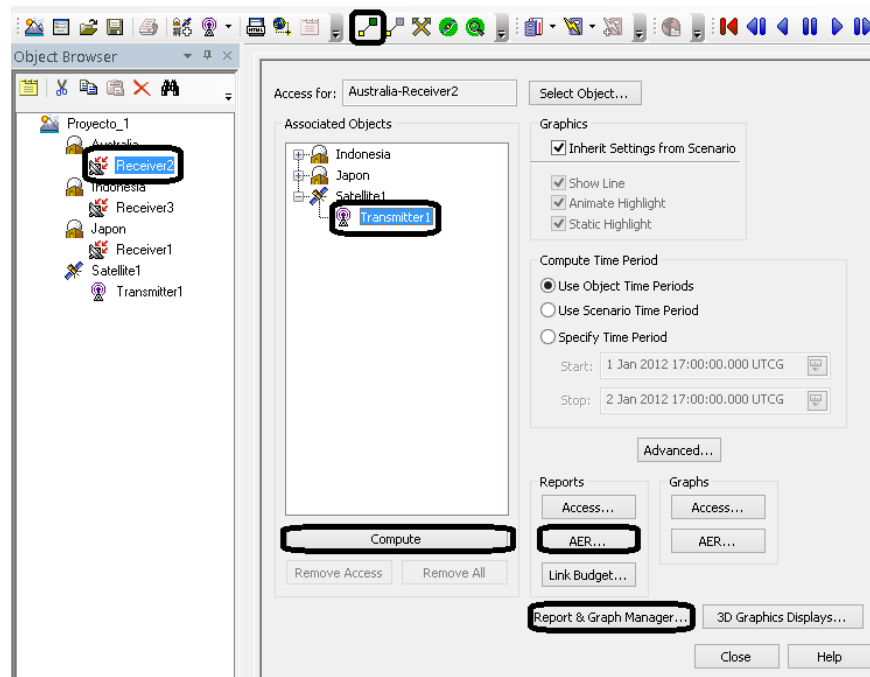


Fig. 5.11 Utilizando la herramienta "Access" para obtener el informe de acceso al satélite

Después damos clic en el botón "AER" para obtener los datos de los parámetros azimut, elevación y rango de la estación terrena seleccionada.

Después nos regresamos a la pestaña anterior y hacemos presionamos en el botón "Report & Graph Manager".

Se nos abre otra ventana, dentro de ella nos dirigimos al apartado "Styles" y dejamos marcada solamente la opción "Show Reports".

Abrimos la carpeta "Installed Styles" y seleccionamos la opción "Link Budget - Detailed" y por último damos clic en "Generate".

Time (UTC)	Azimuth (deg)	Elevation (deg)	Range (km)
1 Jan 2012 17:00:00.000	19.584	55.598	36745.317627
1 Jan 2012 17:01:00.000	19.584	55.598	36745.317627
1 Jan 2012 17:02:00.000	19.584	55.598	36745.317627
1 Jan 2012 17:03:00.000	19.584	55.598	36745.317627

Fig. 5.12 Datos de azimut, elevación y rango para la estación terrena de Australia

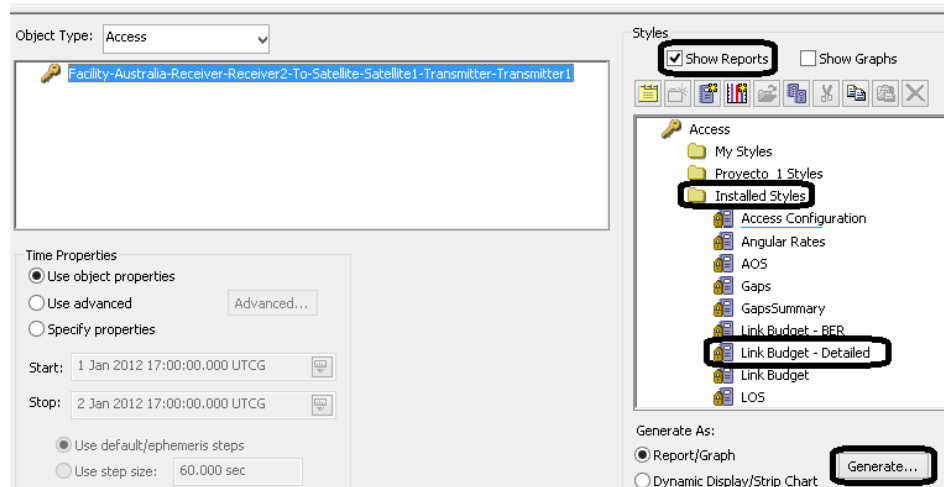


Fig. 5.13 Generación de un reporte detallado de la estación terrena en Australia

Esto nos genera un reporte detallado de distintos parámetros involucrados en la conexión.

Time (UTC)	Xmitr Power (dBW)	Xmitr Gain (dB)	EIRP (dBW)	Free Space Loss (dB)	Atmos Loss (dB)	Rain Loss (dB)
1 Jan 2012 17:00:00.000	10.000	10.0841	20.084	-196.8161	0.0000	0.0000
1 Jan 2012 17:01:00.000	10.000	10.0841	20.084	-196.8161	0.0000	0.0000
1 Jan 2012 17:02:00.000	10.000	10.0841	20.084	-196.8161	0.0000	0.0000
1 Jan 2012 17:03:00.000	10.000	10.0841	20.084	-196.8161	0.0000	0.0000
1 Jan 2012 17:04:00.000	10.000	10.0841	20.084	-196.8161	0.0000	0.0000
1 Jan 2012 17:05:00.000	10.000	10.0841	20.084	-196.8161	0.0000	0.0000
1 Jan 2012 17:06:00.000	10.000	10.0841	20.084	-196.8161	0.0000	0.0000

Fig. 5.14 Reporte generado para la estación terrena de Australia

El mismo procedimiento realizamos para las estaciones terrenas restantes, los resultado recabados son los siguientes.

Tabla 5.4 Características de azimut, elevación y rango de las estaciones terrenas hacia el satélite

Estación terrena	Azimut [°]	Elevación [°]	Rango [km]
Australia	19.584	55.598	36 745.317627
Indonesia	99.762	74.349	35 989.452927
Japón	184.620	50.144	37 065.842822

Tabla 5.5 Valores de los parámetros de recepción en cada estación terrena

Estación terrena	Frecuencia de recepción [GHz]	Potencia de Tx [dBW]	Ganancia de Tx [dB]	PIRE [dBW]	Pérdidas de espacio libre [dB]	RIP [dBW]
Australia	4.5	10	10.0841	20.084	-196.8161	-176.732
Indonesia	12	15	26.5009	41.501	-205.1549	-163.654
Japón	18.5	5	43.4794	48.479	-209.1707	-160.691

Tabla 5.6 Valores de los parámetros de recepción en cada estación terrena (continuación)

Estación terrena	Densidad de flujo [dBW/m ²]	G/T [dB/K]	C/N ₀ [dBHz]	C/N [dB]	E _b /N ₀ [dB]
Australia	-142.212037	20	71.867167	-3.1843	-0.1740
Indonesia	-120.614669	20	84.945160	9.8937	12.9040
Japón	-113.892209	20	87.907811	12.8563	15.8666

A partir de los datos anteriores establecemos los siguientes comentarios:

- Las características de azimut, elevación y rango específicos de cada estación terrena, nos permite conocer la orientación de la antena hacia el satélite y la distancia de separación del equipo Tx al Rx.
- En el caso de la frecuencia de recepción en cada estación terrena, está corresponde con la empleada para el diseño del haz que apunta a dicha zona.

Se verifica que se están ofreciendo distintos servicios en bandas diferentes por el mismo satélite.

- Después tenemos el apartado de la potencia que corresponde al nivel establecido en el sistema multihaz.

- En cuanto al nivel de ganancia de transmisión (este no debe de ser confundido con el nivel máximo del lóbulo principal), sino que este valor corresponde a la zona dentro de la cual se encuentra ubicada la estación terrena en los contornos de ganancia generados.
- Enseguida tenemos el valor del PIRE que corresponde a la suma de la potencia (P_{Tx}) y ganancia de (G_{Tx}).

$$[PIRE]_{dBW} = [G_{Tx}]_{dB} + [P_{Tx}]_{dBW}$$

- Después tenemos las pérdidas de propagación por espacio libre que dependen de la frecuencia de operación (f) y la distancia de separación entre la estación terrena y el satélite (R).

$$[L_{FSL}]_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{c}{4\pi R f} \right)^2$$

- En el caso de la potencia isotrópica recibida (RIP), este parámetro corresponde a la suma del valor del PIRE junto con las pérdidas de propagación por espacio libre.

$$[RIP]_{dBW} = [PIRE]_{dBW} + [L_{FSL}]_{dB}$$

- La densidad de flujo de potencia adquiere su valor de la suma del PIRE, cualquier pérdida debido a efectos atmosféricos (por lo que no interviene la de propagación por espacio libre) y un factor que depende del cuadrado de la distancia de separación entre transmisor y receptor.

$$\text{Densidad de flujo} = [PIRE]_{dBW} + [L_A]_{dB}^{0[dB]} - 10 \log_{10} (4\pi R^2)$$

- Para el caso de la relación (C/N_0) está viene dada por la expresión.

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{dB-Hz} = [PIRE]_{dBW} + [L_{FSL}]_{dB} + [L_A]_{dB}^{0[dB]} + \underbrace{\left[\frac{G}{T} \right]_{dB/K}}_{20 \left[\frac{dB}{K} \right]} - 10 \log_{10} \left(\frac{k}{1.3806 \times 10^{-23} \left[\frac{J}{K} \right]} \right)$$

En este caso notamos de la tabla, que los valores para (C/N_0) ya no es el mismo como sucedió en el primer proyecto, esto debido a las modificaciones de las condiciones de cada estación terrena en cuanto a su ubicación geográfica y a la configuración establecida para cada haz generado desde el transmisor en el satélite.

- Y por último tenemos los valores de (C/N) y (E_b/N_0), que están dadas por las siguientes expresiones.

$$\left(\frac{C}{N} \right)_{dB} = \left(\frac{C}{N_0} \right)_{dB-Hz} - 10 \log_{10} \left(\frac{BW}{36 \times 10^6 [Hz]} \right) \quad \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{dB} = \left(\frac{C}{N_0} \right)_{dB-Hz} - 10 \log_{10} \left(\frac{R_{bps}}{16 \times 10^6 [bps]} \right)$$

Ahora continuamos con la configuración del sistema multiportadora, que a diferencia del multihaz no se emplean distintas antenas para los diversos haces creados.

Comenzamos insertando otro satélite en una órbita geoestacionaria a través del método "Orbit Wizard" con las siguientes configuraciones: posición orbital 113 ° E y inclinación de 0 °.

Lo siguiente que añadiremos será una estación terrena transmisora a través del método "Insert From City Database", en donde habilitamos la opción "Country" y buscamos MEXICO y finalmente damos clic en el botón "Search". Seleccionamos una ubicación en el Distrito Federal.

Antes de continuar es necesario saber que en STK trabajamos con dos modos de antenas.

- El primero es el de "antenas ligadas" a los equipos transmisor o receptor (en esta situación debemos emplear el objeto "Antenna").
- El segundo es el de "antenas integradas" que ya vienen definidas dentro de los equipos Tx o Rx.

Lo siguiente insertaremos son los sensores para orientar los patrones de radiación en las direcciones correctas de. En este caso necesitaremos un sensor para la estación terrena y uno para el satélite. A cada uno de ellos estará ligada una antena, la cual será compartida por los distintos equipos transmisores o receptores empleados en el sistema.

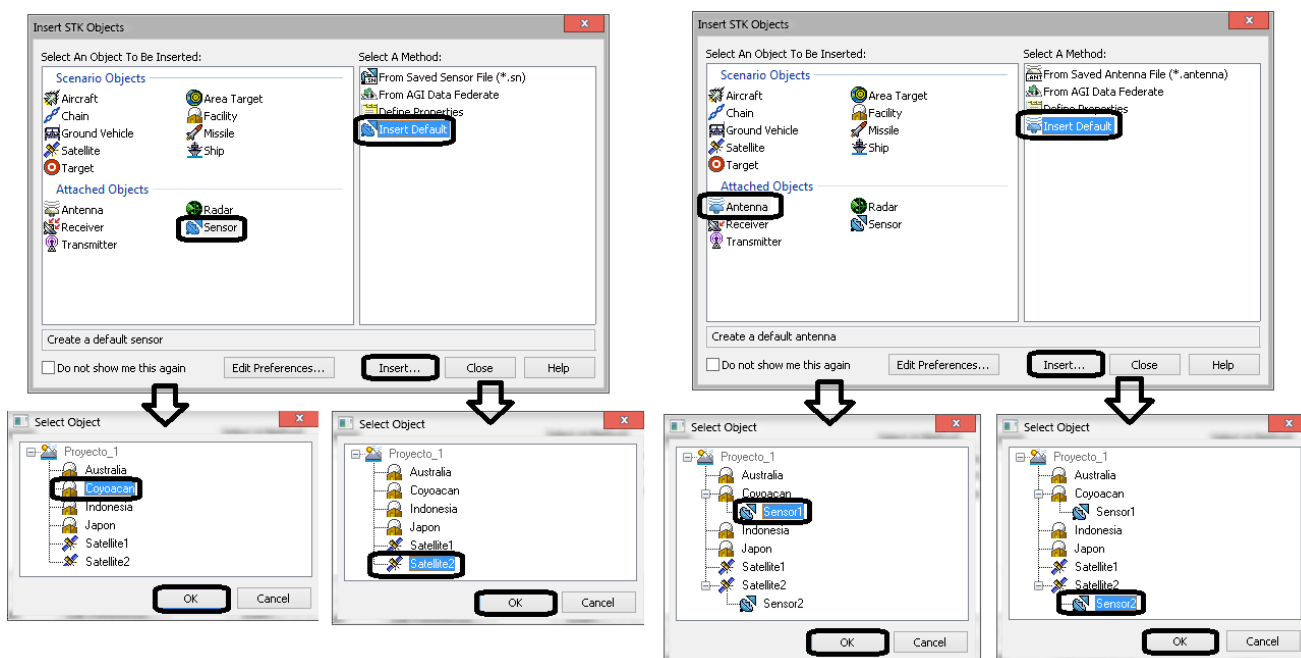


Fig. 5.15 Insertando sensores y antenas en el sistema multiportadora

A continuación ingresaremos tres equipos transmisores a la estación terrena y tres receptores al satélite.

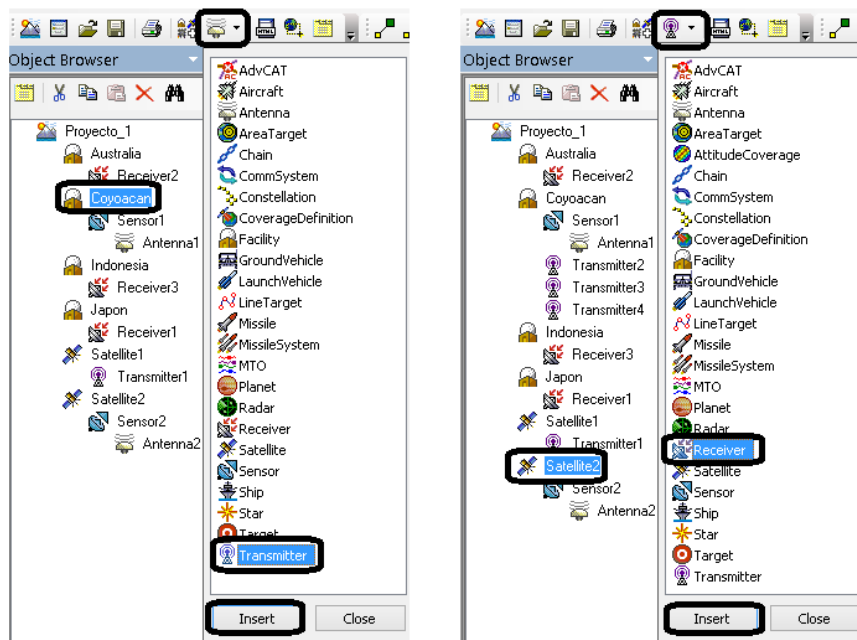


Fig. 5.16 Insertando los transmisores a la estación terrena y los receptores al satélite

Lo siguiente que realizaremos será cambiar el tipo y la orientación de los sensores (de la estación terrena y del satélite).

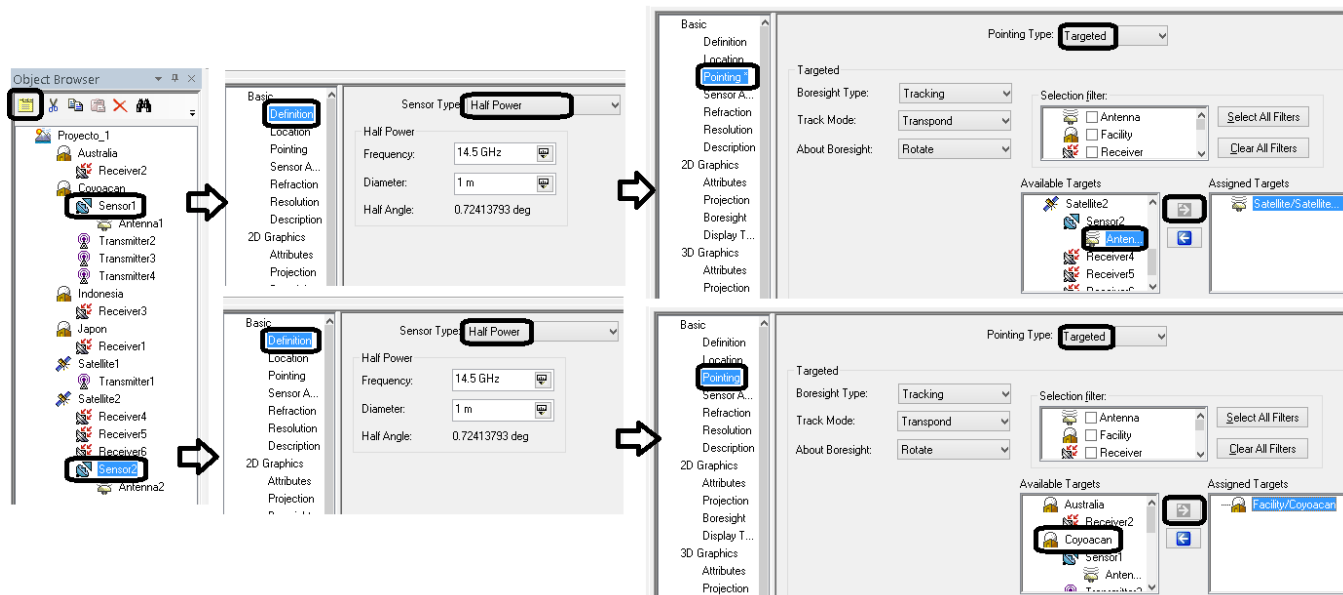


Fig. 5.17 Modificación del tipo y orientación de los sensores

Ahora configuraremos las antenas insertadas, estableceremos el tipo "Parabolic" y cambiaremos el diámetro a 5 [m] (estación terrena) y 1 [m] (satélite).

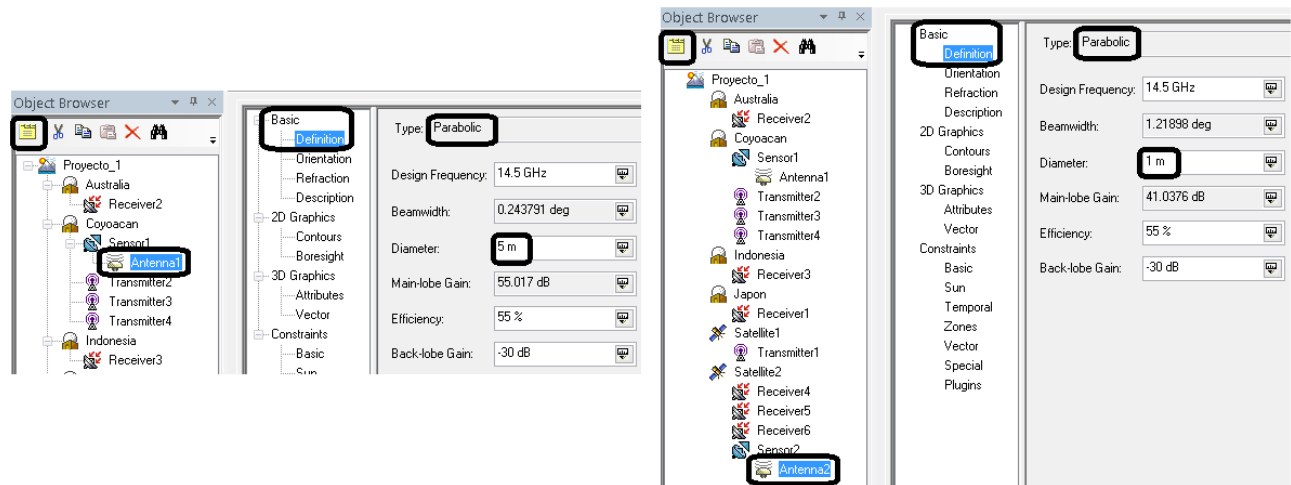


Fig. 5.18 Configuración de las antenas de la estación terrena y el satélite

Lo siguiente que haremos será configurar los equipos.

Cambiamos el tipo de transmisor a “Complex Transmitter Model”, en la pestaña “Model Specs” estableceremos una frecuencia de 11.7 [GHz] y una potencia de 1 [dBW]. En “Antena” seleccionamos la opción “Link” en el tipo de referencia, esto automáticamente nos selecciona la antena que contiene la estación terrena en el apartado “Antenna Name”. Por último en la pestaña “Modulator” cambiamos la tasa de datos a 1 [Mbps] y el tipo de modulación a QPSK.

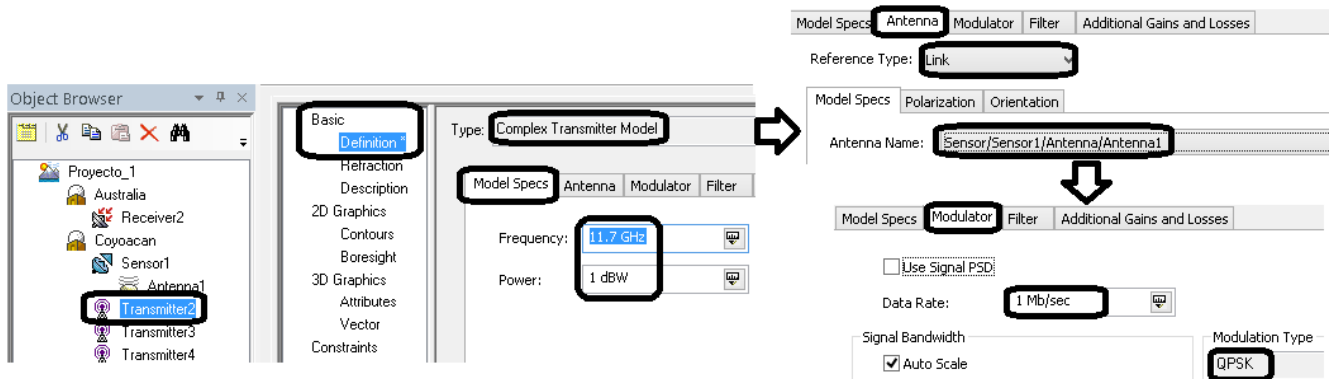


Fig. 5.19 Configuración del equipo transmisor

La configuración para los otros dos equipos transmisores es en los mismos apartados salvo por los valores establecidos, la siguiente tabla los resume.

Tabla 5.7 Configuraciones de los equipos transmisores

Equipo transmisor	Frecuencia [GHz]	Potencia [dBW]	Tipo de referencia	Tasa de transmisión [Mbps]	Tipo de modulación
1	11.7	1	Link	1	QPSK
2	11.8	1.1	Link	2	QPSK
3	11.9	1.2	Link	3	QPSK

En el caso de los receptores del satélite, la configuración que estableceremos será cambiar el tipo por "Complex Receiver Model".

En la pestaña "Model Specs" debemos desmarcar la opción "Auto Track" y definir a que frecuencia queremos recibir dependiendo del equipo transmisor.

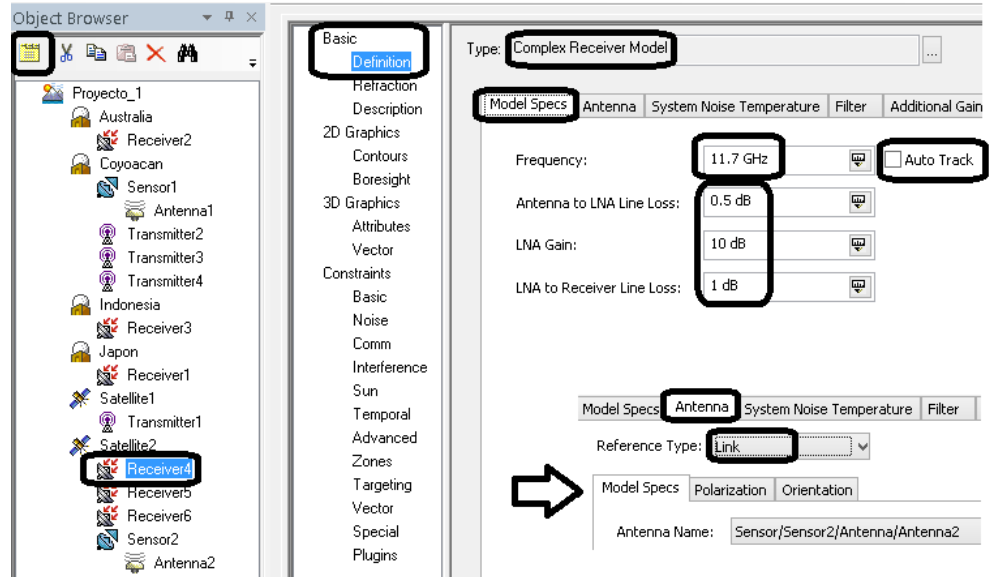


Fig. 5.20 Configuración del equipo receptor

La siguiente tabla muestra la configuración individual.

Tabla 5.8 Configuraciones de los equipos receptores

Equipo receptor	Frecuencia [GHz]	Pérdidas de la antena al LNA [dB]	Ganancia del LNA [dB]	Pérdidas del LNA al receptor [dB]	Tipo de referencia
1	11.7	0.5	10	1	Link
2	11.8	0.3	5	0.5	Link
3	11.9	0.7	3	0.3	Link

Por último necesitamos generar los reportes para las tres portadoras, para ello seleccionamos cualquier equipo receptor y damos clic en el icono "Access..." ubicado en la barra de herramientas.

Esto nos abre una ventana en la cual nos dirigimos a la sección "Associated Objects" y buscamos al transmisor con el que se encuentra asociado en la estación terrena.

Después damos clic en el botón "Compute" y enseguida apretamos el botón "Report & Graph Manager".

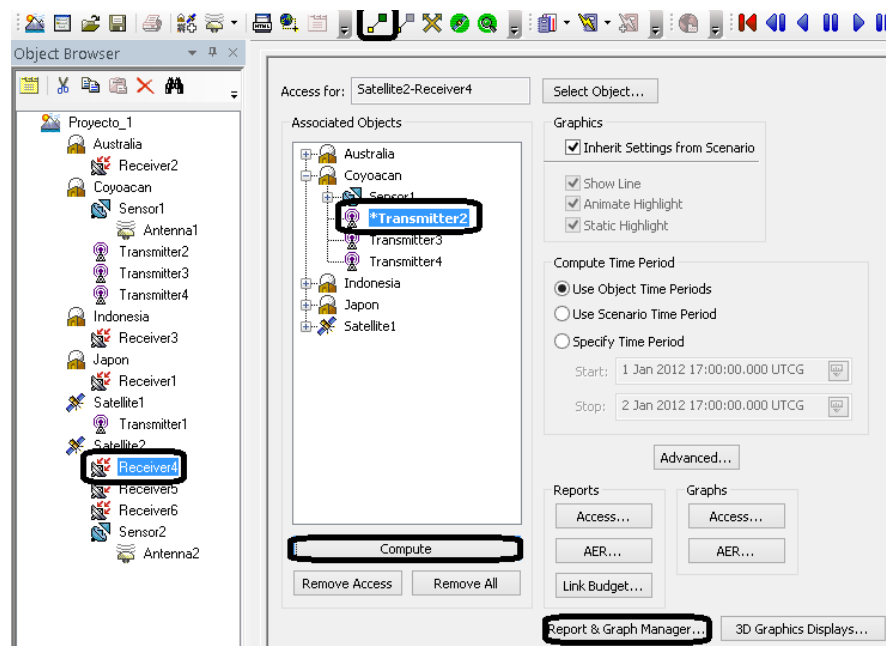


Fig. 5.21 Estableciendo el acceso del transmisor al receptor del satélite

Nos dirigimos a la sección “Styles” y dejamos solamente marcada la opción “Show Reports”.

Seguidamente vamos a la carpeta “Installed Styles”, buscamos el reporte “Link Budget- Detailed” y damos clic en el botón “Generate”.

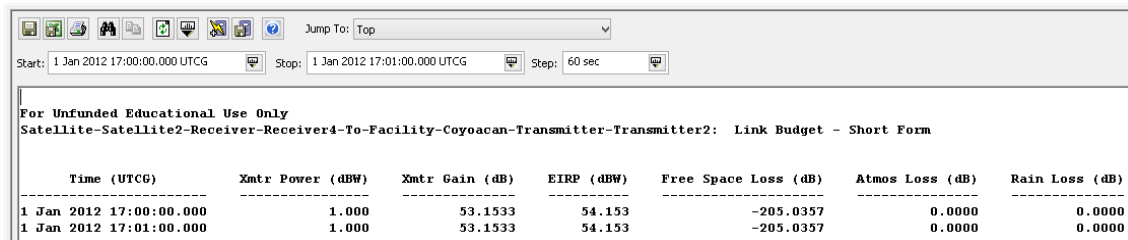


Fig. 5.22 Reporte del enlace de comunicaciones

A continuación se presenta una tabla que resume los valores obtenidos para las distintas portadoras.

Tabla 5.9 Parámetros para las distintas portadoras

Portadora	Potencia de Tx [dB]	Ganancia de Tx [dB]	PIRE [dBW]	Pérdidas de propagación de espacio libre [dB]	RIP [dBW]	Frecuencia [GHz]
1	1	53.1533	54.153	-205.0357	-150.882	11.7
2	1.1	53.2272	54.327	-205.1097	-150.782	11.8
3	1.2	53.3005	54.501	-205.1830	-150.682	11.9

Tabla 5.10 Parámetros para las distintas portadoras (continuación)

Portadora	Densidad de flujo de potencia [dBW/m²]	Ganancia de Rx [dB]	Figura de mérito [dB/K]	C/N ₀ [dBHz]	C/N [dB]	E _b /N ₀ [dB]
1	-108.063044	39.1739	14.54994755	92.2666	32.2666	32.2666
2	-107.889121	39.2479	14.62387046	92.4405	29.4303	29.4303
3	-107.715823	39.3211	14.69716954	92.6138	27.8426	27.8426

A partir de los datos anteriores generamos los siguientes comentarios.

- El nivel de potencia de transmisión corresponde al valor establecido en cada señal en la estación terrena.
- Después tenemos la ganancia, la cual es diferente dado que cada una opera en una frecuencia diferente. Su valor viene dado por la expresión siguiente:

$$G_{Tx} [dB] = 10 \log_{10} \left[\eta \left(\frac{\pi f_{portadora} D_{Tx}}{c} \right)^2 \right] \rightarrow c = 2.99792458 \times 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]$$

- En el caso del PIRE con el que se envía cada portadora, su valor corresponde a la suma:

$$PIRE_{portadora} [dBW] = [P_{Tx}]_{dBW} + [G_{Tx}]_{dB}$$

- En seguida tenemos las pérdidas de propagación a través de la atmosfera:

$$[L_{FSL}]_{dB} = 10\log_{10} \left(\frac{c}{4\pi R f_{portadora}} \right)^2$$

- La siguiente columna representa la potencia isotrópica recibida (RIP):

$$RIP[dBW] = [PIRE]_{dBW} + [L_{FSL}]_{dB}$$

- Después tenemos la frecuencia de recepción. Se verifica que su valor corresponda con la de transmisión (de lo contrario el reporte obtenido contendrá valores erróneos).

- Para la densidad de flujo su nivel viene dado por:

$$\text{Densidad de flujo} = [PIRE]_{dBW} + [L_A]_{dB} - 10\log_{10}(4\pi R^2)$$

0[dB]

- Para el caso de la ganancia de recepción, vemos que es diferente para las tres señales dado que cada una opera en una frecuencia diferente.

$$G_{Rx}[dB] = 10\log_{10} \left[\eta \left(\frac{\pi f_{portadora} D_{Rx}}{c} \right)^2 \right]$$

- En seguida tenemos el valor que adquiere la figura de mérito (G/T) que se encuentra ligado al parámetro anterior y a la temperatura de ruido del sistema (valor constante de 290 K).

$$\left[\frac{G}{T} \right]_{dB/K} = [G_{Rx}]_{dB} - 10\log(T_{sistema})$$

- Por último están los tres principales parámetros que nos permite evaluar el rendimiento del enlace.

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{dB-Hz} = [PIRE]_{dBW} + [L_{FSL}]_{dB} + [L_A]_{dB} + \left[\frac{G}{T} \right]_{dB/K} - 10\log_{10}(k)$$

$$\left(\frac{C}{N} \right)_{dB} = \left(\frac{C}{N_0} \right)_{dB-Hz} - 10\log_{10}(BW) \quad \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{dB} = \left(\frac{C}{N_0} \right)_{dB-Hz} - 10\log_{10}(R_{bps})$$

En este escenario, la tasa de transmisión y su correspondiente ancho de banda son diferentes dado que así se configuro en cada uno de los equipos transmisores.

Con este proyecto se muestran las capacidades de STK para modelar sistemas multihaz en distintas bandas de operación. Estos presentan una serie de ventajas respecto a los modelos tradicionales de cobertura regional o continental.

En principio mencionamos que estos permiten concentrar las huellas de cobertura en regiones más pequeñas, algo muy útil en caso de que la región de interés presente condicionantes atmosféricos que pudieran degradar el rendimiento del enlace.

Dado que el nivel de atenuación por lluvia es función de la frecuencia de operación, es común cambiar la banda (de Ka a Ku o C). Sin embargo esto reduce las capacidades de transmisión, específicamente en el ancho de banda y la tasa de transmisión.

Un aspecto de estudio que se pudiera desarrollar en este tipo de sistemas multihaz está relacionado con los efectos de interferencia debido a la presencia de diversos haces puntuales generados desde la misma antena en satélite.

Por otra parte analizamos las características de diseño de esquemas multiportadora en el programa. Notamos que no es posible orientar de manera independiente cada portadora sino que todas comparten el mismo apuntamiento.

El escenario multiportadora puede ser enfocado al estudio de los efectos de intermodulación y cuantificar su impacto sobre el rendimiento global del sistema.

5.2. Análisis y diseño de una huella de cobertura para la República Mexicana con STK

En este proyecto se desarrollará la conformación de una huella de cobertura lo más parecida al contorno del área de interés (republica mexicana).

A diferencia del escenario anterior en el que utilizábamos distintas frecuencias para cada haz generado, en este serán diseñados para el mismo valor y características para los distintos haces puntuales empleados.

Se configura el nuevo escenario.

Habiendo realizado lo anterior, lo siguiente será ingresar un satélite con el método de inserción “Orbit Wizard” que nos abre un asistente para la configuración de la órbita del satélite.

Primero cambiamos al tipo “Geosynchronous” y las características de su posición orbital y ángulo de inclinación mostrados en la figura.

Además insertaremos una estación terrena junto con un equipo receptor para estudiar el comportamiento de distintos parámetros ante las variaciones que generemos en la conformación de la huella de cobertura.

En este caso seleccionaremos la opción “Select From City Database” y habilitaremos las opciones “Province” y “Country” para ubicar a la estación terrena en el Distrito Federal en México.

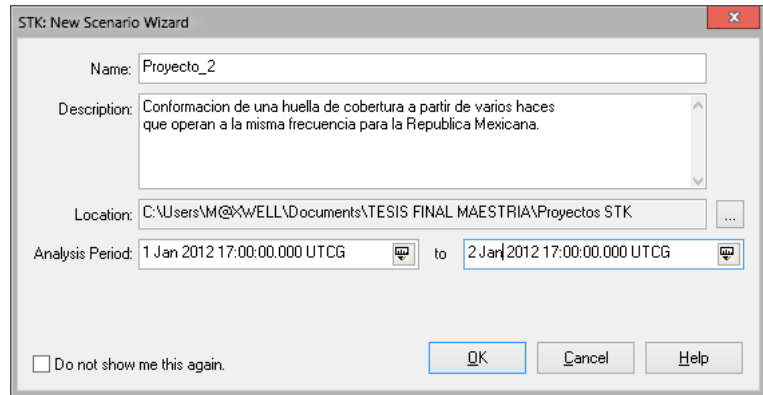


Fig. 5.23 Generación de un nuevo escenario para la conformación de una huella de cobertura sobre México

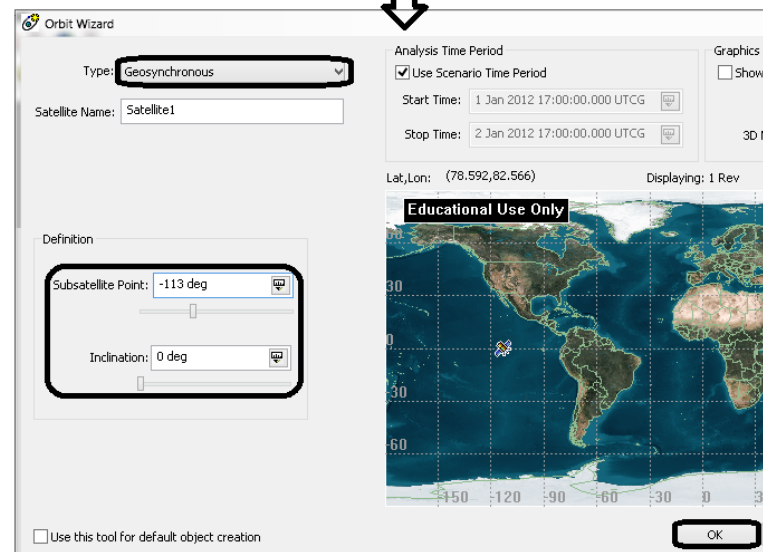
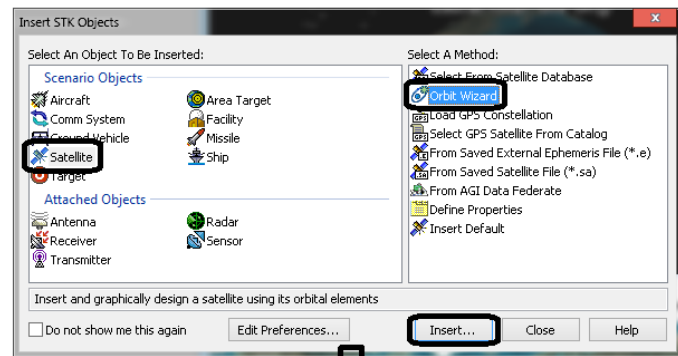


Fig. 5.24 Insertando el satélite al escenario para la conformación de la huella

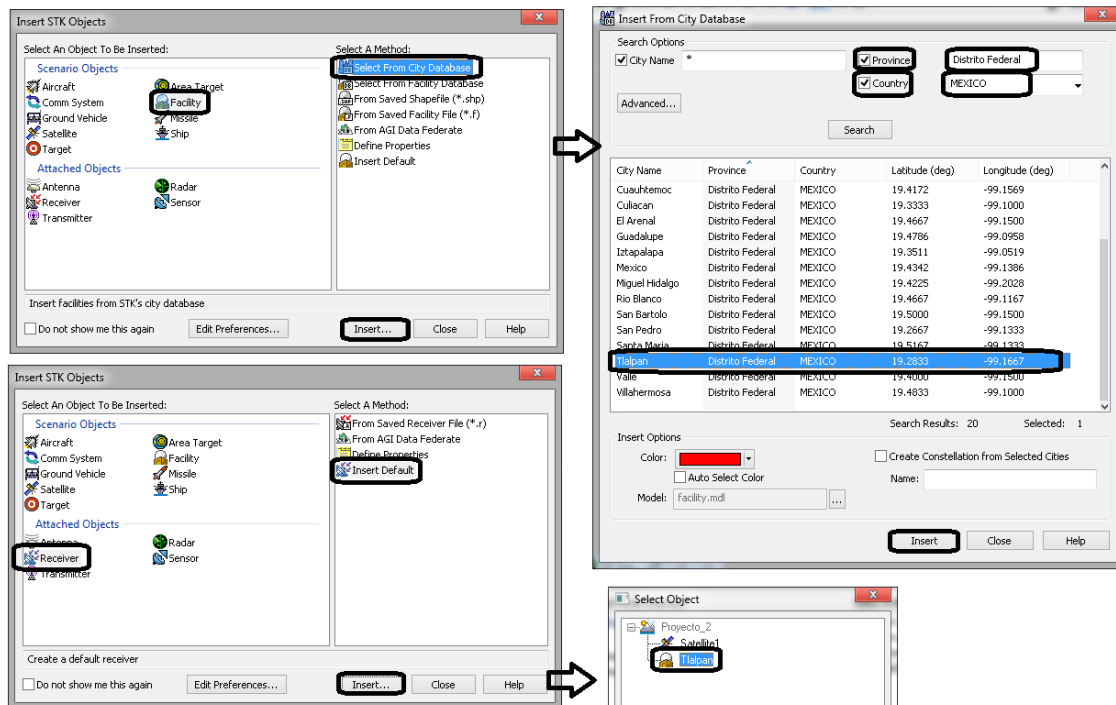


Fig. 5.25 Insertando la estación terrena y el equipo receptor

Después insertaremos al transmisor desde la ventana "Insert STK Objects" y en el método de inserción seleccionamos "Insert Default".

Al dar clic en "Insert" se nos abre un cuadro en donde debemos elegir al satélite como el elemento que portará este objeto.

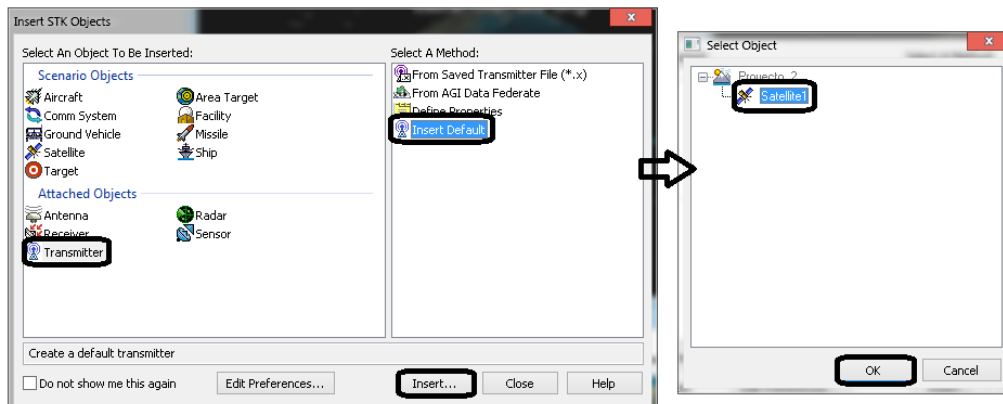


Fig. 5.26 Insertando el transmisor al satélite

Ahora cambiamos el tipo por "Multibeam Transmitter Model" y procedemos a añadir los distintos haces.

Para este caso particular seleccionamos como antena de referencia para el arreglo el tipo bocina cuadrada "Square Horn", dado que es uno de los modelos más utilizados para la conformación de huellas de cobertura.

Cada haz tendrá un nivel de potencia de 0 [dBW] y la frecuencia de diseño la establecemos en 18.5 [GHz].

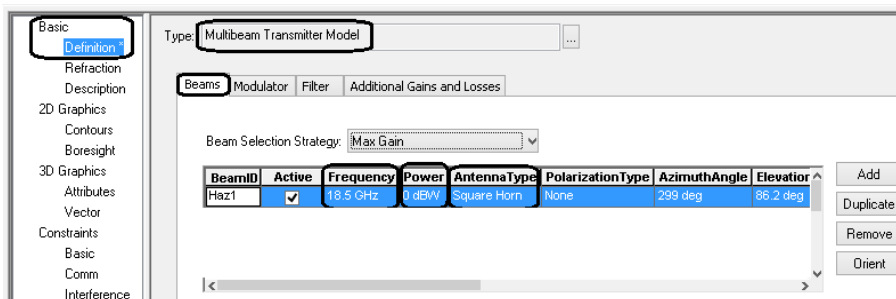


Fig. 5.27 Selección del tipo de transmisor a emplear para la conformación de la huella de cobertura

Antes de comenzar a especificar los distintos haces, configuraremos las representaciones en 2D y 3D como a continuación se muestra.



Fig. 5.28 Configuración de los atributos para las representaciones en 2D y 3D

Habiendo realizado lo anterior, procedemos a generar los distintos haces a través de su configuración en las características de diseño de la antena.

La forma en que se llevo a cabo la conformación de la huella de cobertura fue la siguiente:

- Se mantuvieron fijos algunos parámetros básicos de la antena de bocina cuadrada para todos los haces conformados.
- Después se procedió a orientar cada uno de estos en zonas específicas que permitieran cubrir de manera individual el área geográfica ocupada por el territorio mexicano.
- Los parámetros que permanecieron constantes fueron los siguientes:

Tabla 5.11 Características generales de los haces puntuales generados

Frecuencia	Ancho del haz [°]	Diámetro de la apertura [m]	Ganancia del lóbulo principal [dB]	Eficiencia [%]	Ganancia del lóbulo trasero [dB]
18.5 [GHz]	0.8225	1	44.2027	55	-30

En cuanto a los valores de azimut y elevación establecidos se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 5.12 Valores de azimut y elevación para los distintos haces generados

# de Haz	Azimut [°]	Elevación [°]	# de Haz	Azimut [°]	Elevación [°]	# de Haz	Azimut [°]	Elevación [°]
1	271	85.5	5	260	85.9	9	288	86.9
2	262	85.2	6	251	85.5	10	299	86.3
3	254	84.9	7	274	86.8	11	247	84.7
4	271	86.2	8	261	86.5			

Habiendo establecido dichos valores, los resultados de la distribución de las distintas huellas de cobertura individuales para los haces creados sobre el territorio México son las siguientes:

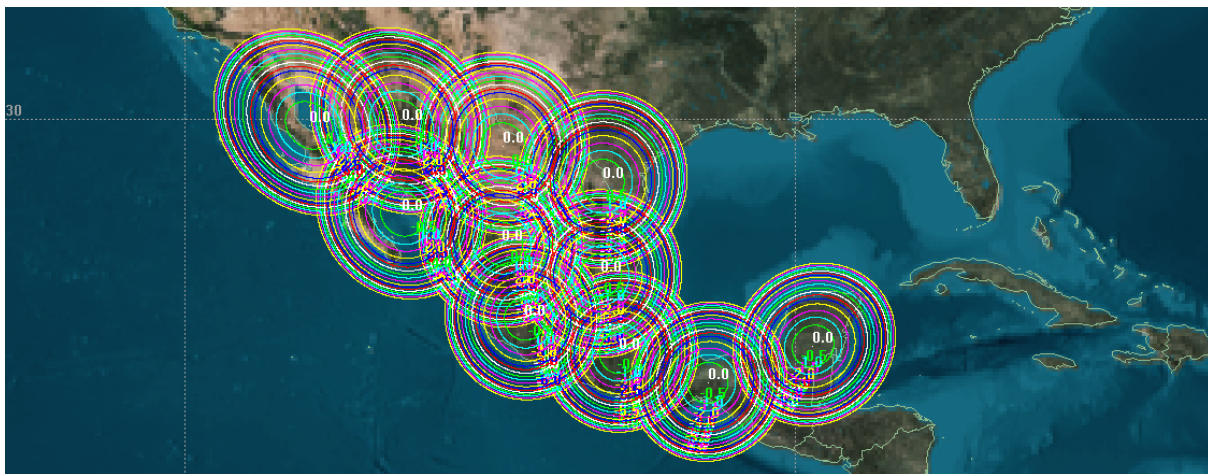


Fig. 5.29 Huellas de cobertura de los distintos haces

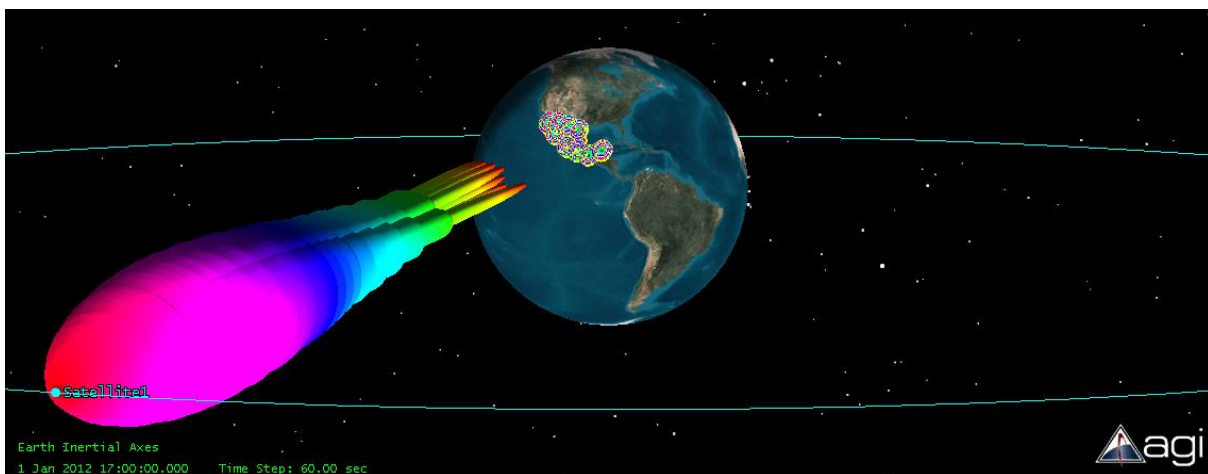


Fig. 5.30 Patrón de radiación de los haces generados desde el satélite

Ahora lo que se procede es generar la huella de cobertura global definida en este caso por la contribución de cada uno de los patrones de radiación.

Para ello escogemos la opción “*Aggregate Active Beams*” en la sección “*Beam Selection Strategy*” dentro de las características del transmisor.

Los resultados que se obtiene son:

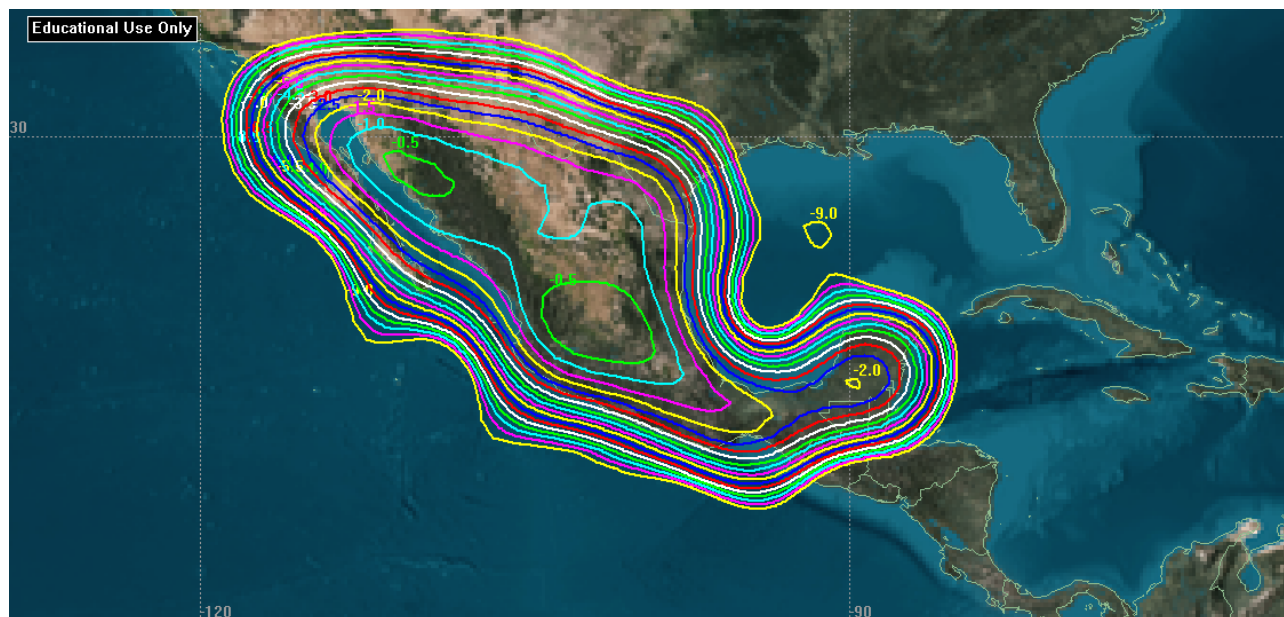


Fig. 5.31 Huella de cobertura generada por los distintos haces del arreglo de antenas

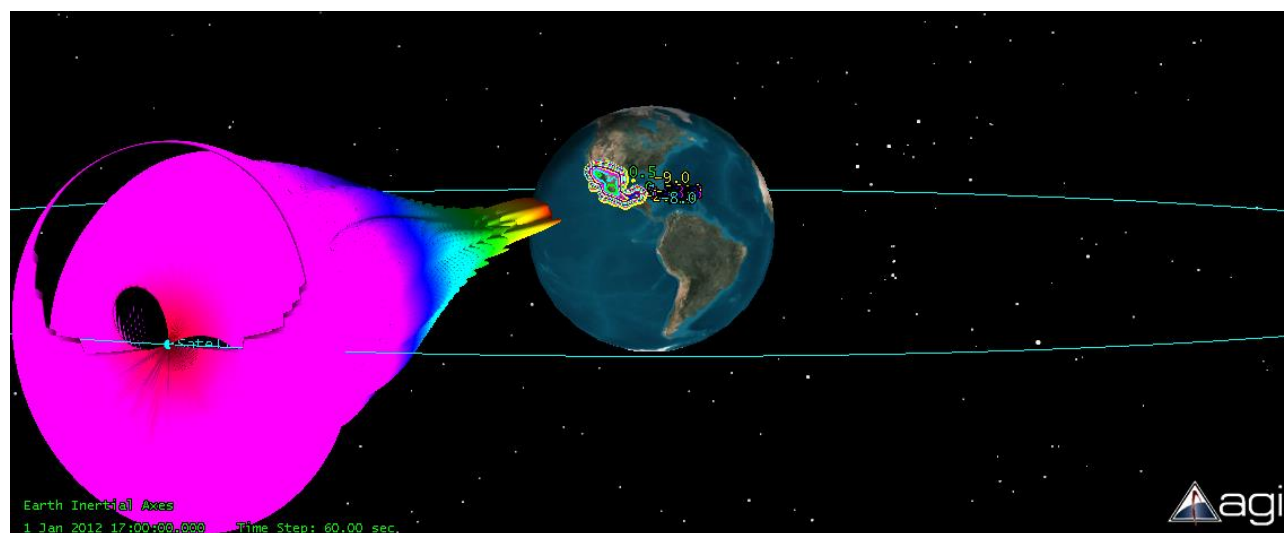


Fig. 5.32 Patrón de radiación generado por el arreglo de antenas en el satélite

Ahora lo que haremos será obtener datos de algunos parámetros de recepción.

Para ello determinamos el acceso del receptor al transmisor del satélite con la herramienta “*Access*” descrita en los proyectos anteriores.

Para ello seleccionamos al equipo receptor de la estación terrena y después damos clic en el botón "Access" esto nos abre una ventana en la cual nos dirigiremos a la sección "Associated Objects" y buscamos al transmisor del satélite, lo seleccionamos y damos clic en el botón "Compute".

Después de que haya terminado de realizar los cálculos damos clic en el botón "Report & Graph Manager".

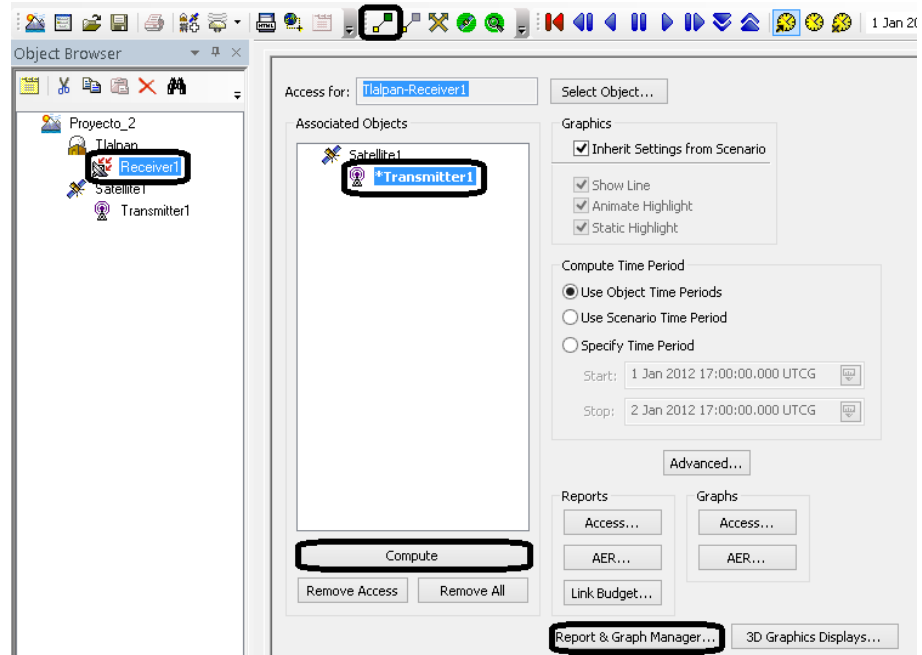


Fig. 5.33 Determinando el acceso del receptor al satélite

Posteriormente nos vamos a "Styles" y dejamos habilitada solamente "Show Reports".

Enseguida abrimos la carpeta "Installed Styles" y seleccionamos el archivo titulado "Link Budget-Detailed" y por último damos clic en el botón "Generate" con el cual generamos el reporte.

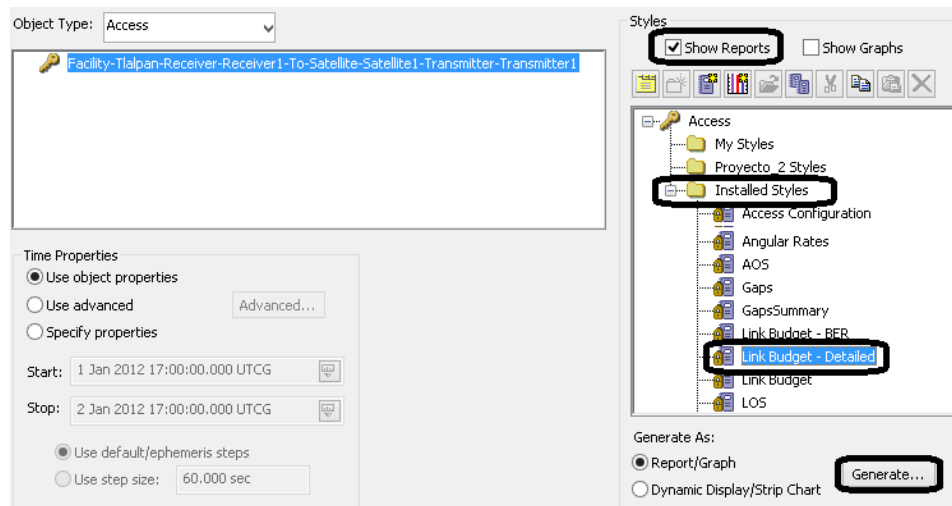


Fig. 5.34 Generando el reporte del sistema multihaz

Una muestra del informe proporcionado por STK se presenta a continuación en la siguiente imagen.

Time (UTC)	Xmtr Power (dBW)	Xmtr Gain (dB)	EIRP (dBW)	Free Space Loss (dB)
1 Jan 2012 17:00:00.000	0.000	261.6699	261.670	-208.9666
1 Jan 2012 17:01:00.000	0.000	261.6699	261.670	-208.9666
1 Jan 2012 17:02:00.000	0.000	261.6699	261.670	-208.9666

Fig. 5.35 Reporte generado para el escenario

Los datos anteriores se presentan en las tablas siguientes.

Tabla 5.13 Datos de recepción para un sistema multihaz

Estación terrena	Potencia de cada haz [dBW]	Frecuencia de recepción [GHz]	Ganancia de Tx [dB]	PIRE [dBW]	Pérdidas por espacio libre [dB]
Tlalpan	0	18.5	261.6699	261.670	-208.9666

Tabla 5.14 Datos de recepción para un sistema multihaz (continuación)

Estación terrena	RIP [dBW]	Densidad de flujo [dBW/m ²]	G/T [dB/K]	C/N ₀ [dBHz]	C/N [dB]	E _b /N ₀ [dB]
Tlalpan	52.703	99.502412	20	301.302432	226.2509	229.2612

A partir de los resultados anteriores se observa que el nivel de ganancia de transmisión obtenido se conforma por la contribución de cada uno de los haces creados (cada uno posee un nivel de máximo de 44.2027 [dB]).

Si asumiéramos que la ganancia total estuviera dado por la suma de todos tendríamos valor total de 486.2297 [dB].

Sin embargo, tengamos en cuenta que el nivel de ganancia donde se encuentra la estación terrena corresponde a una zona donde es menor respecto al máximo dentro de la huella de cobertura. Además, la orientación de cada patrón de radiación es distinta y no es concentrado a una región fija.

En cuanto a los demás parámetros de las tablas, estos vienen dados por las expresiones proporcionadas en proyectos anteriores.

Por otra parte se analizará el comportamiento que presenta la huella de cobertura a medida que aumentamos el número de haces puntuales utilizados para la conformación de la zona de iluminación.

Tabla 5.15 Características de los distintos esquemas multihaz para conformación de huella de cobertura

Número de haces puntuales	(Azimut [°], Elevación [°])	Ancho del haz [°]	Diámetro de la apertura [m]	Ganancia del lóbulo principal [dB]
2	A(260, 85.5) B(270, 86.6)	3	0.274209	32.9644
4	A(257, 85.1) B(267, 85.9) C(278, 86.8) D(299, 86.5)	2.5	0.329039	34.5477
6	A(248, 84.5) B(255, 85.1) C(265, 85.5) D(268, 86.3) E(280, 86.9) F(297, 86.4)	2	0.411287	36.4856
8	A(253, 85) B(251, 85.4) C(270, 85.8) D(260, 86.2) E(269, 86.6) F(280, 86.9) G(293, 86.8) H(298, 86.1)	1.5	0.54837	38.9842
10	A(253, 85) B(261, 85.4) C(270, 85.5) D(260, 86.2) E(269, 86.6) F(280, 86.9) G(293, 86.8) H(298, 86.1) I(247, 84.7) J(247, 85.4)	1	0.822543	42.5059

A medida que se aumenta el número de haces puntuales, estos cuales serán ubicados en posiciones tales que cubran la mayor parte de la superficie en la república mexicana. Además de que se modificarán algunas propiedades del patrón de radiación general para incrementar el área de cobertura de cada haz.

Algunas de las características que se mantienen constantes independientemente del número de haces generados son: potencia de transmisión 0 [dBW], frecuencia 18.5 [GHz], eficiencia de la antena $\eta=0.55$, ganancia lóbulo trasero -30 [dB].

Empleando el equipo receptor de la estación terrena podremos analizar cual es el comportamiento que adquieren algunas variables en función de la cantidad de haces puntuales empleados para la conformación de la huella de cobertura.

Para ello seguimos un procedimiento similar al empleado para la generación de los reportes como se muestran en las figuras 5.33, 5.34 y 5.35.

En caso de no haber cerrado nada de lo desarrollado previamente, se puede emplear la pestaña del reporte generado (figura 5.35) y simplemente habrá que actualizar el informe.

La siguiente tabla resume los datos proporcionados por el programa.

Tabla 5.16 Parámetros de recepción para una huella de cobertura

Estación terrena	Número de haces puntuales	Ganancia de Tx [dB]	PIRE [dBW]	RIP [dBW]	Densidad de flujo [dBW/m ²]
Tlalpan	2	63.9544	63.108	-145.858	-99.059321
	4	123.5549	123.5549	-85.412	-38.612551
	6	172.1083	172.108	-35.858	9.940806
	8	205.038	205.038	-3.928	42.870942
	10	268.9673	268.967	60.001	106.799788

Tabla 5.17 Parámetros de recepción para una huella de cobertura (continuación)

Estación terrena	Número de haces puntuales	C/N ₀ [dBHz]	C/N [dB]	E _b /N ₀ [dB]
Tlalpan	2	102.740699	27.6892	30.6995
	4	163.187468	88.1360	91.1463
	6	211.740826	136.6893	139.6996
	8	244.670962	169.6195	172.6298
	10	308.599807	233.5483	236.5586

Algunos comentarios que realizaremos son los siguientes:

- Los niveles de ganancia de transmisión en la dirección de la estación terrena receptora se van incrementando en ordenes de decenas de decibel medida que aumentamos el número de haces. Lo que a su vez aumenta el PIRE.

$$\text{PIRE}[\text{dBW}] = [G_{\text{Tx}}]_{\text{dB}} + [P_{\text{Tx}}]_{\text{dBW}}$$

- La (RIP) es dependiente de la suma del valor de PIRE y las pérdidas de propagación (en nuestro caso están dadas por propagación de espacio libre).

$$RIP[\text{dBW}] = [\text{PIRE}]_{\text{dBW}} + [L_{\text{FSL}}]_{\text{dB}}$$

- En cuanto a la densidad de flujo de potencia su valor corresponde a:

$$\text{Densidad de flujo} = [\text{PIRE}]_{\text{dBW}} + [L_A]_{\text{dB}} - 10 \log_{10} (4\pi R^2)$$

0[dB]

- Por último tenemos a los tres principales parámetros que nos permite evaluar el rendimiento del enlace.

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{\text{dB-Hz}} = [\text{PIRE}]_{\text{dBW}} + [L_{\text{FSL}}]_{\text{dB}} + [L_A]_{\text{dB}} + \left[\frac{G}{T} \right]_{\text{dB/K}} - 10 \log_{10}(k)$$

$$\left(\frac{C}{N} \right)_{\text{dB}} = \left(\frac{C}{N_0} \right)_{\text{dB-Hz}} - 10 \log_{10}(\text{BW}) \quad \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{dB}} = \left(\frac{C}{N_0} \right)_{\text{dB-Hz}} - 10 \log_{10}(R_{\text{bps}})$$

Con la creación de este proyecto analizamos las posibilidades que tenemos con STK de conformar huellas de cobertura a través del uso del transmisor multihaz. Entendimos que su forma viene dada por la contribución individual de cada haz generado desde la antena.

Observando que el nivel de ganancia con el que se transmite se va incrementando a medida que el número de haces puntuales aumenta, esto permitiría en principio reducir los niveles de potencia requeridos en el satélite para obtener la misma calidad del enlace.

Otra forma de abordar este problema de diseño sería mediante el uso de:

- Distintas configuraciones para cada haz individual añadido.
- Distintos tipos de antenas (patrón de radiación).

Por otra parte tenemos la posibilidad de manejar distintas huellas de cobertura desde el mismo satélite para dar servicio en ciertas regiones geográficas y en distintas frecuencias de operación, algo que es típico en varios satélites.

Además de hacer uso del transmisor multihaz se puede emplear software externo a STK que nos permita alcanzar los objetivos de este proyecto de forma más sencilla que la empleada en este capítulo.

A continuación se presentan una serie de imágenes sobre el comportamiento de la forma de la zona de servicio conforme se aumenta el número de haces.

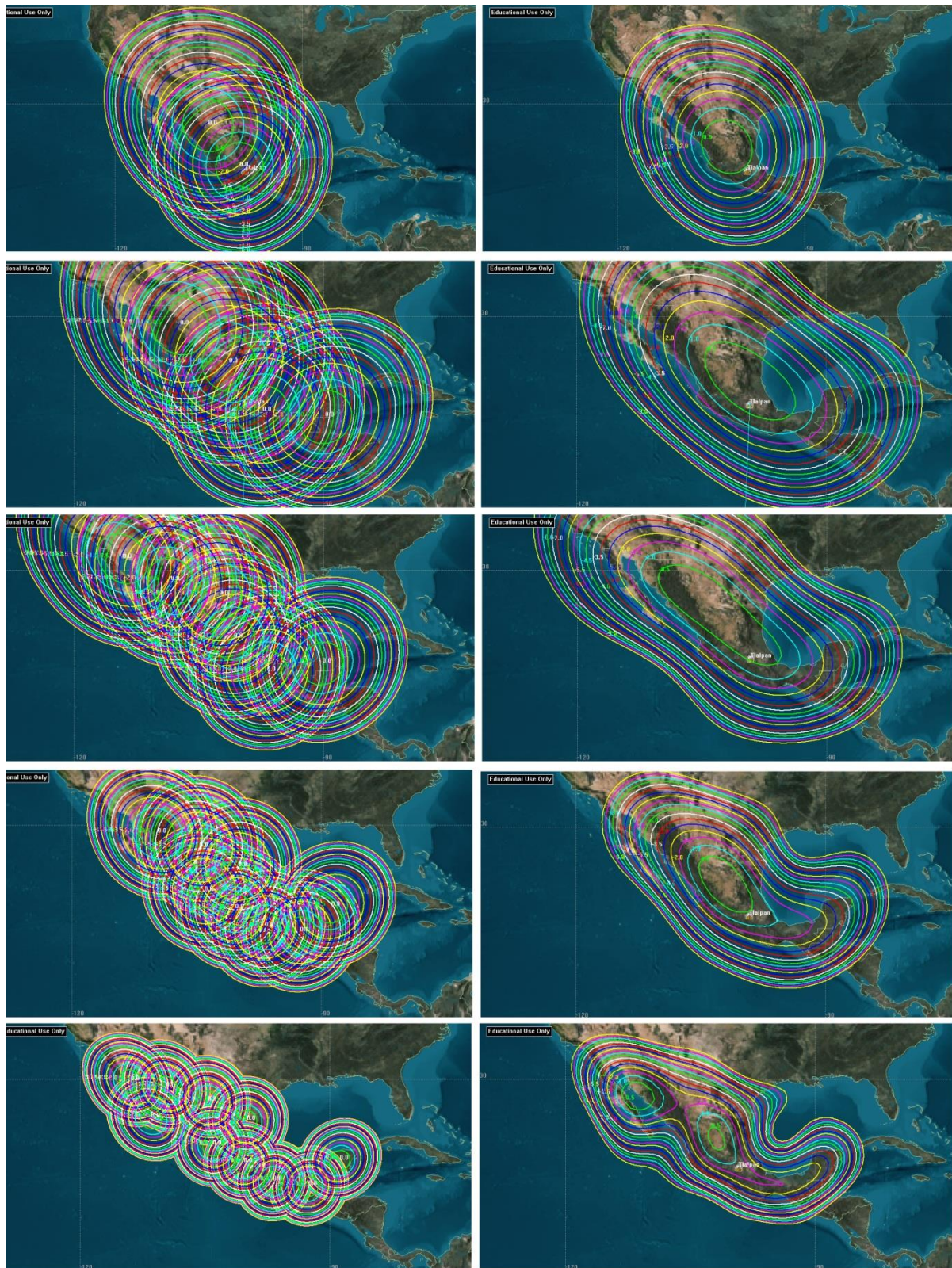


Fig. 5.36 Huella de cobertura conformada con 2,4,6,8 y 10 haces puntuales

CAPÍTULO 6

6.1. Análisis y diseño de la figura de mérito (G/T) con STK

En este proyecto analizaremos las variaciones que presenta el parámetro definido por la figura de mérito o factor de mérito denotado por (G/T) para una red de estaciones terrenas ubicadas en los 31 estados de la república mexicana y el Distrito Federal, las cuales tendrán acceso a un satélite geoestacionario.

Habiendo creado el escenario, lo siguiente es establecer un entorno RF para simular las condiciones de un enlace real que tome en cuenta los efectos de atenuación por lluvia y por gases atmosféricos.

Para ello seleccionamos al objeto configurado anterior. Damos clic en el icono de propiedades lo cual nos abrirá una ventana con las distintas características configurables.

Nos dirigimos a la opción “RF” en el apartado “Environment” y habilitamos las opciones “Rain Model” y “Atmospheric Absorption Model” y escogemos los modelos establecidos por las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones “ITU-R P618-9⁷⁹” [54] y “ITU-R P676-5⁸⁰” [55] respectivamente.

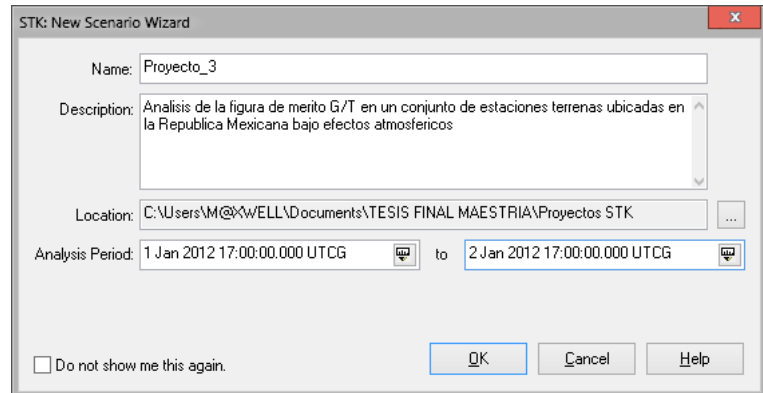


Fig. 6.1 Creación y descripción del escenario para la evaluación de la figura de mérito (G/T)

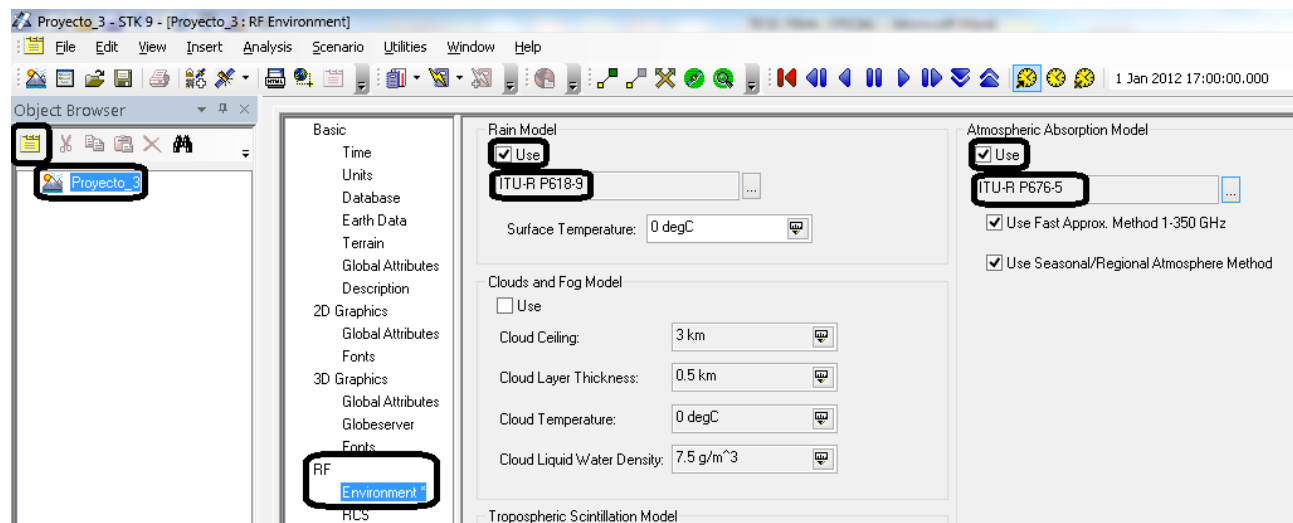


Fig. 6.2 Configuración del entorno RF para el escenario

Damos clic en el botón “Apply” para confirmar las modificaciones establecidas para nuestro escenario creado.

⁷⁹ Actualmente esta recomendación se encuentra obsoleta, la que se encuentra en vigencia es ITU-R P.618-10

⁸⁰ Actualmente esta recomendación se encuentra obsoleta, la que se encuentra en vigencia es ITU-R P.676-9

La recomendación ITU-R P618-9 que lleva por nombre **“Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación Tierra-espacio”** incluye un método para cálculo de las estadísticas de atenuación a largo plazo debida a la lluvia. El documento ITU-R P676-5 trata sobre **“Atenuación debida a los gases atmosféricos”**.

Después insertamos el satélite y el método seleccionamos la opción **“Orbit Wizard”**. Configuramos las características de este objeto. Seleccionaremos el tipo **“Geosynchronous”** y para la órbita geostacionaria establecemos una valor de longitud (100 [°] Oeste) y ángulo de inclinación de la órbita (0 [°]).

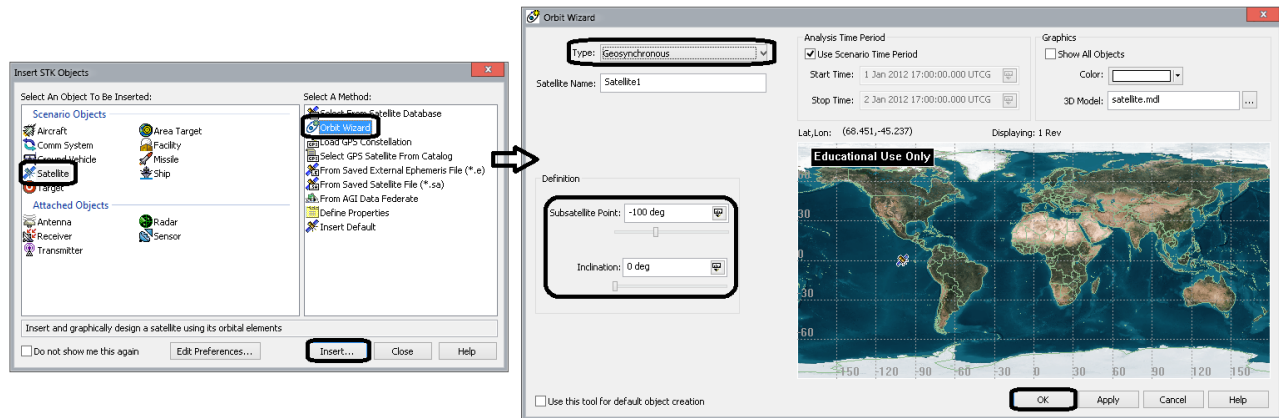


Fig. 6.3 Configuración de la órbita del satélite

Después agregamos un transmisor al satélite, para ello desde la ventana **“Insert STK Objects”** seleccionamos al objeto **“Transmitter”** y en el método la opción **“Define Properties”**.

Después se nos abre otra ventana con las propiedades del transmisor, la configuración de este elemento será la siguiente: cambiamos el tipo por el modelo **“Complex Transmitter Model”**, la frecuencia de operación la definimos de 18.5 [GHz], la potencia de 50 [dBW] (todo esto dentro de la pestaña **“Model Specs”**); en el apartado **“Antenna”** cambiamos el tipo a **“Parabolic”** y la orientación la establecemos en 270[°] para azimut y 86.5 [°] para la elevación.

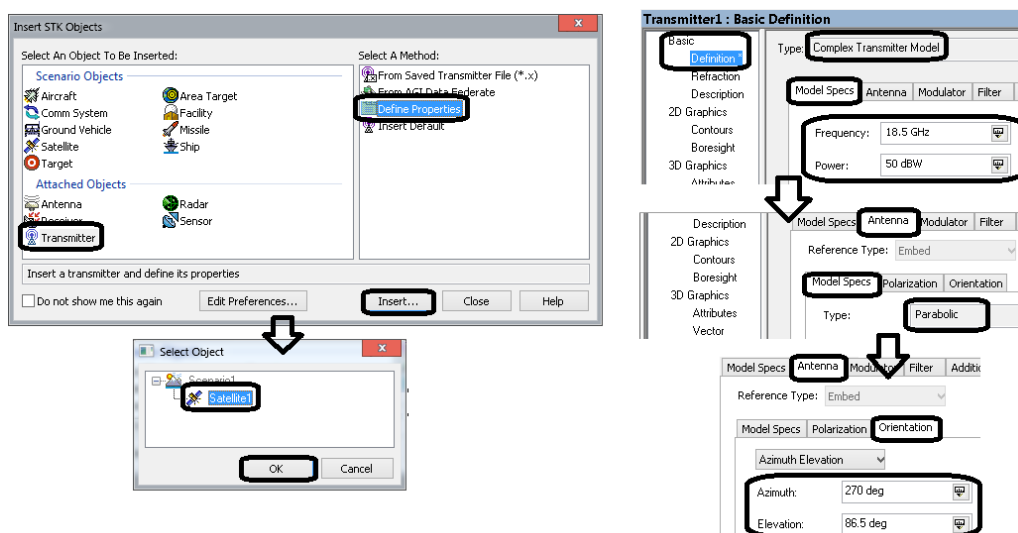


Fig. 6.4 Inserción y configuración del transmisor

Lo siguiente es insertar son las distintas estaciones terrenas (en nuestro caso serán 32 las cuales estarán ubicadas en los distintos estados de la republica mexicana y el Distrito Federal).

Para ello desde la ventana "Insert STK Objects" elegimos al objeto "Facility" y en el método seleccionamos la opción "Select From City Database".

Al dar clic en "Insert" se nos abre cuadro en el cual habilitamos "Country" y buscamos Mexico. Presionamos "Search" lo que nos permitirá visualizar las distintas ubicaciones posibles.

Para facilitar la inserción de las 32 instalaciones damos clic sobre "Province" para que las ordene de manera alfabética y así seleccionar una posición geográfica por cada uno de los estados (este proceso se repetirá hasta completar las 32).

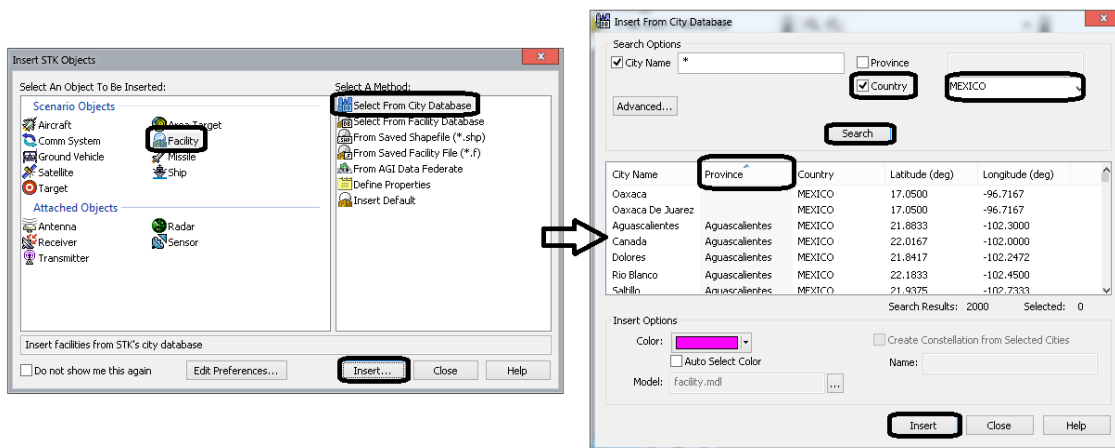


Fig. 6.5 Inserción y ubicación de las estaciones terrenas

Enseguida agregamos a cada una de ellas un equipo receptor el cual será configurado de la misma manera para todas.

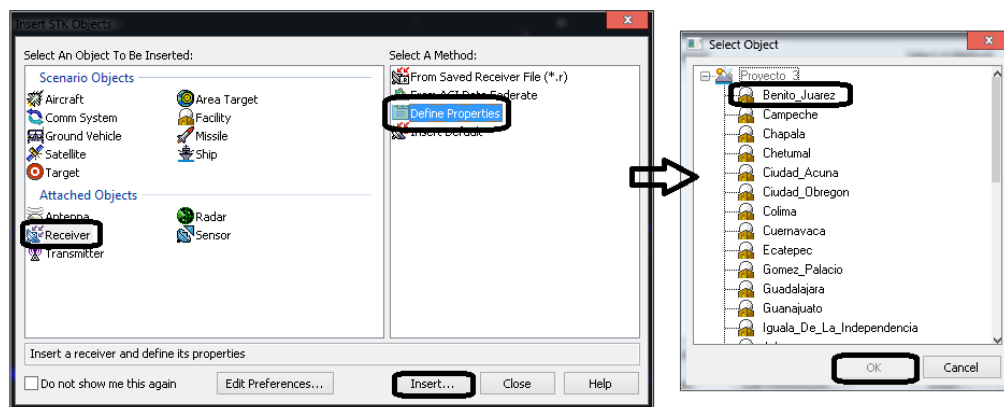


Fig. 6.6 Inserción del receptor en las estaciones terrenas

Después se nos abre otra ventana sobre las propiedades del receptor, nos ubicamos en la ruta "Basic" en el apartado "Definition".

Lo primero que cambiamos es el tipo por el modelo "Medium Receiver Model" (verificamos que la opción "Auto Track" se encuentra habilitada).

Además estableceremos un valor de ganancia de 30 [dB] (“Gain”) y para el amplificador de bajo ruido (“gain LNA”) de 3 [dB].

Después nos vamos a la pestaña “System Noise Temperature” en el cual habilitamos las opciones “Compute” y en dentro de las especificaciones de ruido de la antena “Antenna Noise” marcamos las fuentes de ruido “Sun”, “Atmosphere” y “Rain”.

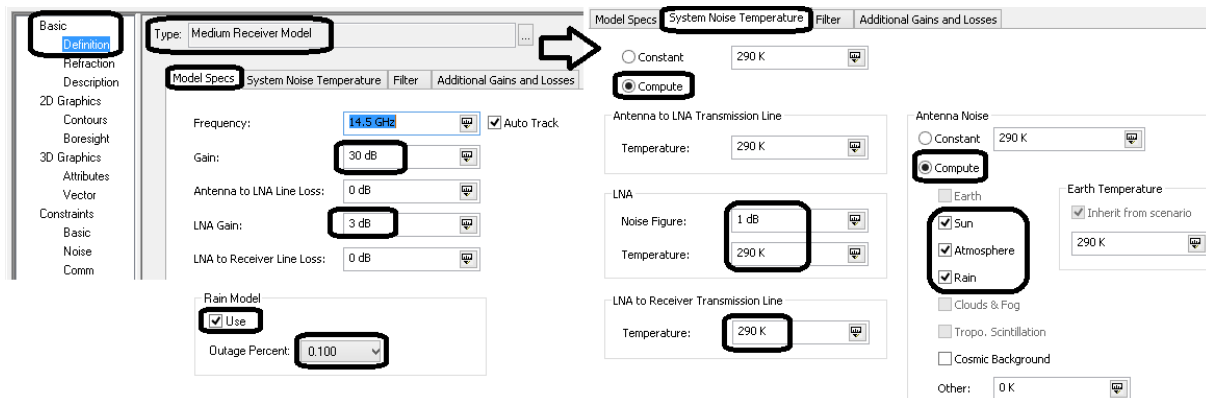


Fig. 6.7 Configuración establecida al equipo receptor global para todas las estaciones terrenas

La configuración antes descrita para el receptor se deberá realizar para todas las estaciones terrenas insertadas en el escenario. Para simplificar este proceso, simplemente habrá que copiar y pegar.

Enseguida establecemos las características de las representaciones 2D y 3D dentro de las propiedades del transmisor. La configuración definida se muestra a continuación.

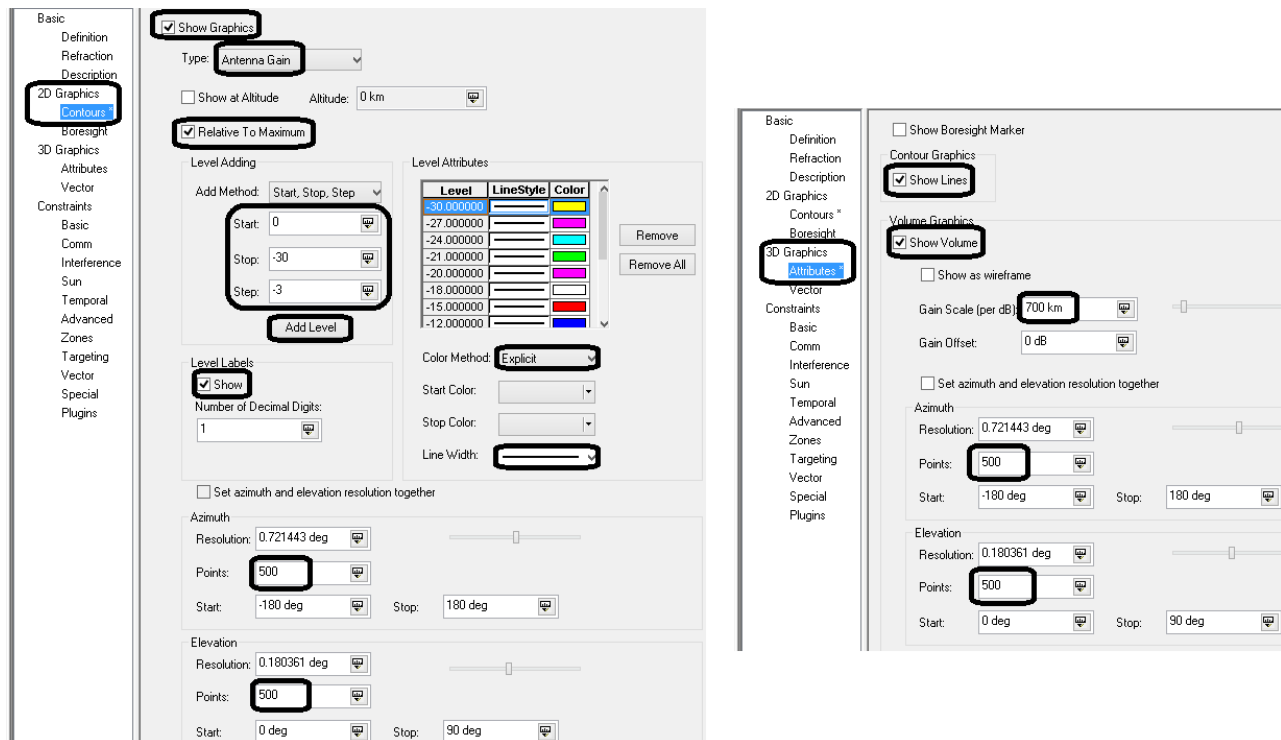


Fig. 6.8 Configuración de las características para los gráficos 2D y 3D

Habiendo realizado todo el proceso anterior, tendremos el siguiente resultado:

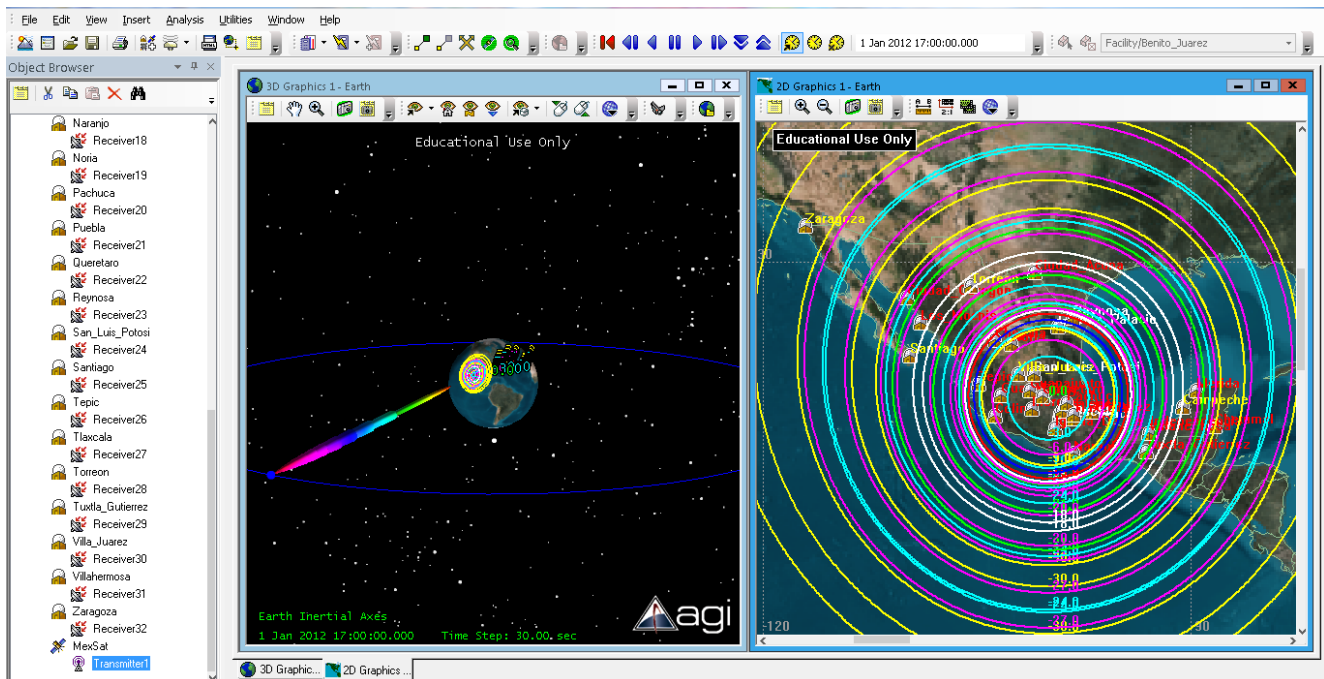


Fig. 6.9 Escenario creado para la medición de la figura de mérito (G/T)

Lo siguiente es obtener los datos de algunos parámetros de interés para cada una de las estaciones terrenas, para ello seleccionamos al objeto transmisor y damos clic secundario, después elegimos la opción "Access".

Ahora nos dirigimos a la sección "Associated Objects" en donde escogemos al receptor de la estación terrena que deseamos asociar con el transmisor del satélite, una vez seleccionado presionamos en el botón "Compute".

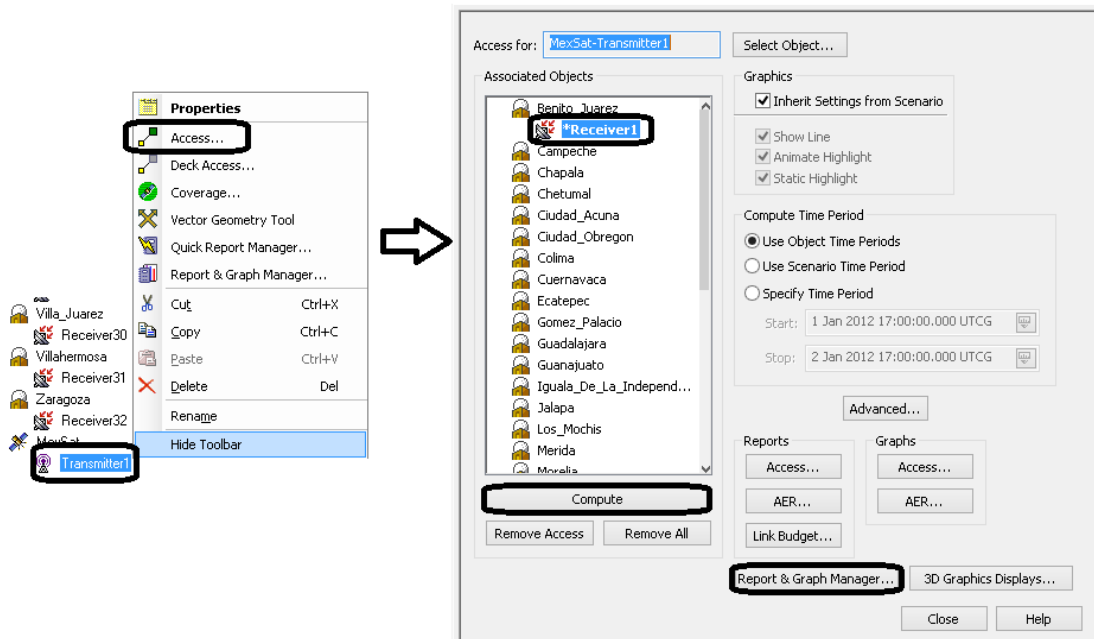


Fig. 6.10 Estableciendo la vinculación entre el transmisor satelital y el receptor de la estación terrena

Después de que termine el proceso damos clic en el botón “*Report & Graph Manager*” que nos abre otra ventana en la cual cambiaremos el intervalo de tiempo en el que deseamos que realice los reportes en la parte de “*Time Properties*”.

Enseguida nos vamos a la sección “*Styles*” y dejamos marcada solamente la opción “*Show Reports*”, luego en la carpeta “*Installed Styles*” y buscamos el reporte “*Link Budget-Detailed*”.

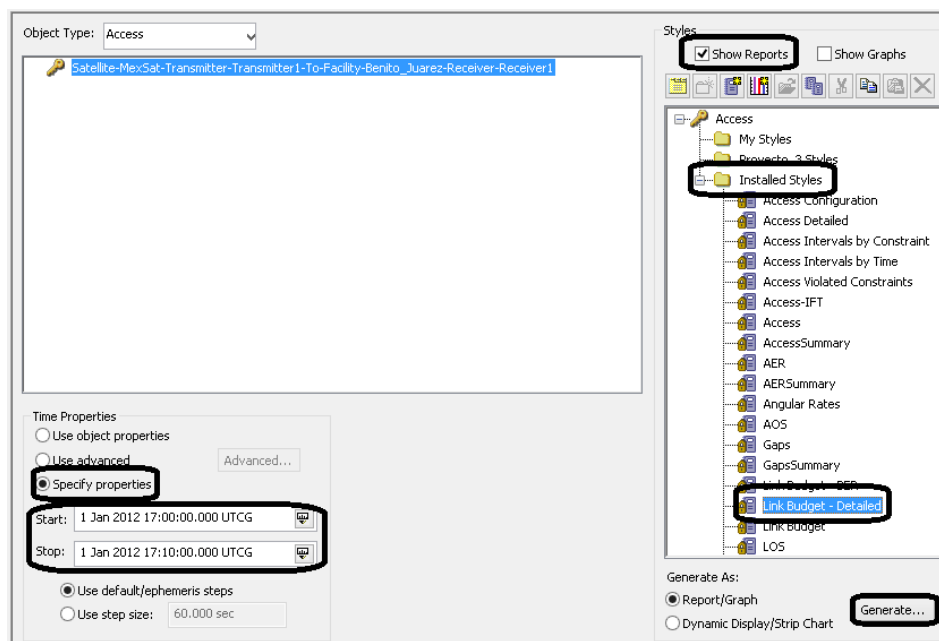


Fig. 6.11 Generación del reporte para la estación terrena particular

Todo el procedimiento descrito anteriormente se realizará para cada una de las 31 estaciones terrenas restantes establecidas en el territorio mexicano.

Time (UTC)	Xmtr Power (dBW)	Xmtr Gain (dB)	EIRP (dBW)	Free Space Loss (dB)	Atmos Loss (dB)
1 Jan 2012 17:00:00.000	50.000	42.5499	92.550	-208.9676	-0.1395
1 Jan 2012 17:01:00.000	50.000	42.5499	92.550	-208.9676	-0.1395
1 Jan 2012 17:02:00.000	50.000	42.5499	92.550	-208.9676	-0.1395

Fig. 6.12 Reporte generado para el enlace entre la estación terrena del Distrito Federal y el satélite

Por otra parte para conocer los valores de latitud y longitud cada instalación se debe dar doble clic sobre este objeto, en la ventana que aparece se encuentra la información de los parámetros mencionados.

En cuanto a los valores de azimut, elevación y distancia estos se obtienen presionando el botón “*AER*” que se mostró para la vinculación del acceso, pero tenemos que modificar el objeto de la parte “*Access for:*” por el receptor de la estación terrena y en el apartado “*Associated Objects*” debemos seleccionar siempre al transmisor del satélite.

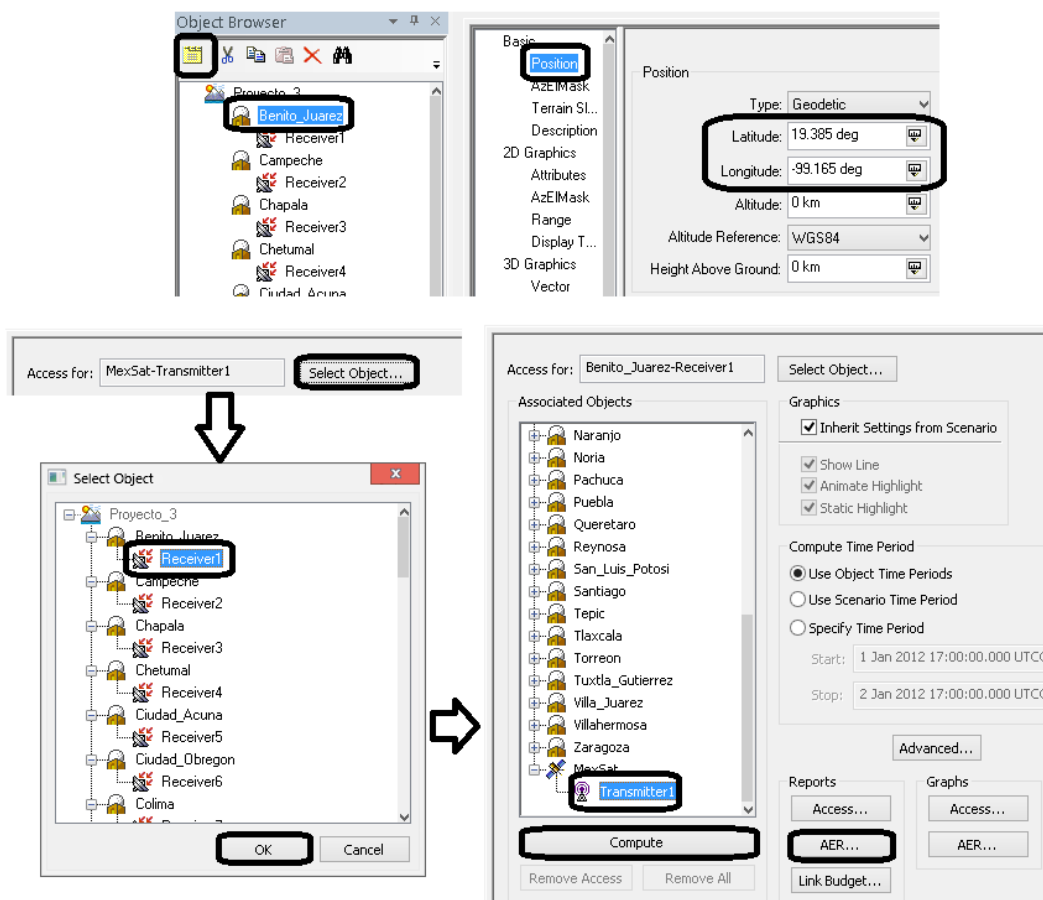


Fig. 6.13 Obtención de las características de latitud, longitud, azimut, elevación y distancia de la estación terrena

A continuación generamos la siguiente tabla comparativa que resume los distintos valores que adquieren algunos variables de interés en recepción (resaltando la figura de mérito (G/T)).

Tabla 6.1 Tabla de distintos parámetros para las estaciones terrenas en la República Mexicana

Lugar	Latitud [°]	Longitud [°]	Azimut [°]	Elevación [°]	Distancia [km]	Ganancia de Tx[dB]	PIRE [dBW]
Aguascalientes-Villa Juárez	22.1167	-102.067	174.521	64.011	36337.542914	40.7636	90.764
Baja California Sur-Santiago	23.4667	-109.717	156.714	60.448	36497.306164	25.09	75.09
Baja California-Zaragoza	32.5333	-117.017	150.335	47.929	37209.528143	-13.3261	36.674
Campeche-Campeche	19.85	-90.5333	206.177	64.353	36323.754524	25.4953	75.495
Chiapas-Tuxtla Gutiérrez	16.75	-93.1167	202.749	68.808	36154.665130	22.7135	72.713
Chihuahua-Torreón	28.3167	-105.417	168.687	56.439	36699.471557	25.4011	75.401
Coahuila-Ciudad Acuña	29.3	-100.917	178.127	55.839	36731.737475	23.9591	73.959
Colima-Colima	19.2333	-103.717	168.836	67.062	36216.932903	37.2767	87.277
Distrito Federal-Benito Juárez	19.385	-99.165	182.518	67.264	36209.386662	42.5499	92.55

Durango- Chapala	24.5019	-103.713	171.100	61.059	36468.162369	31.0467	81.047
Estado de México- Ecatepec	19.6011	-99.0525	182.827	67.008	36218.885712	42.6152	92.615
Guanajuato- Guanajuato	21.0167	-101.25	176.516	65.350	36282.782853	42.5178	92.518
Guerrero- Iguala de la Independencia	18.35	-99.5333	181.485	68.481	36165.748528	41.6165	91.616
Hidalgo- Pachuca	20.1167	-98.7333	183.683	66.390	36242.176436	42.5684	92.568
Jalisco- Guadalajara	20.6667	-103.333	170.622	65.500	36276.864069	39.0855	89.086
Michoacán- Morelia	19.7	-101.117	176.689	66.883	36223.536280	42.5455	92.546
Morelos- Cuernavaca	18.9167	-99.25	182.316	67.812	36189.453105	42.1932	92.193
Nayarit- Tepic	21.5	-104.9	166.824	64.222	36328.847036	32.8391	82.839
Nuevo León- Gómez Palacio	25.45	-99.3333	181.554	60.261	36505.730043	33.7957	83.796
Oaxaca- Naranjo	16.5794	-98.2208	186.220	70.441	36100.394815	36.1816	86.182
Puebla- Puebla	19.05	-98.2	185.506	67.578	36197.906654	41.3498	91.35
Querétaro- Querétaro	20.6	-100.383	178.911	65.870	36262.258890	43.0959	93.096
Quintana Roo- Chetumal	18.5	-88.3	213.157	64.501	36317.890624	13.7852	63.785
San Luis Potosí- San Luis Potosí	25.7667	-108.967	177.392	64.055	36335.704151	41.8919	91.892
Sinaloa- Los Mochis	22.15	-100.983	160.034	58.278	36603.767668	25.0511	75.051
Sonora- Ciudad Obregón	27.4833	-109.933	159.203	56.090	36718.555760	19.5059	69.506
Tabasco- Villahermosa	17.9833	-92.9167	201.944	67.398	36204.761956	20.1215	70.122
Tamaulipas- Reynosa	26.0833	-98.2833	183.904	59.481	36543.430376	28.9703	78.97
Tlaxcala- Tlaxcala	19.3139	-98.2417	185.309	67.278	36208.910709	41.6386	91.639
Veracruz- Jalapa	19.5333	-96.9167	189.162	66.842	36225.142466	39.3573	89.357
Yucatán- Mérida	20.9667	-89.6167	207.139	62.753	36392.077814	24.1446	74.145
Zacatecas- Noria	24.2833	-102.6	173.694	61.464	36449.438331	35.3597	85.36

Tabla 6.2 Tabla de distintos parámetros para las estaciones terrenas en la República Mexicana (continuación)

Lugar	Pérdidas por espacio libre [dB]	Pérdidas por gases atmosféricos [dB]	Pérdidas por lluvia [dB]	Pérdidas de propagación [dB]	RIP [dBW]
Aguascalientes- Villa Juárez	-208.9983	-0.1401	-7.4275	-216.5659	-125.802
Baja California Sur- Santiago	-209.0364	-0.1445	-7.1763	-216.3573	-141.267
Baja California- Zaragoza	-209.2043	-0.1691	-2.1912	-211.5646	-174.891

Campeche- Campeche	-208.995	-0.1427	-13.0245	-222.1622	-146.667
Chiapas- Tuxtla Gutiérrez	-208.9545	-0.138	-13.4197	-222.5121	-149.799
Chihuahua- Torreón	-209.0844	-0.1508	-8.5416	-217.7768	-142.376
Coahuila- Ciudad Acuña	-209.092	-0.1518	-8.0017	-217.2456	-143.286
Colima- Colima	-208.9695	-0.1397	-14.0811	-223.1902	-135.913
Distrito Federal- Benito Juárez	-208.9676	-0.1395	-5.303	-214.4101	-121.86
Durango- Chapala	-209.0295	-0.1437	-8.4545	-217.6277	-136.581
Estado de México- Ecatepec	-208.9699	-0.1397	-5.8864	-214.996	-122.381
Guanajuato- Guanajuato	-208.9852	-0.1415	-8.4692	-217.596	-125.078
Guerrero- Iguala de la Independencia	-208.9572	-0.1383	-8.255	-217.3505	-125.734
Hidalgo- Pachuca	-208.9755	-0.1404	-10.1006	-219.2164	-126.648
Jalisco- Guadalajara	-208.9838	-0.1413	-12.2062	-221.3313	-132.246
Michoacán- Morelia	-208.971	-0.1398	-9.7548	-218.8657	-126.32
Morelos- Cuernavaca	-208.9629	-0.1389	-6.0201	-215.1219	-122.929
Nayarit- Tepic	-208.9963	-0.1428	-13.1031	-222.2421	-139.403
Nuevo León- Gómez Palacio	-209.0384	-0.1448	-11.2799	-220.4631	-136.667
Oaxaca- Naranja	-208.9415	-0.1365	-12.6599	-221.7379	-135.556
Puebla- Puebla	-208.9649	-0.1391	-9.6423	-218.7463	-127.396
Querétaro- Querétaro	-208.9803	-0.1409	-7.9539	-217.0751	-123.979
Quintana Roo- Chetumal	-208.9936	-0.1425	-15.5579	-224.6941	-160.909
San Luis Potosí- San Luis Potosí	-208.9979	-0.1399	-9.2841	-218.4219	-126.53
Sinaloa- Los Mochis	-209.0617	-0.1478	-10.4088	-219.6183	-144.567
Sonora- Ciudad Obregón	-209.0889	-0.1514	-9.6748	-218.9151	-149.409
Tabasco- Villahermosa	-208.9665	-0.1393	-13.4493	-222.5552	-152.434
Tamaulipas- Reynosa	-209.0474	-0.1459	-10.7873	-219.9806	-141.01
Tlaxcala- Tlaxcala	-208.9675	-0.1394	-9.7664	-218.8734	-127.235
Veracruz- Jalapa	-208.9714	-0.1399	-13.6975	-222.8088	-133.452
Yucatán- Mérida	-209.0114	-0.1446	-13.3541	-222.5101	-148.365
Zacatecas- Noria	-209.025	-0.1431	-6.6961	-215.8642	-130.505

Tabla 6.3 Tabla de distintos parámetros para las estaciones terrenas en la República Mexicana (continuación)

Lugar	Densidad de flujo [dBW/m ²]	T _{equivalente} [K]	g/T [dB/K]	C/No [dB*Hz]	C/N [dB]	Eb/No [dB]
Aguascalientes-Villa Juárez	-79.003172	306.071	<u>5.14177752</u>	107.938625	32.8871	35.8974
Baja California Sur-Santiago	-94.468198	303.561	<u>5.17754299</u>	92.509365	17.4579	20.4682
Baja California-Zaragoza	-128.091598	192.236	<u>7.16164677</u>	60.870069	-14.1814	-11.1711
Campeche-Campeche	-99.867717	341.965	<u>4.66017848</u>	86.592482	11.541	14.5513
Chiapas-Tuxtla Gutiérrez	-102.999521	342.914	<u>4.64814358</u>	83.448642	8.3971	11.4074
Chihuahua-Torreón	-95.576547	318	<u>4.97573157</u>	91.199204	16.1477	19.158
Coahuila-Ciudad Acuña	-96.487362	312.995	<u>5.04462817</u>	90.357286	15.3058	18.3161
Colima-Colima	-89.11436	344.755	<u>4.62489754</u>	97.310558	22.2591	25.2694
Distrito Federal-Benito Juárez	-75.061099	274.861	<u>5.60887251</u>	112.347793	37.2963	40.3066
Durango-Chapala	-89.781856	316.858	<u>4.99134939</u>	97.009514	21.958	24.9683
Estado de México-Ecatepec	-75.581733	285	<u>5.45155325</u>	111.66984	36.6183	39.6286
Guanajuato-Guanajuato	-78.279052	316.662	<u>4.99404287</u>	108.51501	33.4635	36.4738
Guerrero-Iguala de la Independencia	-78.934874	314.536	<u>5.02330202</u>	107.888448	32.8369	35.8472
Hidalgo-Pachuca	-79.848926	328.773	<u>4.83103843</u>	106.782132	31.7306	34.7409
Jalisco-Guadalajara	-85.446677	339.076	<u>4.69703212</u>	101.050375	25.9989	29.0092
Michoacán-Morelia	-79.521004	326.535	<u>4.86070049</u>	107.139717	32.0882	35.0985
Morelos-Cuernavaca	-76.129597	287.095	<u>5.41973869</u>	111.090162	36.0387	39.049
Nayarit-Tepic	-92.603887	342.216	<u>4.65699192</u>	93.853125	18.8016	21.8119
Nuevo León-Gómez Palacio	-89.868376	335.563	<u>4.7422655</u>	96.67391	21.6224	24.6327
Oaxaca-Naranjo	-88.757121	340.465	<u>4.6792697</u>	97.722169	22.6707	25.681
Puebla-Puebla	-80.597361	325.742	<u>4.87126758</u>	106.073926	31.0224	34.0327
Querétaro-Querétaro	-77.180037	311.737	<u>5.0621183</u>	109.682101	34.6306	37.6409
Quintana Roo-Chetumal	-114.109739	347.974	<u>4.5845328</u>	72.274814	-2.7767	0.2336
San Luis Potosí-San Luis Potosí	-79.730899	323.22	<u>4.90501199</u>	106.974132	31.9226	34.9329
Sinaloa-Los Mochis	-97.76802	331.198	<u>4.79911705</u>	88.831117	13.7796	16.7899
Sonora-Ciudad Obregón	-102.610106	326.809	<u>4.85705935</u>	84.046973	8.9955	12.0058

Tabasco-Villahermosa	-105.634526	343.067	<u>4.64621124</u>	80.811705	5.7602	8.7705
Tamaulipas-Reynosa	-94.211166	333.178	<u>4.7732427</u>	92.362096	17.3106	20.3209
Tlaxcala-Tlaxcala	-80.435732	326.593	<u>4.8599377</u>	106.224226	31.1727	34.183
Veracruz-Jalapa	-86.652392	343.78	<u>4.63718978</u>	99.784818	24.7333	27.7436
Yucatán-Mérida	-101.566317	343.059	<u>4.64630697</u>	84.88001	9.8285	12.8388
Zacatecas-Noria	-83.705394	297.368	<u>5.26706073</u>	103.361687	28.3102	31.3205

Analizaremos cual es el comportamiento de algunos parámetros de interés particular del escenario creado mediante gráficas.

- La siguiente figura presenta la atenuación por gases atmosféricos.

En este caso a medida que disminuye el ángulo de elevación se incrementan los efectos de degradantes (esto como consecuencia de que la trayectoria que recorre la señal es mayor).

Sin embargo, notamos que los niveles para este escenario en específico son cercanos a 0 [dB], así que se podrían desprestigiar sus valores en los cálculos finales o establecer un margen de enlace mayor al considerar una pérdida de 1 [dB] para asegurar un rendimiento aceptable del enlace.

Además este parámetro es dependiente también de la frecuencia de operación, por lo que no se debe tener cuidado en que banda se diseño el sistema.

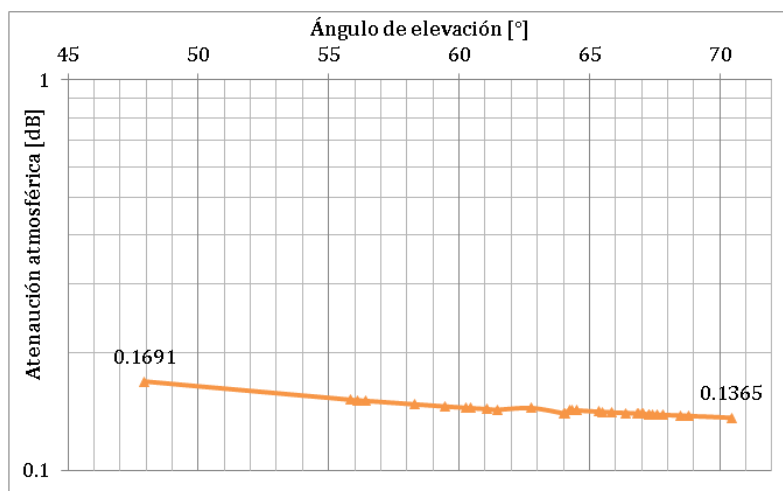


Fig. 6.14 Variación de la atenuación por gases atmosféricos en función del ángulo de elevación

- En seguida se presenta la curva para la atenuación por de lluvia conforme cambia el ángulo de elevación en las distintas estaciones terrenas.

En este caso es menos claro el comportamiento dado que la curva no muestra una tendencia creciente o decreciente (salvo para ángulos menores a 60 [°]). Esto debido a que no depende únicamente de esta variable independiente.

Ahora analizando los niveles vemos que tiene un mínimo de 2.19 [dB] y un máximo de 16 [dB], estos ya son de consideración importante en los cálculos de enlace y en el establecimiento de los márgenes del enlace.

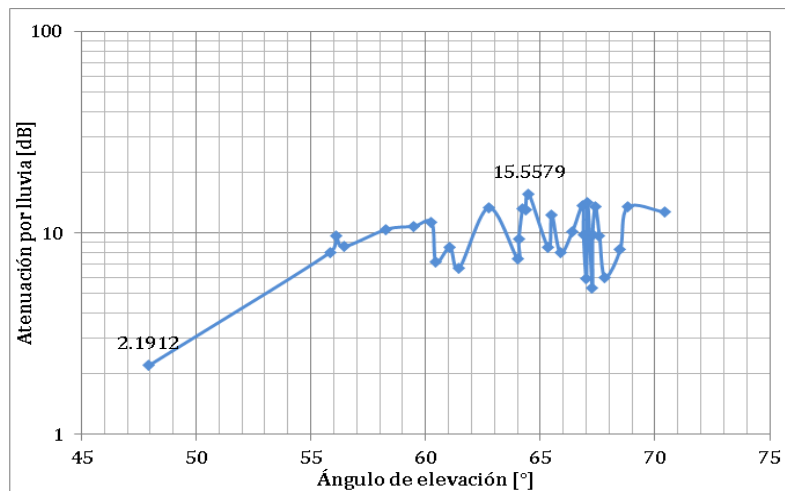


Fig. 6.15 Variación de la atenuación por lluvia en función del ángulo de elevación

- Después tenemos la gráfica correspondiente a las pérdidas de propagación de espacio libre.

Se puede apreciar que tiene una forma casi constante con pequeñas variaciones, lo que muestra claramente que la contribución que pudiera aportar la estación terrena en cuanto a la distancia total existente con el satélite es mínima.

Esto debido a los rangos de separación aproximados 36 000 [km] promedio para órbitas geoestacionarias.

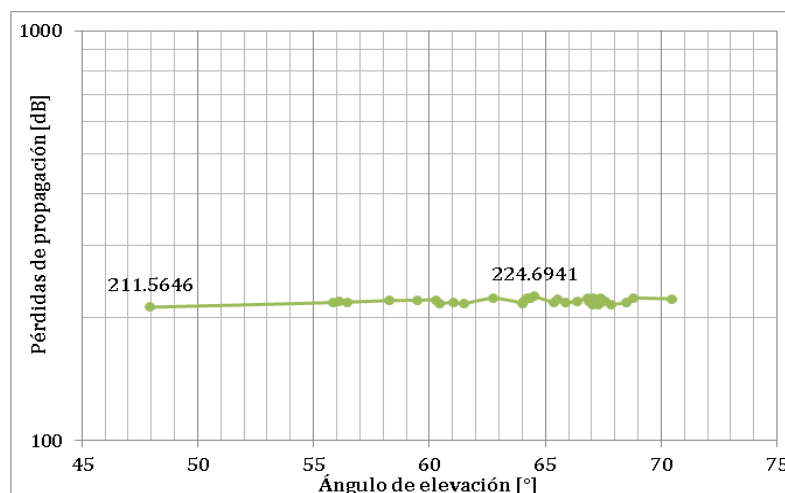


Fig. 6.16 Variación de las pérdidas de propagación de espacio libre en función del ángulo de elevación

- Por último se presenta la curva correspondiente a la figura de mérito (G/T).

El comportamiento es difícil de describir en cuanto a establecer de manera concreta alguna conclusión.

Sin embargo, se nota que los niveles de (G/T) tienden a ser mayores para ángulos de elevación que sean menores a 55 [°].

En este caso tenemos un rango de variación para (G/T) de 4.58 [dB/K] a 7.16 [dB/K]. Recordemos que el nivel de ganancia se fijo en 30 [dB], así que el valor de la temperatura de ruido del sistema se incrementa con ángulos cada vez menores.

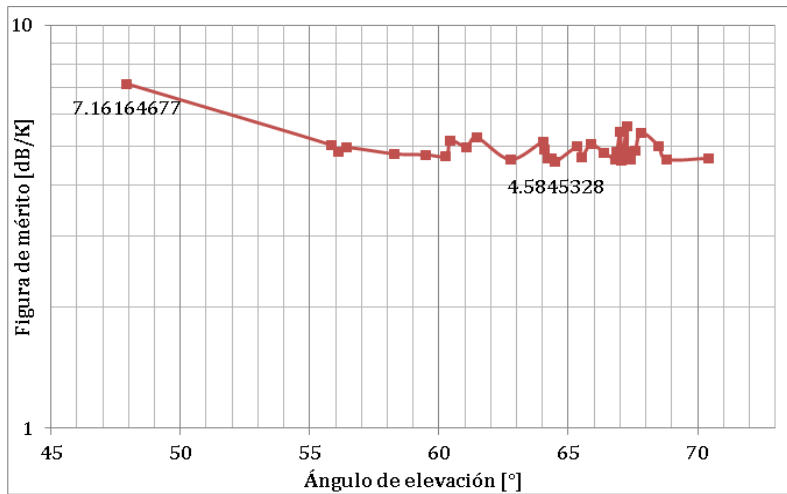


Fig. 6.17 Variación de la figura de mérito en función del ángulo de elevación

Con este proyecto determinamos las capacidades de STK para analizar un escenario con múltiples estaciones terrenas conectadas a un mismo satélite. Se desarrolló un estudio sobre las variaciones de las características de comunicación en el enlace en función de la posición geográfica y condiciones de apuntamiento de las antenas.

Hablando de la figura de mérito (G/T) como parámetro que define la calidad del equipo receptor. Su valor puede ser modificado a través de la ganancia de la antena o con la temperatura de ruido del sistema. En nuestro escenario configurado mantuvimos fijo el nivel de (G) mientras observamos los cambios generados en (T) para distintas instalaciones ubicadas dentro de la república mexicana.

Este proyecto permitiría modelar una red de VSAT, en la cual se tendría que combinar con los esquemas multiportadora y multihaz, además del uso de un proyecto que posteriormente crearemos para el análisis y diseño de un sistema de comunicaciones por satélite.

6.2. Análisis y diseño de un enlace de comunicaciones por satélite con STK

Una de las principales aplicaciones del módulo STK/Communications es el análisis de un enlace de comunicación que se establece entre una estación terrena y un satélite. El acceso entre un transmisor y un receptor puede ser restringido a satisfacer una variedad de criterios RF. Con una o más limitaciones en el lugar, se puede ajustar las propiedades de los dispositivos y observar como estas modificaciones afectan el rendimiento.

En el siguiente proyecto estudiaremos lo antes descrito.

Después de haber creado el escenario, procedemos a insertar los distintos objetos.

Primero insertamos el objeto "Facility" y en el método de seleccionamos la opción "Define Properties" en donde debemos establecer las coordenadas de su ubicación, para este caso no es importante la ubicación de la estación dado que no afecta los objetivos principales de esta simulación.

En la ventana que nos aparece después de dar clic en "Insert", nos ubicamos en la opción "Basic" y en el apartado de "Position" establecemos los valores en la latitud y longitud.

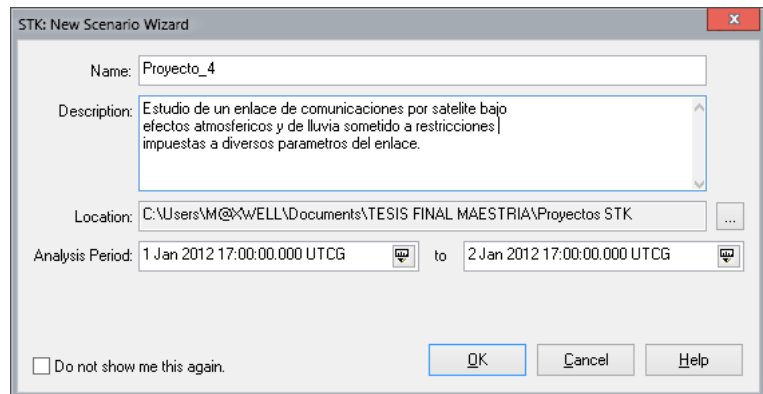


Fig. 6.18 Estableciendo un nuevo escenario para el análisis y diseño de un enlace satelital

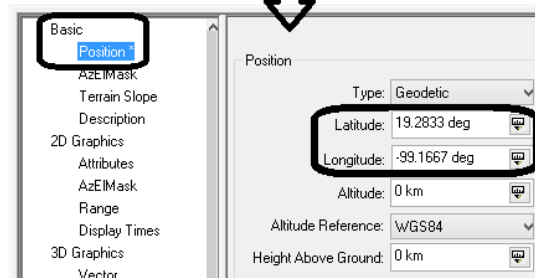
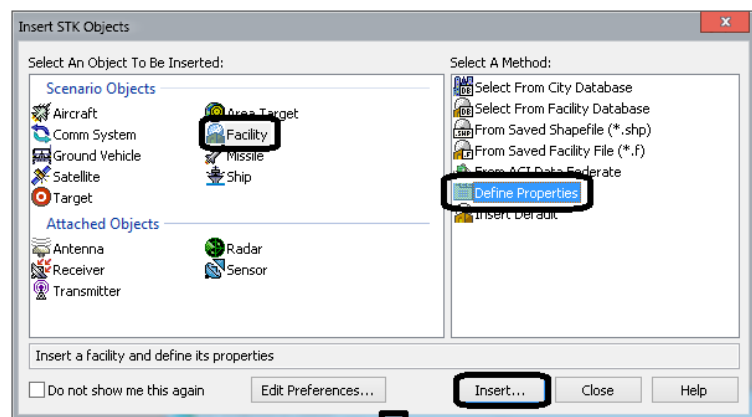


Fig. 6.19 Insertando la estación terrena y definiendo su ubicación

Después añadimos un satélite con "Orbit Wizard". La órbita será de tipo circular con una inclinación de su plano de 45 [°] y una altitud de 1500 [km].

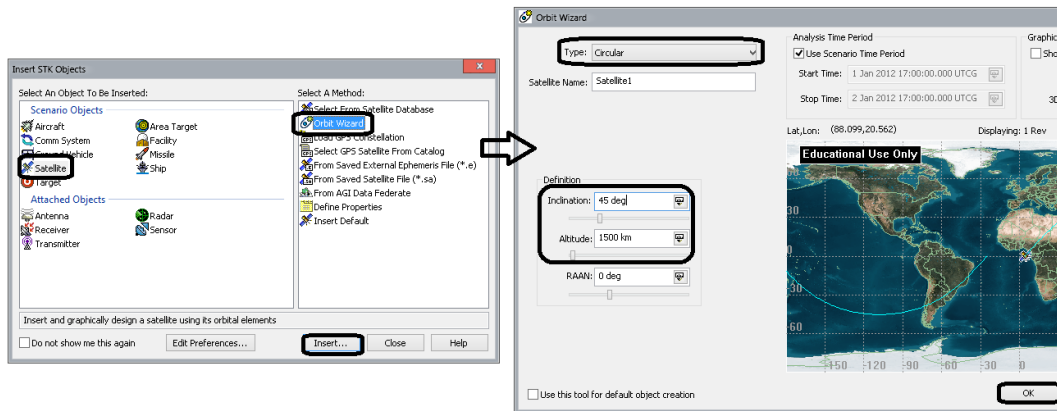


Fig. 6.20 Configurando el tipo de órbita, ángulo de inclinación y altitud del satélite

Ahora agregamos un sensor al satélite a través del método "Define Properties".

En la ventana de propiedades del elemento insertado, nos dirigimos a la opción "Basic" y después en el apartado "Definition" y cambiamos el tipo a "Half Power" así como la frecuencia a 4.5 [GHz].

Ahora nos dirigimos al apartado "Pointing" y establecemos el apuntamiento a "Targeted". Enseguida seleccionamos a la estación terrena en la sección "Available Targets" y la pasamos a "Assigned Target" con la flechita. Guardamos la configuración dando clic en "Apply" y "Ok."

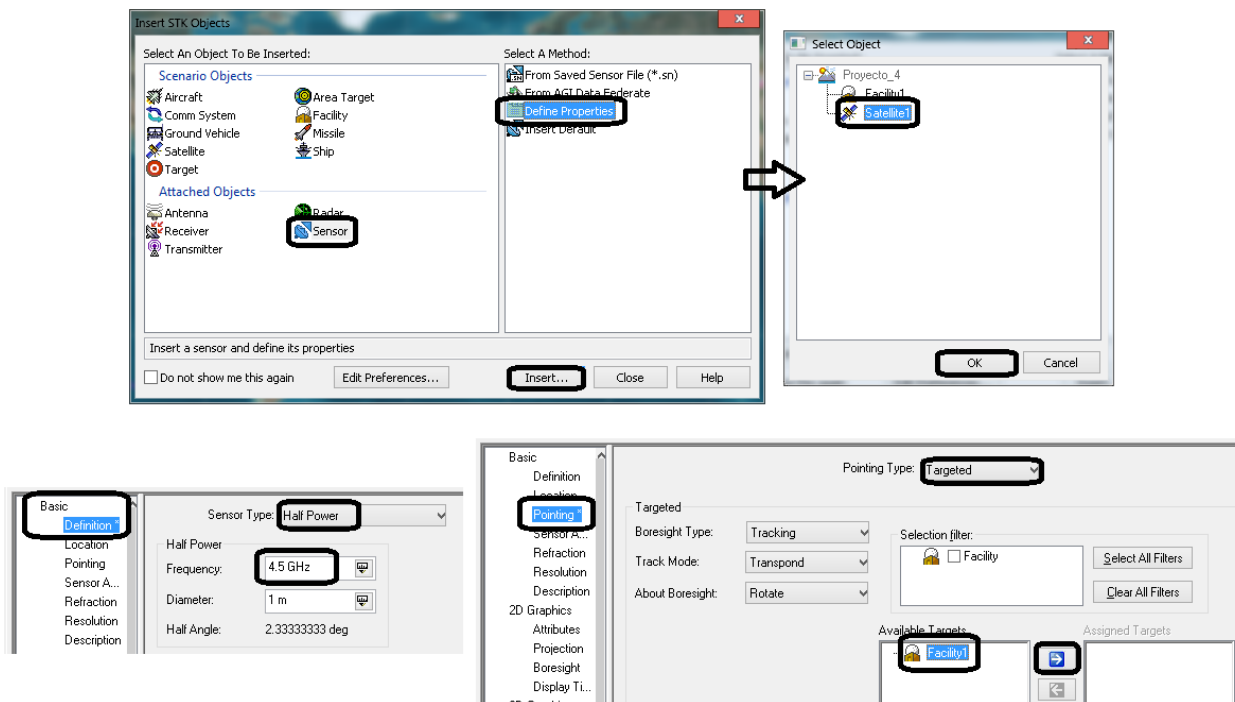


Fig. 6.21 Añadiendo y configurando un sensor al satélite

Antes estableceremos el ambiente de RF. Para ello seleccionamos al escenario "Proyecto_4" y abrimos la ventana de propiedades. En la ruta "RF"-> "Environment" habilitamos las opciones de "Rain Model" (modelo "ITU-R P618-9") y "Atmospheric Absorption Model" (recomendación "ITU-R P676-5"). Por último, damos clic en "Apply" y "OK" para guardar las modificaciones establecidas anteriormente.

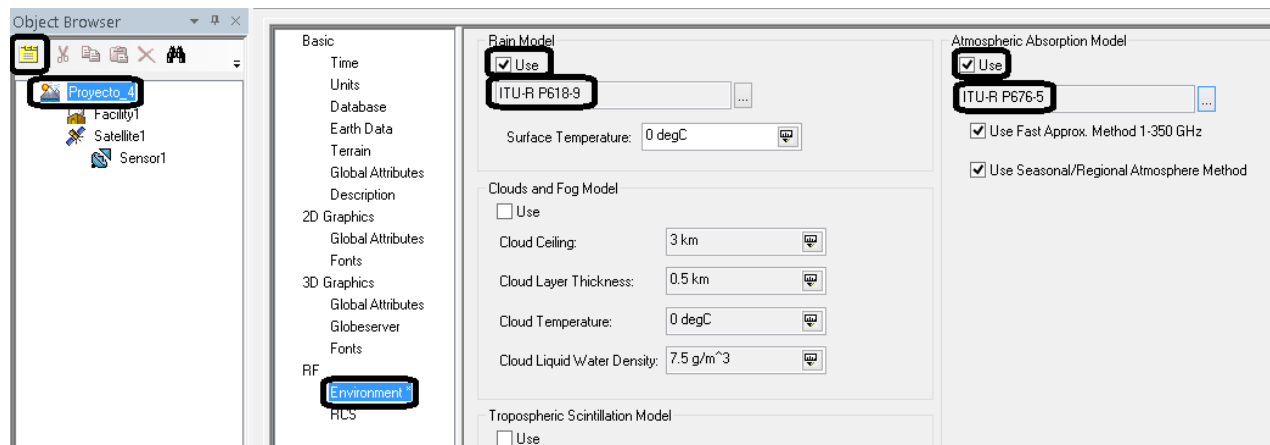


Fig. 6.22 Estableciendo un modelo de lluvia y absorción atmosférica al escenario

Ahora procedemos a agregar un receptor en la estación terrena con la opción “*Define Properties*”.

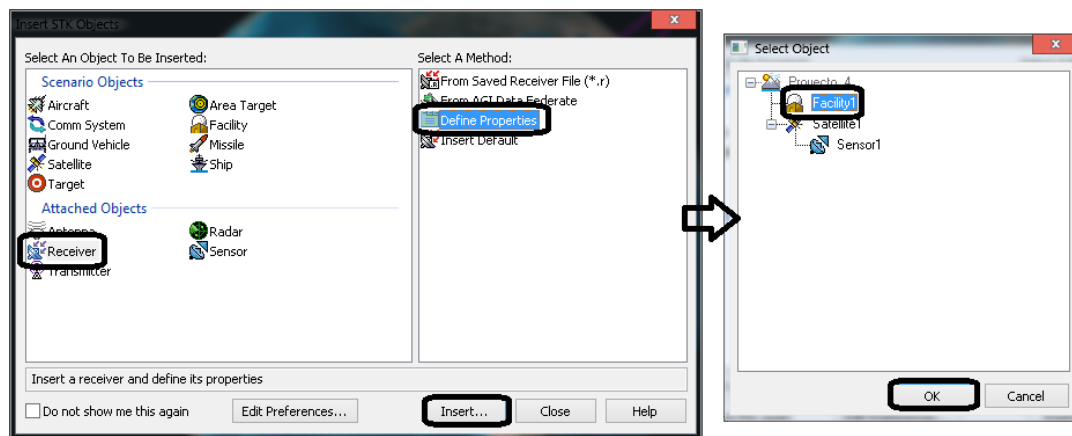


Fig. 6.23 Insertando el receptor a la estación terrena

En el caso de las propiedades del objeto modificamos el tipo por “*Medium Receiver Model*”.

La ganancia será de 20 [dB] y habilitamos la opción de “*Rain Model*” con un valor de “*Outage Porcent*” de 0.001.

Mientras que en “*System Noise Temperature*”, marcamos “*Compute*” y para el “*LNA*” fijamos un valor de “*Noise figure*” de 1.2 [dB].

Y por último en el apartado de “*Antenna Noise*” también establecemos que los efectos de ruido en la antena sean calculados “*Compute*” y seleccionamos las opciones de “*Sun*”, “*Atmosphere*” y “*Rain*”.

Ahora nos dirigimos al apartado “*Refraction*” y establecemos en “*Refraction Model*” el modelo “*ITU-R P.834-4*” que es una recomendación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones que trata sobre “*Efectos de la refracción troposférica sobre la propagación de las ondas radioeléctricas*”.

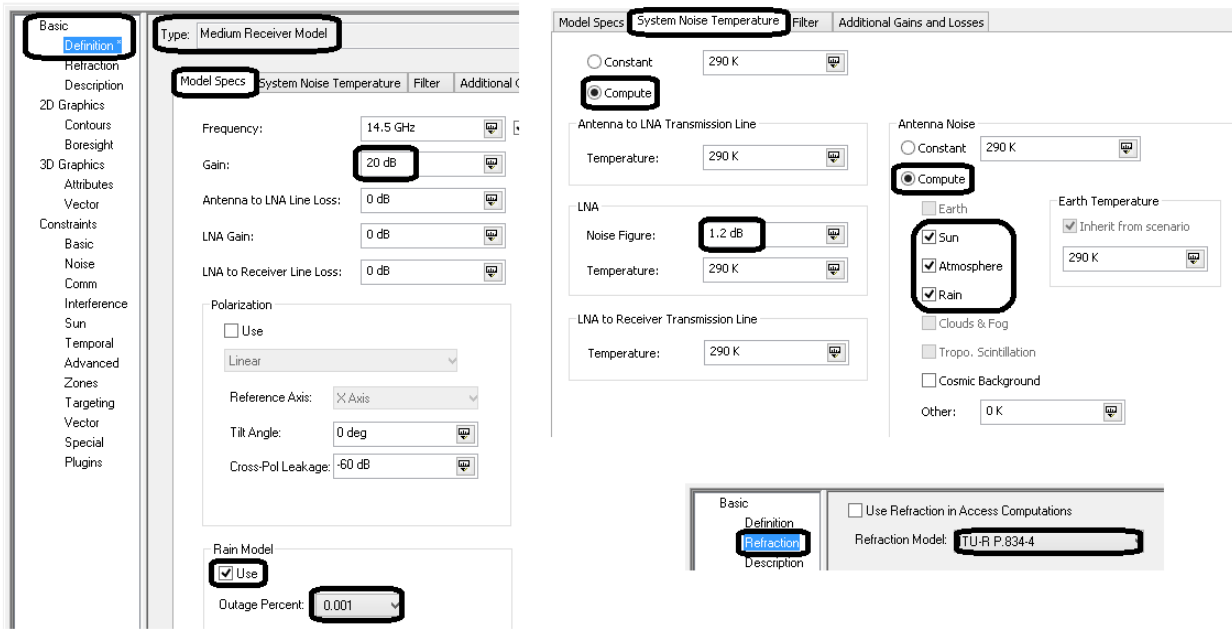


Fig. 6.24 Configurando las características del receptor en la estación terrena

Ahora añadimos un transmisor al sensor sobre el satélite mediante “Define Properties”.

En las propiedades de este elemento verificamos dentro de “Antenna” que el diámetro sea de 1 [m] y la eficiencia del 55[%]. Después nos dirigimos a la pestaña “Additional Gain and Losses” y agregamos unas pérdidas de apuntamiento “Pointing loss” de -1 [dB].

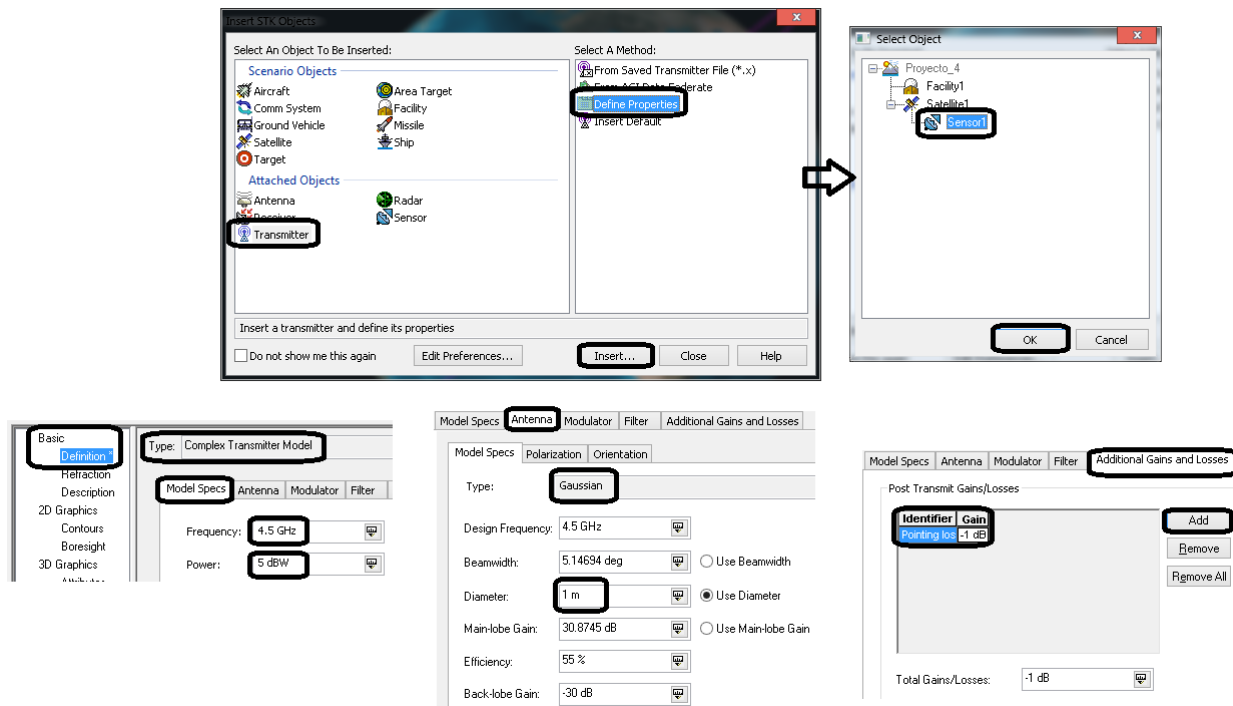


Fig. 6.25 Selección y configuración del transmisor en el satélite

Procedemos a utilizar la herramienta “Access” para establecer una vinculación a través de un enlace entre la estación terrena y satélite.

Para ello seleccionamos el transmisor, damos clic en el icono "Access" ubicado en la barra de herramientas.

Después se nos abre una ventana en la cual elegimos al elemento que deseamos asociar (en este caso es el receptor de la estación terrena). Finalmente presionamos botón "Compute".

Una vez que ha terminado de realizar los cálculos vamos a "Report & Graph Manager".

En la nueva ventana que se abre nos dirigimos al apartado "Styles" y dejamos marcada la opción "Show Reports".

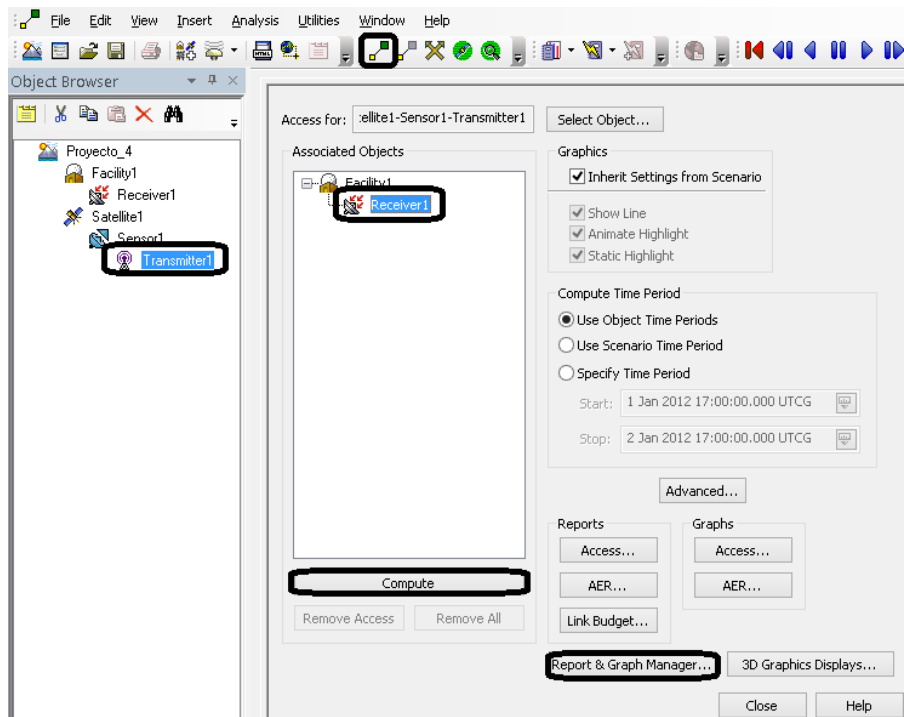


Fig. 6.26 Vinculación entre el transmisor y el receptor

Abrimos la carpeta "Installed Styles" y buscamos el reporte "Link Budget-Detailed" y por último damos clic en "Generate".

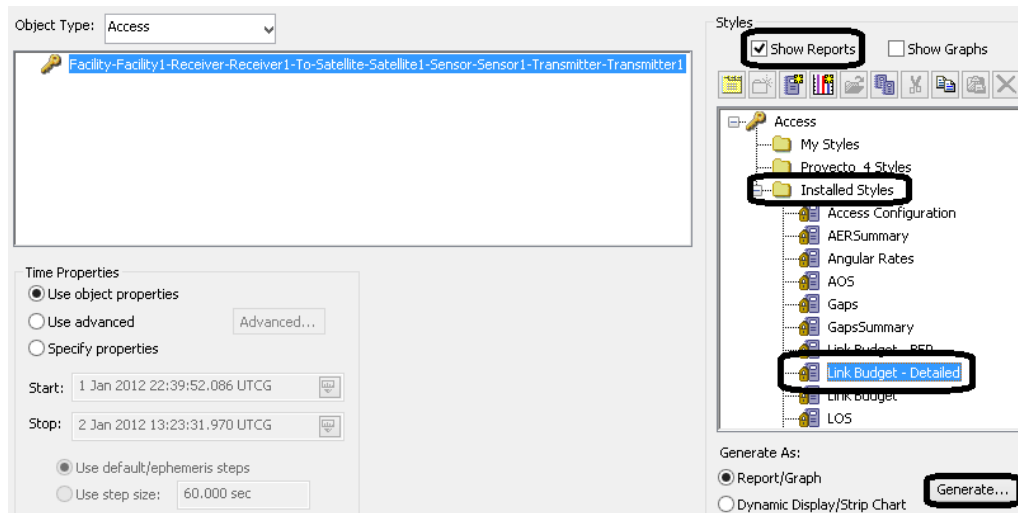


Fig. 6.27 Generando el reporte para el presupuesto del enlace

Start: 1 Jan 2012 22:39:52.086 UTCG Stop: 2 Jan 2012 13:23:31.970 UTCG Step: 60 sec

Facility-Facility1-Receiver-Receiver1-To-Satellite-Satellite1-Sensor-Sensor1-Transmitter-Transmitter1: Link Budget - Short Form

Time (UTCG)	Xmtr Power (dBW)	Xmtr Gain (dB)	EIRP (dBW)	Free Space Loss (dB)	Atmos Loss (dB)	Rain Loss (dB)	CloudFog Loss (dB)	TropoScintill Loss (dB)	Prop Loss (dB)
1 Jan 2012 22:39:52.101	5.000	30.8745	34.874	-176.7940	-1.4986	-12.6603	0.0000	0.0000	-182.9528
1 Jan 2012 22:40:52.000	5.000	30.8745	34.874	-176.3551	-0.7056	-6.2274	0.0000	0.0000	-185.2092
1 Jan 2012 22:41:52.000	5.000	30.8745	34.874	-177.0196	-0.4361	-3.6555	0.0000	0.0000	-182.0212
1 Jan 2012 22:42:52.000	5.000	30.8745	34.874	-177.4963	-0.3121	-2.5515	0.0000	0.0000	-180.3598
1 Jan 2012 22:43:52.000	5.000	30.8745	34.874	-177.0953	-0.2441	-1.9234	0.0000	0.0000	-179.2628
1 Jan 2012 22:44:52.000	5.000	30.8745	34.874	-176.7293	-0.2028	-1.5691	0.0000	0.0000	-178.5032

Fig. 6.28 Reporte generado para el escenario creado

En este caso no se presentará la tabla del reporte obtenido con STK sino que nos enfocaremos al análisis del sistema a través de la representación gráfica de algunos parámetros y el estudio de la representación 2D de nuestro escenario.

Si vemos las representaciones 2D y 3D notamos que ya existen modificaciones.

En el caso de la visualización 2D se observan una serie de líneas las cuales representan los periodos de las distintas órbitas en la cuales se tiene línea de vista. Esto significa que no en todas las trayectorias descritas por el satélite va a ser posible acceder desde la ubicación en la estación terrena.

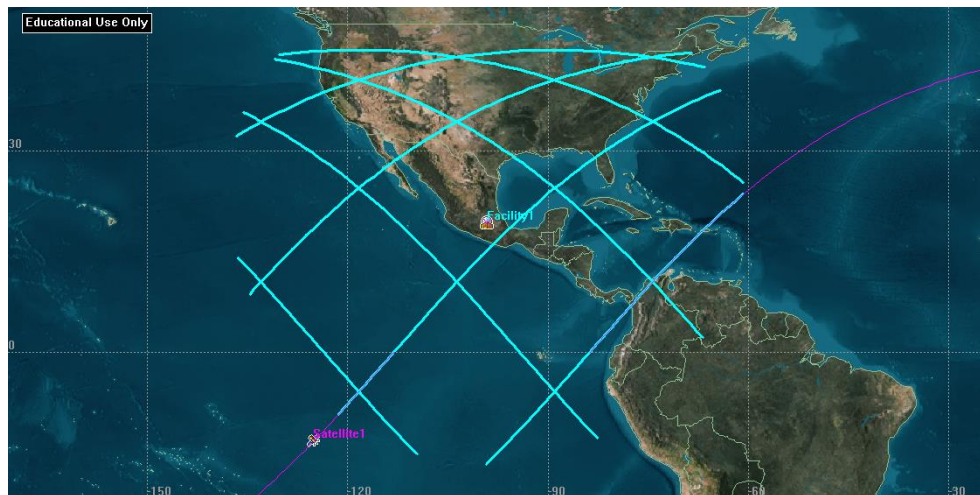


Fig. 6.29 Representación 2D del acceso al satélite por la estación terrena

En el caso del gráfico 3D se presenta el momento en el que existe comunicación entre los dos extremos.

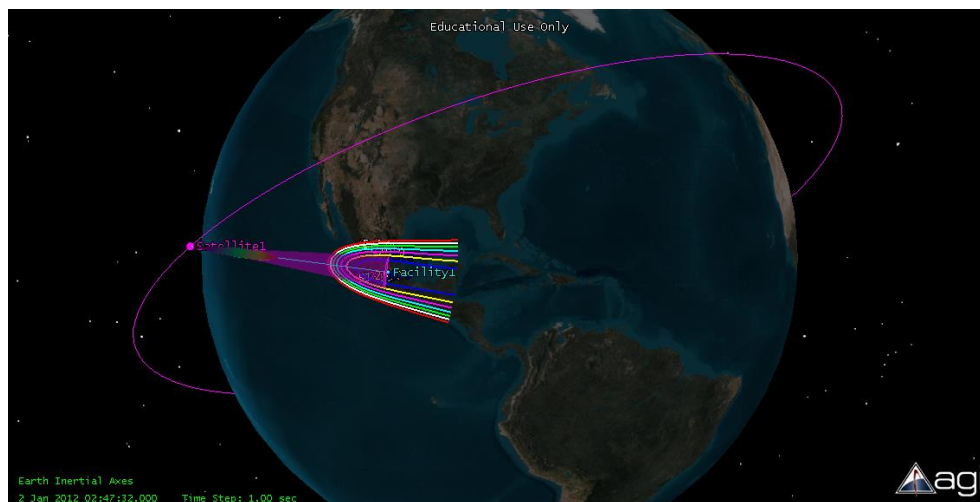


Fig. 6.30 Representación 3D del acceso al satélite por la estación terrena

Ahora analizaremos el comportamiento de algunas variables de interés de manera gráfica. Para ello regresamos a la pestaña "Report & Graph Manager", seleccionamos la carpeta destinada a nuestros estilos (que tiene el nombre de nuestro escenario) y damos clic en el botón "Create New Graph Style". Lo anterior nos crea un nuevo estilo de gráfica el cual renombramos como *RIP* que viene de la potencia isotrópica recibida.

Después de haber cambiado el nombre se nos abre otra ventana dentro de la cual nos dirigiremos a la llave "Link Information" y buscamos el parámetro de interés y lo pasamos al eje Y.

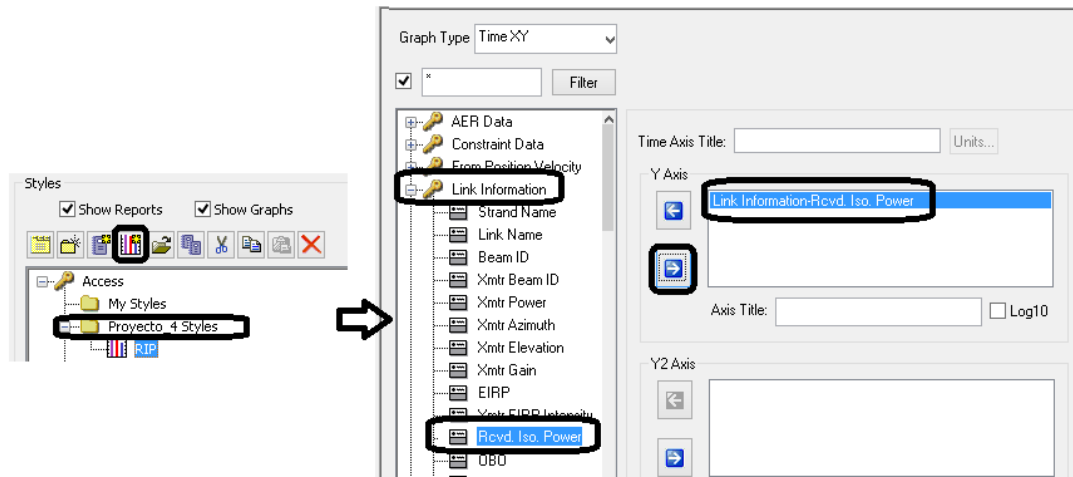


Fig. 6.31 Creación de un nuevo estilo de gráfico

Nuevamente nos regresamos a la pestaña "Report & Graph Manager" y damos doble clic sobre el nuevo estilo de gráfico creado "RIP". A continuación se muestra el resultado.

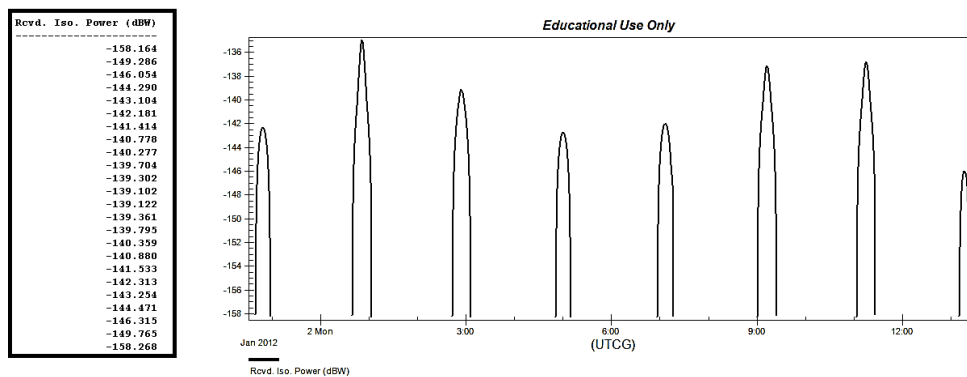


Fig. 6.32 Gráfico correspondiente a la variación del parámetro (RIP)

Ahora procedemos a limitar el nivel de la potencia isotrópica recibida, lo que nos permitirá descartar valores de (RIP) menores a -145 [dBW].

Para ello nos vamos a las propiedades del receptor (que será el elemento que impondrá esa limitación).

Nos dirigimos a la opción "Constraints" en el apartado "Comm" y buscamos el característica que deseamos limitar (en este caso "Rcvd Isotropic Power" al cual establecemos un valor mínimo de -145 [dBW]).

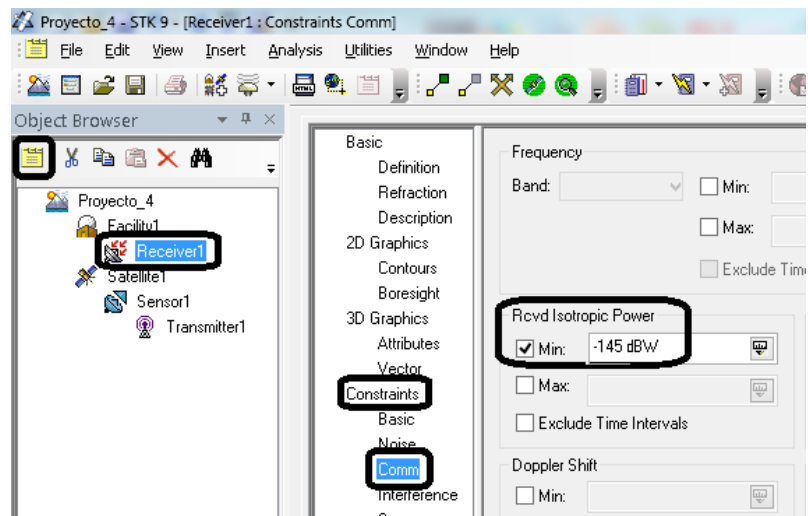
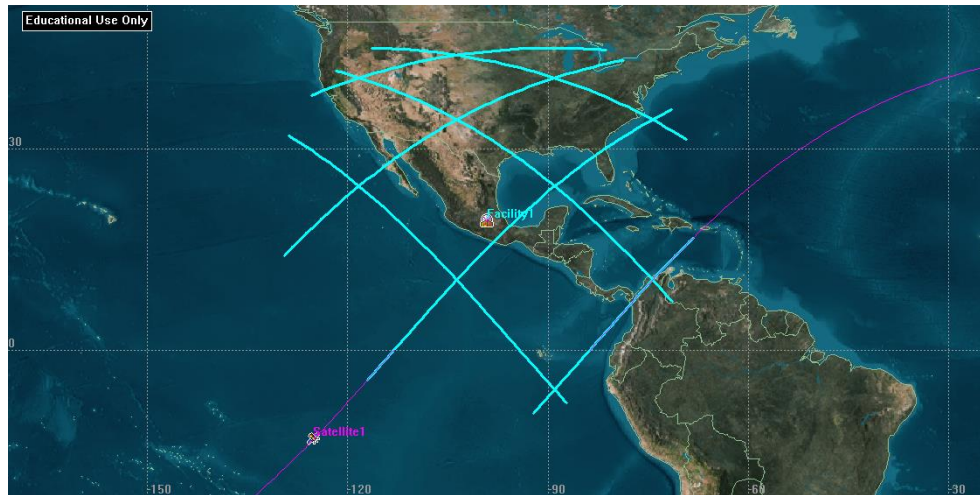


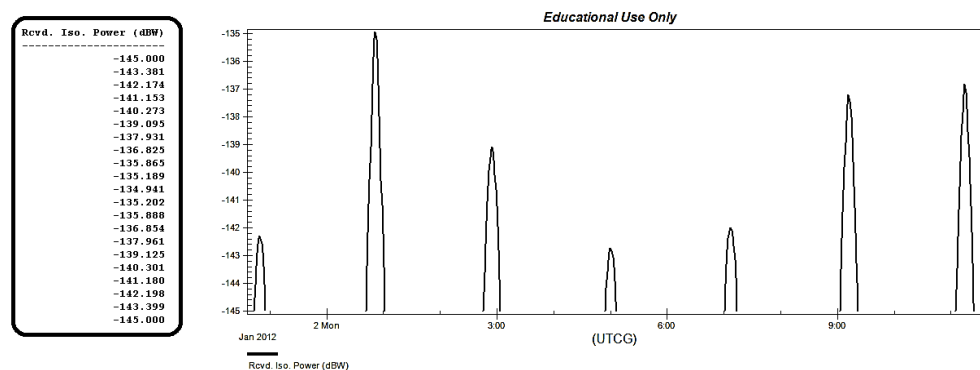
Fig. 6.33 Limitando el valor de la potencia isotrópica recibida (RIP)

Al observar nuevamente la representación 2D del escenario observaremos claramente el impacto que tuvo esta imposición en el nivel de la potencia isotrópica recibida (RIP) en los tiempos de acceso. Si comparamos la imagen siguiente con la obtenida previamente (ver Fig. 6.29) notaremos dicha variación.



Si nos regresamos a la pestaña "Report" y damos clic en el icono "Refresh" vemos que ahora los valores correspondientes a la variable de estudio se encuentran por encima del valor establecido de -145 [dBW].

La curva que acompaña a los datos en la siguiente imagen se obtienen de la misma manera que en el caso del gráfica de la potencia isotrópica reciba (RIP) previamente obtenido (ver Fig. 6.32).



Si queremos mejorar el rendimiento del enlace ante la restricción previamente impuesta, entonces tenemos que conocer cuales son los parámetros se encuentran relacionados con la (RIP).

Podríamos incrementar el nivel de ganancia del transmisor dado que es una propiedad que se puede controlar y de la cual dependen la potencia isotrópica recibida.

Por tanto, para realizar dicha modificación nos vamos a la ventana de propiedades del transmisor.

Ahora recordemos que la ganancia de la antena (en este caso de tipo "Gaussian") se encuentra ligada con el diámetro así que habrá que cambiarlo.

Nos dirigimos a la pestaña “Antenna” y fijamos un diámetro 1.5 [m]. La modificación anterior nos da como resultado una ganancia de 34.39 [dB] que es mayor al que se tenía previamente (antena de 1 [m] y $G=30.87$ [dB]) (ver Fig. 6.25).

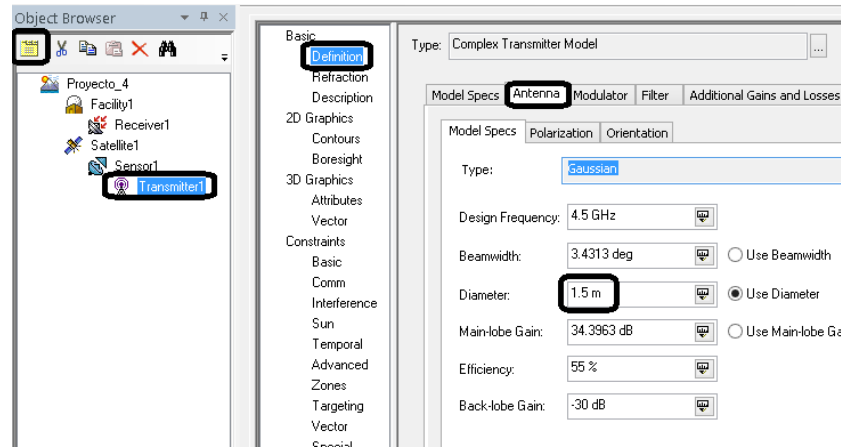


Fig. 6.36 Modificación de la ganancia de transmisión para corregir la limitación del RIP

Otras modificaciones que se pueden realizar la incrementar el nivel de ganancia es a través de un aumento en la frecuencia de operación o cambiando el tipo de antena con un mejor patrón de radiación.

Si analizamos ahora el gráfico 2D de nuestro escenario tras haber modificado las propiedades del transmisor, nos daremos cuenta de ciertas mejoras en el acceso que se tiene al satélite en la estación terrena con respecto a la misma representación previa (ver Fig. 6.34).

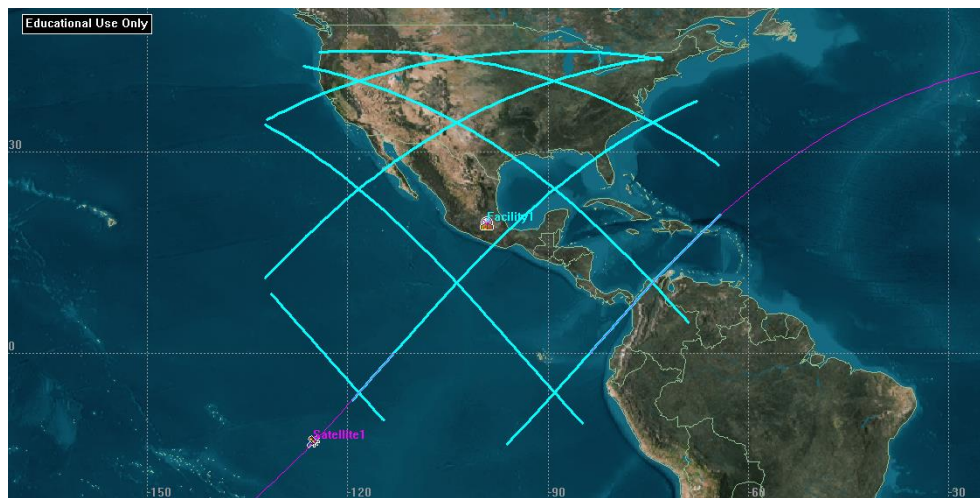


Fig. 6.37 Gráfico 2D después de realizar la corrección en el transmisor ante la limitación de RIP

Igualmente si damos clic en “Refresh” en la pestaña de “Report” veremos también cambios.

A continuación se presenta la nueva curva del parámetro (RIP) con la modificación en el nivel de ganancia, si se compara con la curva previa (ver Fig. 6.35) se podrán ver las diferencias.

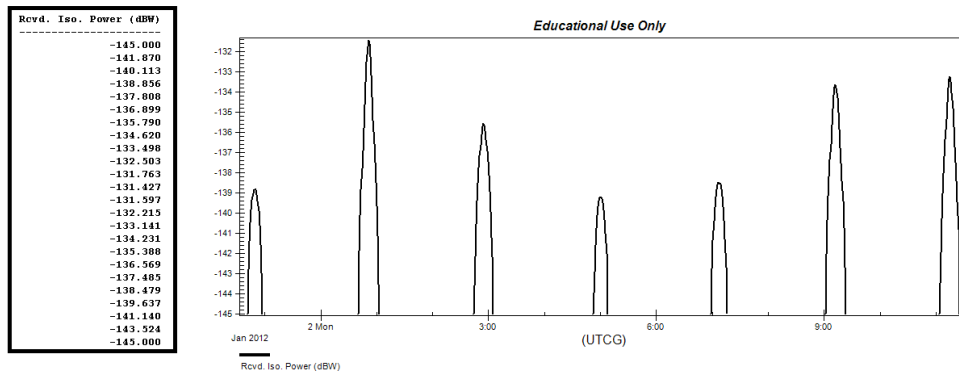


Fig. 6.38 Valores del parámetro (RIP) después de corregir la limitación

Para determinar los tiempos de acceso nos regresamos a la pestaña "Report & Graph Manager" y en la sección "Styles" habilitamos solamente la opción "Show Graphs" y después nos dirigimos a la carpeta "Installed Styles" en donde buscamos las gráficas "Access duration" y "Access".

Las curvas que a continuación se presentan son para el escenario con limitación en el valor del (RIP) y cuando incrementamos el nivel de ganancia de la antena.

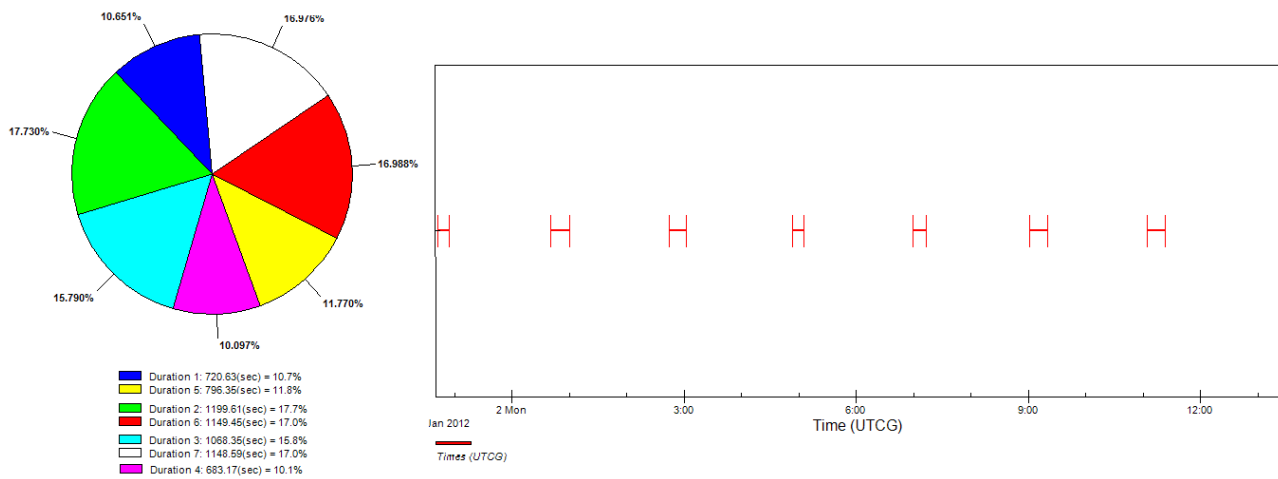


Fig. 6.39 Características de los tiempos de acceso al satélite con limitación de (RIP)

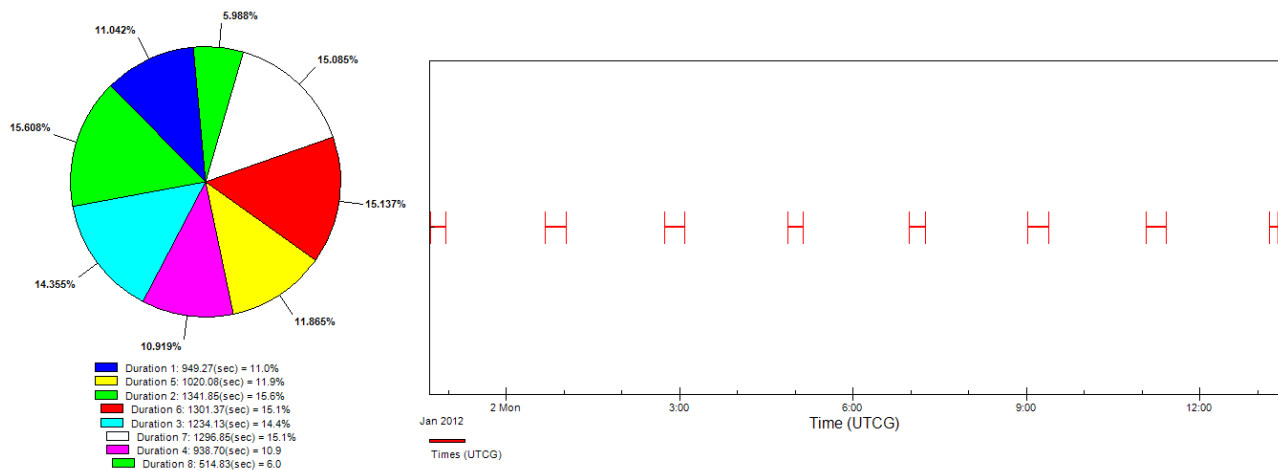


Fig. 6.40 Características de los tiempos de acceso al satélite con el incremento de ganancia de la antena

Ahora analizaremos el caso cuando restringimos el valor del desplazamiento Doppler, dicho parámetro se encuentra relacionado con la capacidad del receptor de ajustar su frecuencia ante las posibles variaciones en función del movimiento que lleva a cabo el satélite. La expresión empleada por STK para calcularla es:

Frecuencia recibida por el efecto Doppler :

$$f_{Rx} = f_{Tx} \sqrt{\frac{c - \dot{r}}{c + \dot{r}}} \rightarrow \begin{cases} c = 3 \times 10^8 \left[\frac{m}{s} \right] \\ \dot{r} : \text{Velocidad relativa entre el transmisor y el receptor} \end{cases}$$

Antes de continuar debemos quitar la limitante establecida al (RIP) y la modificación del diámetro de la antena, regresando al estado inicial del escenario. Habiendo realizado lo anterior, damos clic en el icono de "Refresh" para actualizar el reporte. Si analizamos la columna referente "Freq. Doppler Shift (kHz)" vemos que este presenta una variación máxima de aproximadamente de ±80 [kHz].

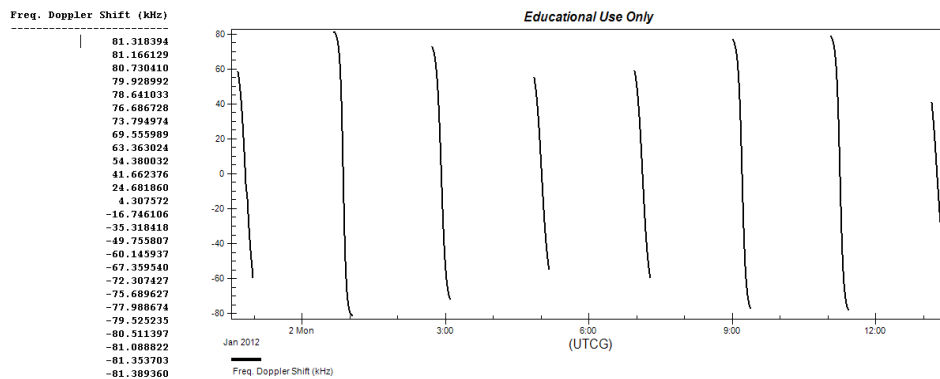


Fig. 6.41 Valores del desplazamiento de frecuencia por efecto Doppler

En este caso estableceremos el valor que puede tomar a un rango entre ±50 [kHz]. Para ello nos vamos las propiedades del receptor en la opción "Constraints" y apartado "Comm" y colocamos el nivel máximo y mínimo para la nueva variable de estudio.

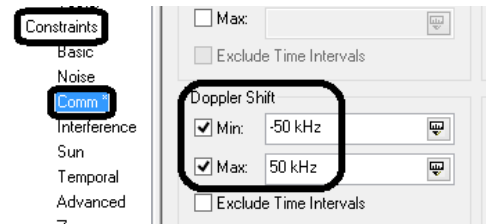


Fig. 6.42 Limitando el valor del desplazamiento de frecuencia Doppler

Regresamos al reporte y actualizamos para corroborar que los datos de "Shift Doppler" se han restringido a la configuración anterior.

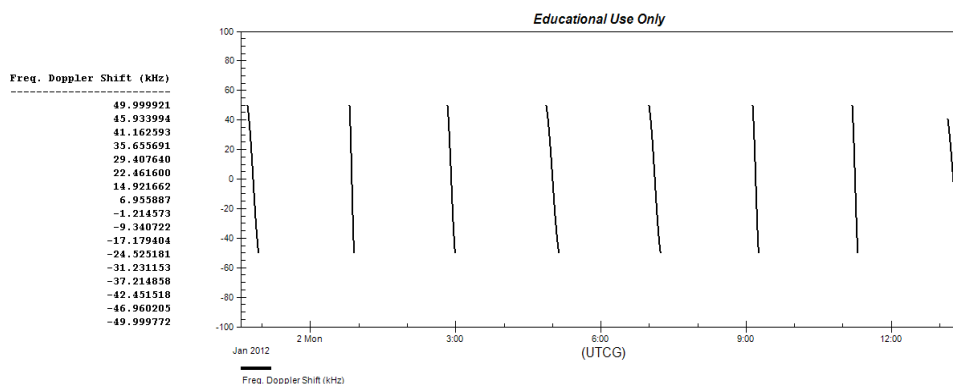


Fig. 6.43 Valores del desplazamiento de frecuencia Doppler después de limitarlo

Analizamos el comportamiento del escenario bajo la nueva restricción, en la representación 2D vemos nuevamente las consecuencias en comparación a la situación original (ver Fig. 6.29).

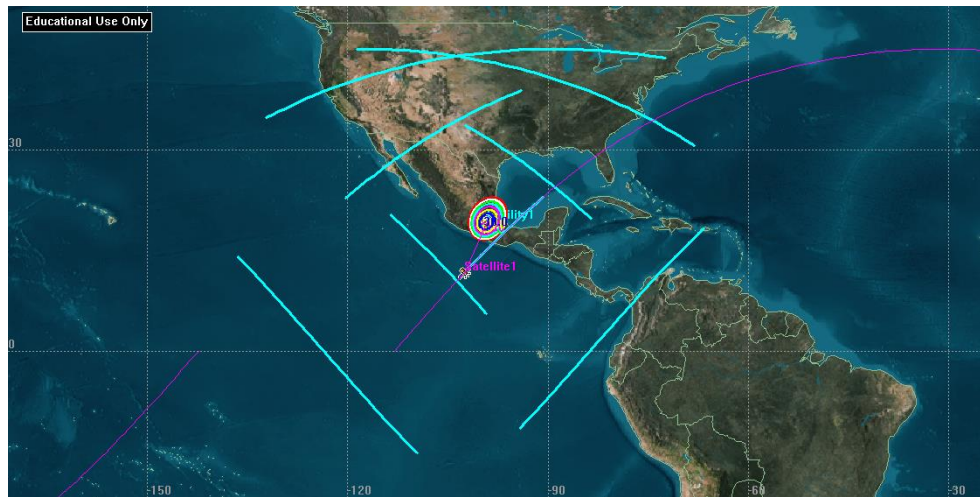


Fig. 6.44 Gráfico 2D después de establecer la limitación en el desplazamiento Doppler

En este caso los cambios de frecuencia por efecto Doppler no pueden corregirse a través de modificaciones en las propiedades de los equipos (transmisor o receptor) dado que es un fenómeno externo producido por los movimientos del satélite alrededor de su órbita. Sin embargo, el conocer sus variaciones es útil para el diseño de algún dispositivo electrónico que las compense o también para el estudio alguno fenómeno que este ligado.

Ahora realizaremos una restricción del parámetro densidad de flujo de potencia, para ello primero quitamos las restricciones impuestas anteriormente en el receptor. Después nos ubicamos en la pestaña "Report" y damos clic en el icono "Refresh". Ahora vemos que los valores que toma "Flux Density" están en el intervalo de -100 [dBW/m²] y -123 [dBW/m²].

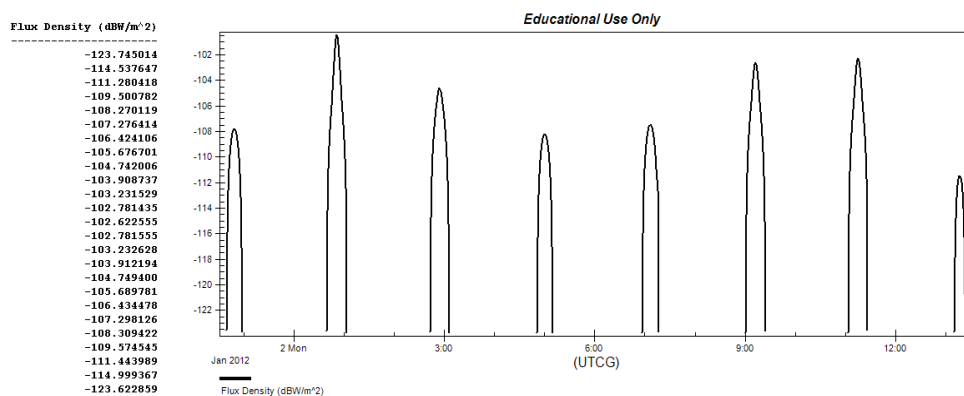


Fig. 6.45 Valores del parámetro densidad de flujo para el enlace de comunicaciones

Ahora restringiremos el valor de este parámetro de estudio a valores mayores que -110 [dBW/m²]. Para ello nos vamos a las propiedades del transmisor.

Ahora nos ubicamos en la opción de "Constraints" y el apartado "Comm", y por último restringimos el nivel de "Flux Density" para que tenga un mínimo de -110 [dBW/m²].

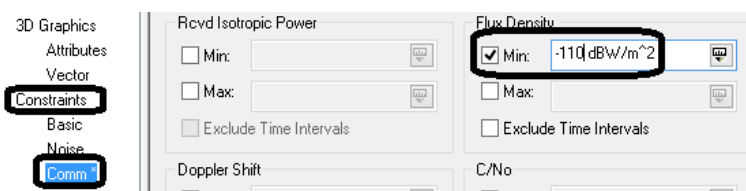


Fig. 6.46 Limitación al valor de la densidad de flujo en el transmisor

Enseguida observamos los cambios presentados en la visualización 2D. Nuevamente nos damos cuenta de los efectos de limitar la variable de observación (reducción de los trayectos descritos por la órbita del satélite que cumplan con los requerimientos impuestos) en comparación al escenario inicial (ver Fig. 6.29).

Si actualizamos el reporte veremos que ahora los valores que toma el parámetro "Flux Density" se encuentran por debajo de -110 [dBW/m²].



Fig. 6.47 Gráfico 2D del escenario después de limitar el valor de la densidad de flujo

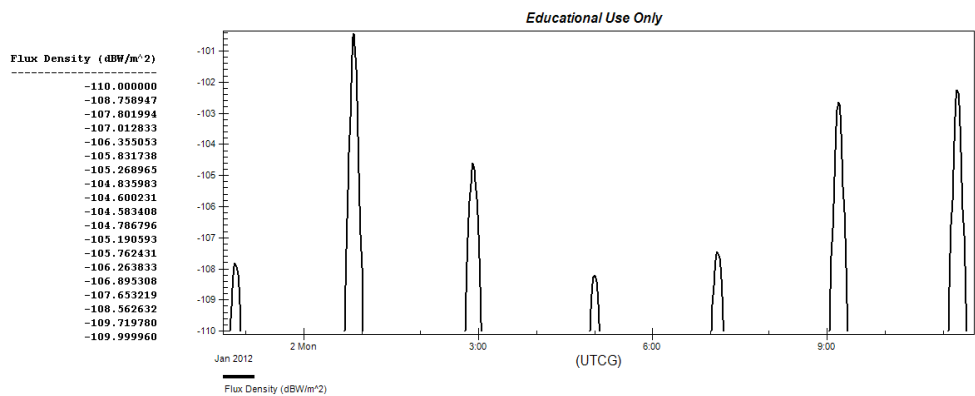


Fig. 6.48 Valores de la densidad de flujo después de limitar su valor

Al igual que en el caso de la (RIP), la densidad de flujo no es susceptible de mejorarse a través de ajustes en las propiedades del receptor. La corrección se realiza a través de modificaciones en las propiedades del transmisor, entre las cuales tenemos: eliminar las pérdidas de apuntamiento de -1 [dB] o con un incremento en el nivel de potencia de transmisión de 5 [dBW] a 10 [dBW].

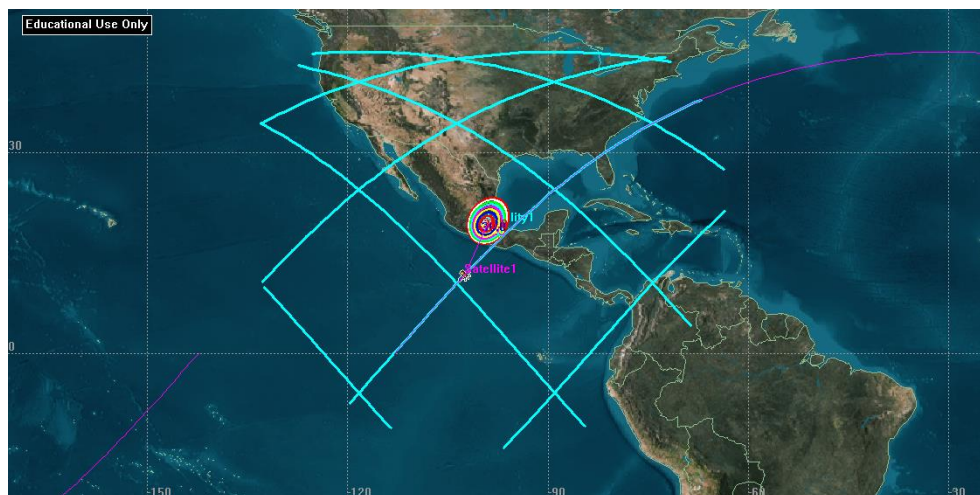


Fig. 6.49 Representación 2D del acceso al satélite tras incrementar el nivel de potencia con la limitación de la densidad de flujo

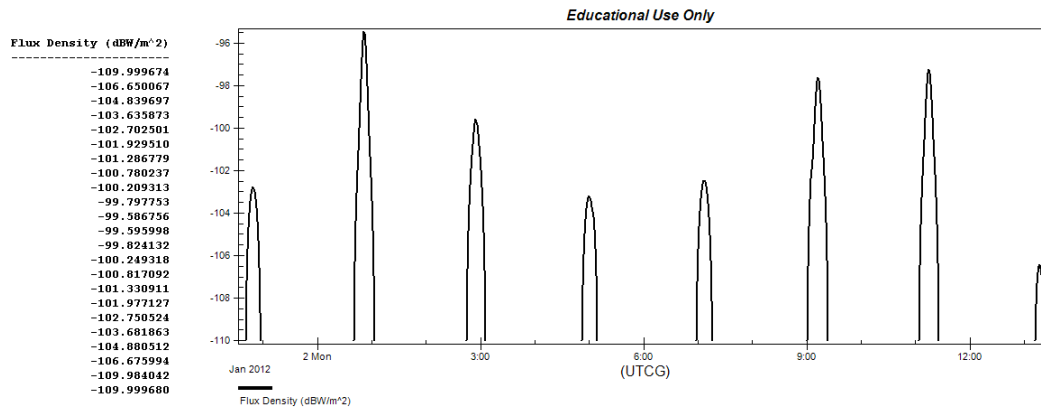


Fig. 6.50 Valores de la densidad de flujo al aumentar el nivel de potencia a 10[dBW]

Ahora analizaremos el caso en el que restringimos el valor que puede tomar el parámetro (C/N) (relación portadora a ruido) para ello antes de iniciar debemos quitamos todas las restricciones y modificaciones que existan.

Una vez realizado lo anterior, refrescamos el reporte generado para observar que valores toma (C/N). En este caso vemos que tiene variación en el rango de -11 [dB] a 17 [dB].

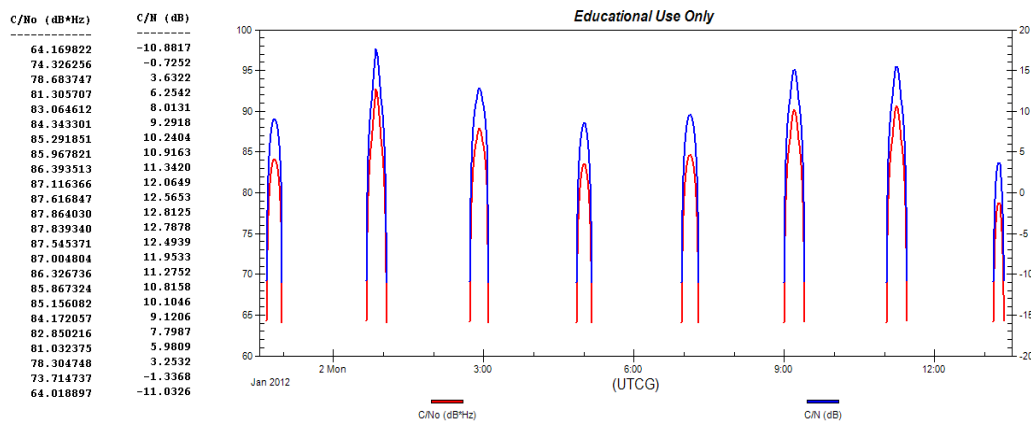


Fig. 6.51 Variación de los parámetros (C/No) y (C/N)

Ahora procederemos a restringir el valor de (C/N) a un mínimo de 10 [dB].

Esto lo realizamos en el receptor en la opción "Constraints" en el apartado "Comm" como se muestra a continuación.

Al dar clic en "Apply", nos dirigimos a la representación en 2D y veremos gráficamente cual es el impacto de esta limitación.

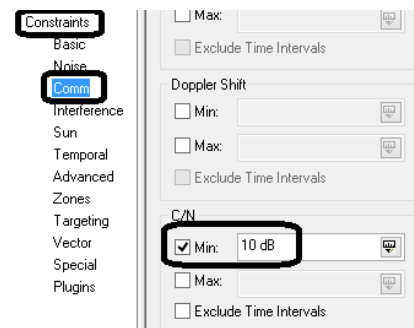


Fig. 6.52 Limitando los valores de (C/N)

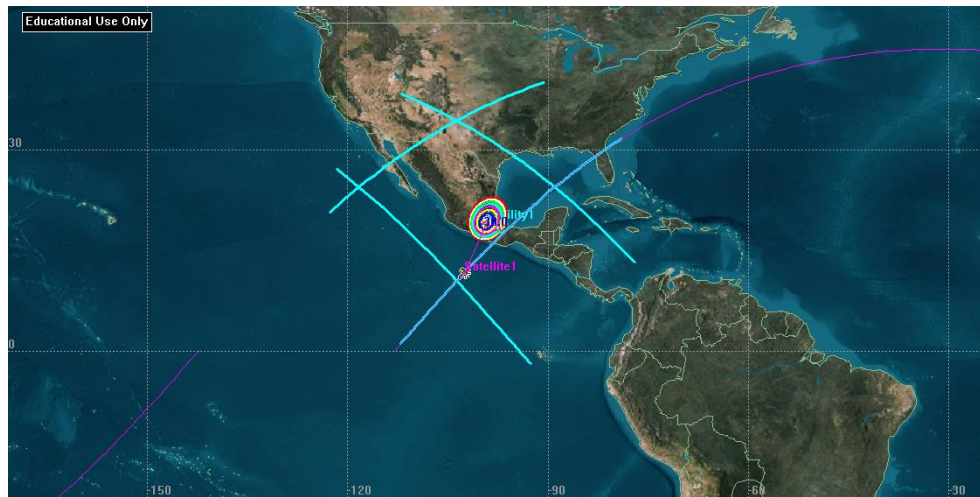


Fig. 6.53 Representación 2D del escenario ante la limitación del valor de (C/N)

En el caso del reporte, al dar clic en “Refresh” vemos que ahora el conjunto de valores que toma (C/N) son mayores o iguales a 10 [dB].

Y en este caso dado que el parámetro (C/N₀) esta relacionado con (C/N) los niveles que toma se encuentra en el rango de valores de 85 [dB/Hz] a 90 [dB/Hz].

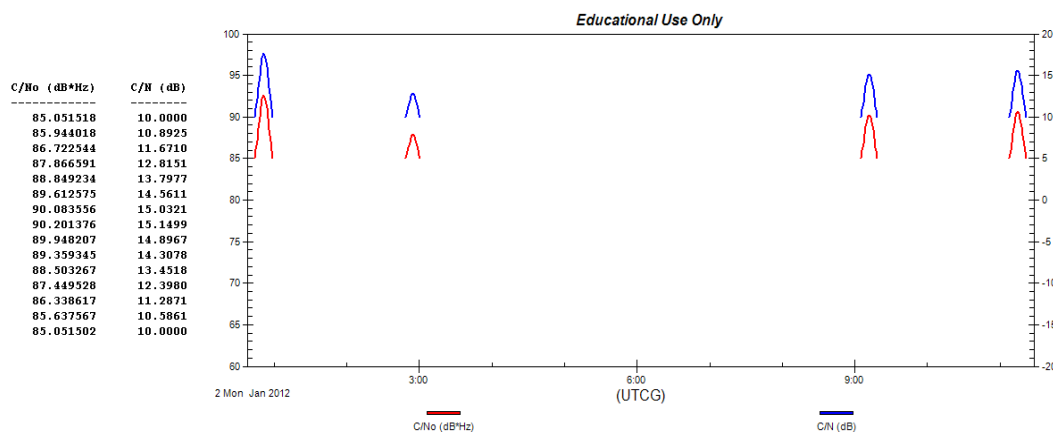


Fig. 6.54 Valores de (C/N₀) y (C/N) después de la limitación

En contraste con los otros escenarios, las mejoras pueden ser obtenerse a través de ajustes ya sea del equipo transmisor o receptor. Esto debido se corrobora al analizar las expresiones empleadas por STK:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right) = \frac{(EIRP)L_p L_a g_r}{kT_{eq}} \rightarrow \begin{cases} L_p : \text{Pérdidas por espacio libre} & L_a : \text{Pérdidas atmosféricas} \\ T_{eq} : \text{Temperatura equivalente de ruido} & EIRP : \text{Potencia Isotrópica Radiada Efectiva} \\ g_r : \text{Ganancia del receptor} & k : \text{Constante de Boltzmann} \\ BW_{RF} : \text{Ancho de banda RF} & \end{cases}$$

$$\left(\frac{C}{N}\right) = \frac{1}{BW_{RF}} \left(\frac{C}{N_0}\right)$$

A continuación se muestran los cambios generados en la representación 2D ante las posibles modificaciones realizadas para corregir la limitación.

El primer cambio será a través de un incremento en el nivel de ganancia del receptor a 25 [dB].

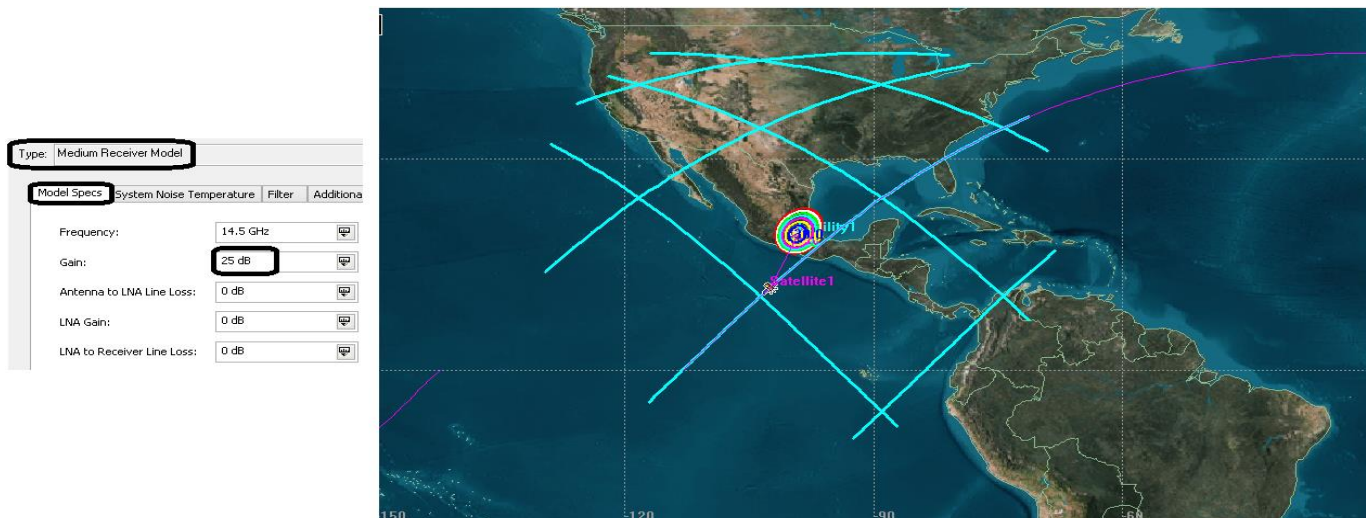


Fig. 6.55 Efecto de incrementar el nivel de ganancia del receptor sobre el acceso al satélite

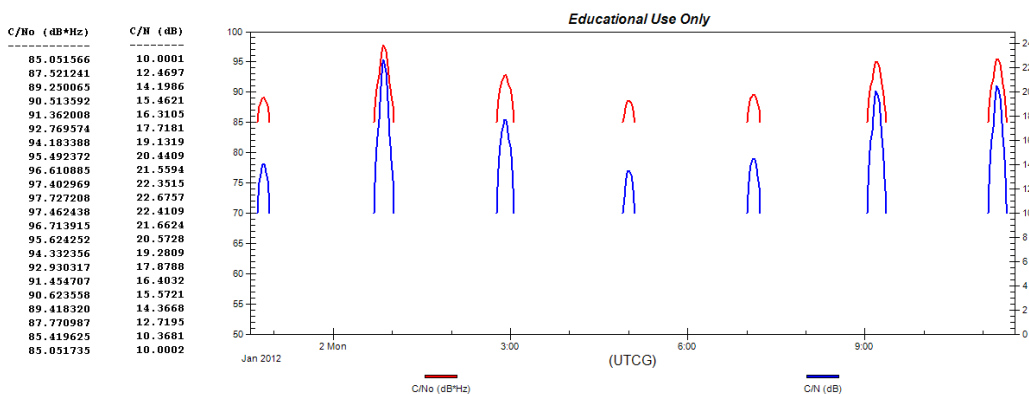


Fig. 6.56 Valores de (C/N₀) y (C/N) después de incrementar el nivel de ganancia del receptor

Otra forma es reduciendo el valor de la figura de ruido en el receptor a 0.5 [dB].

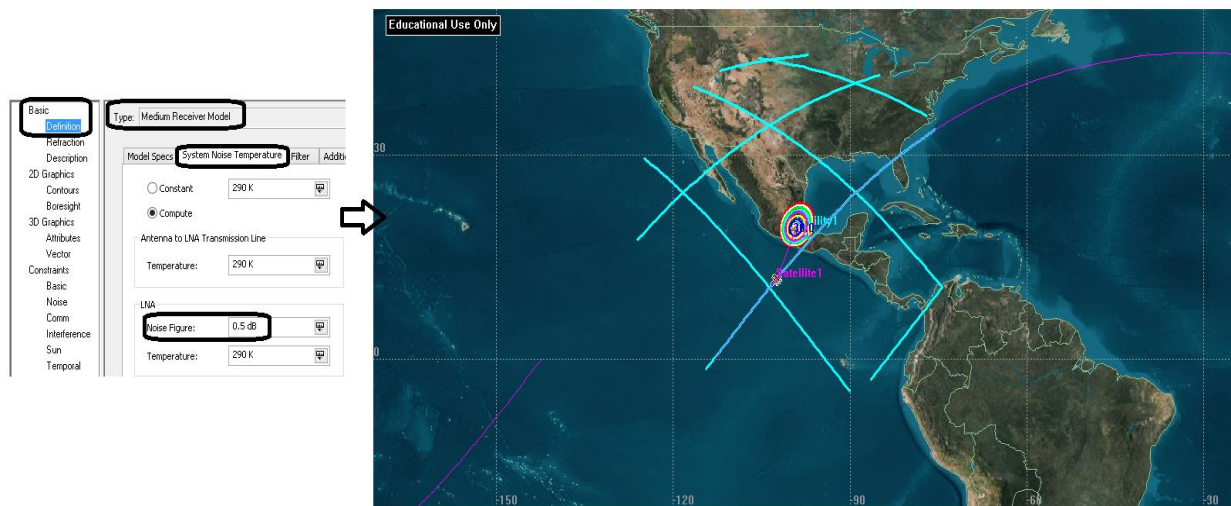


Fig. 6.57 Efecto de reducir la figura de ruido del receptor sobre el acceso al satélite

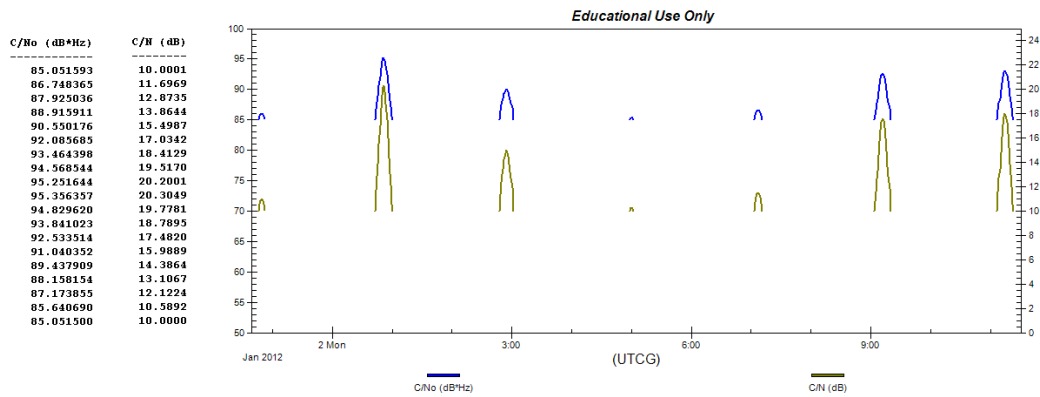


Fig. 6.58 Valores de (C/N₀) y (C/N) después de reducir el valor de la figura de ruido del receptor

También se mejoran las condiciones del enlace bajo la restricción impuesta a través de cambiar el tipo de modulación empleada.

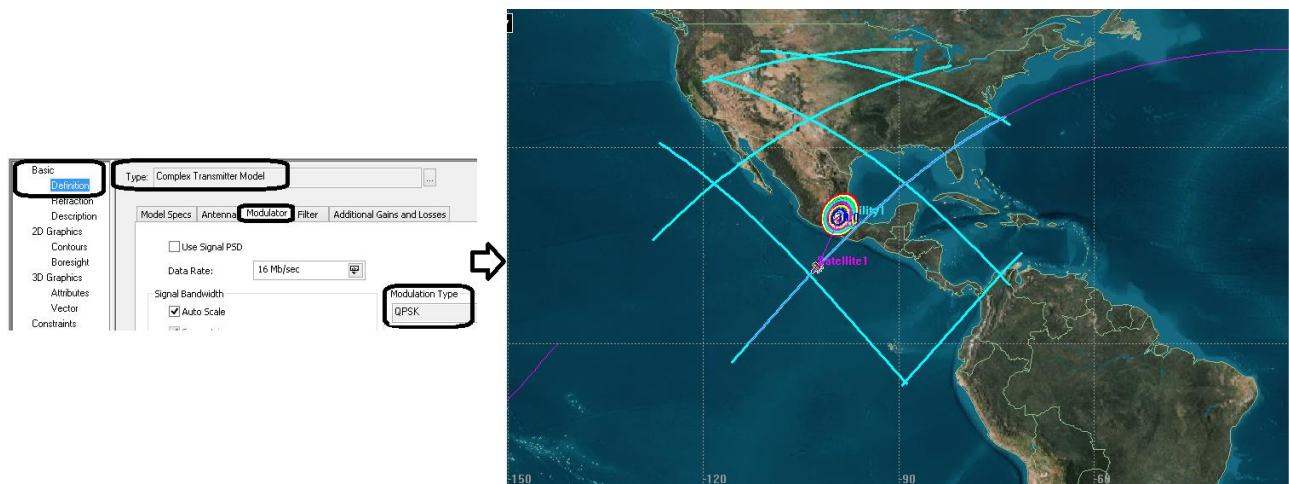


Fig. 6.59 Efecto de cambiar el tipo de modulación del transmisor sobre el acceso al satélite

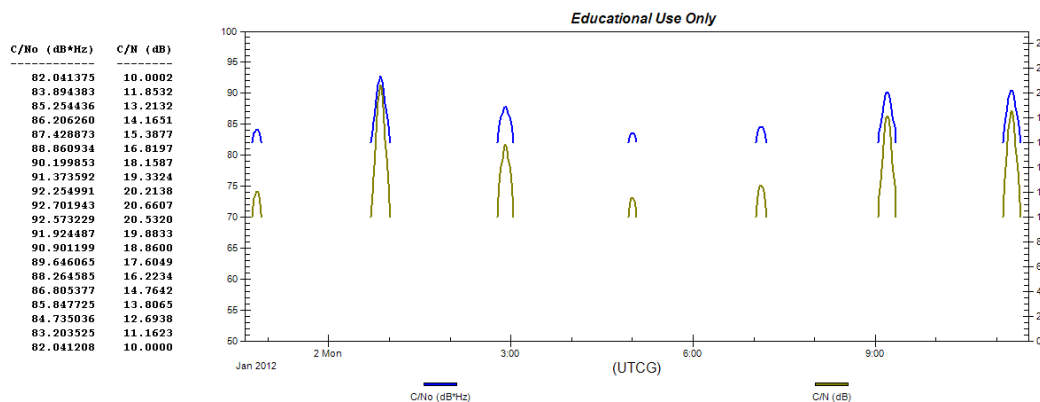


Fig. 6.60 Valores de (C/N₀) y (C/N) después de cambiar el tipo de modulación del transmisor

O estableciendo en el receptor una pre-ganancia.

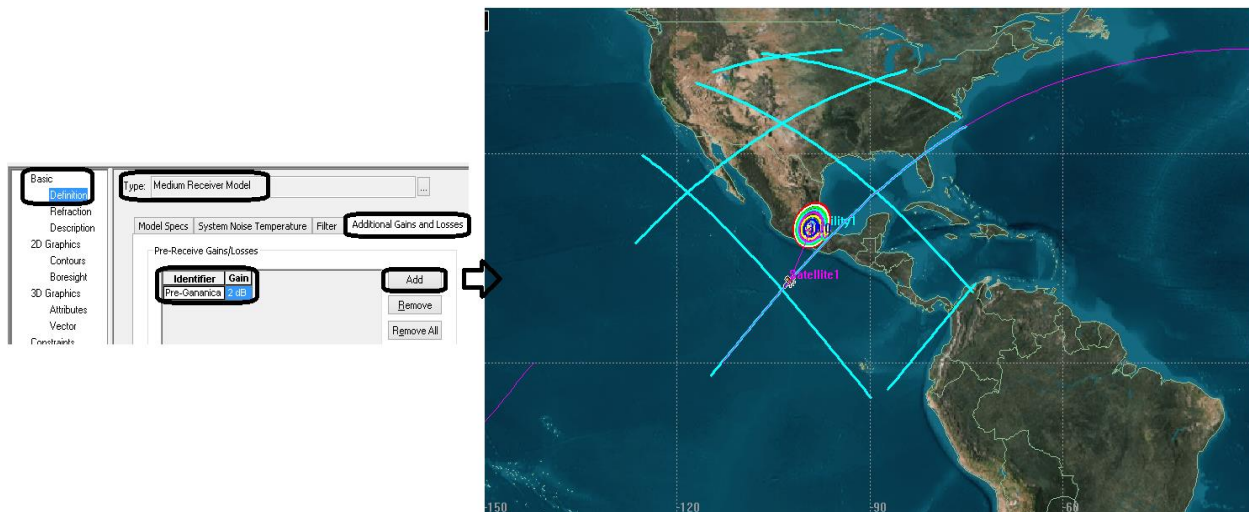


Fig. 6.61 Efecto de añadir una pre-ganancia al receptor sobre el acceso al satélite

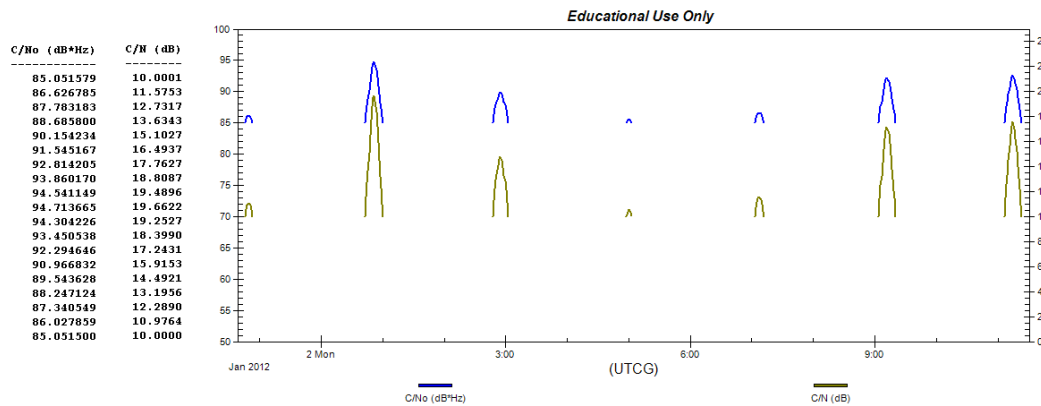


Fig. 6.62 Valores de (C/No) y (C/N) después de añadir una pre-ganancia al receptor

De los resultados obtenidos anteriormente para cada una de las modificaciones realizadas vemos claramente que los tiempos de acceso y datos del reporte mejoran a pesar de imponer la limitación del (C/N).

Es una practica común por parte de los proveedores de receptores de señales satelitales estipular un valor mínimo para el parámetro (C/N).

La imposición de una restricción a los valores de (C/N) a través del uso de este tipo de simuladores de escenarios es una manera fácil de modelar este requisito en el diseño de enlaces de comunicación.

Para tener una mayor confianza en la calidad y fiabilidad del enlace, es bueno añadir un cierto margen de desvanecimiento a los requisitos ya impuestos. Una forma de llevar a cabo esto es aumentar el valor mínimo de la restricción (C/N).

Por último aprovechando la configuración particular de la órbita del satélite se presentan las variaciones en las atenuaciones por lluvia y gases atmosféricos.

Como vemos en la curva sus niveles tienden a incrementarse a medida que los ángulos de elevación se reducen, siendo mayores los correspondientes a la precipitación.

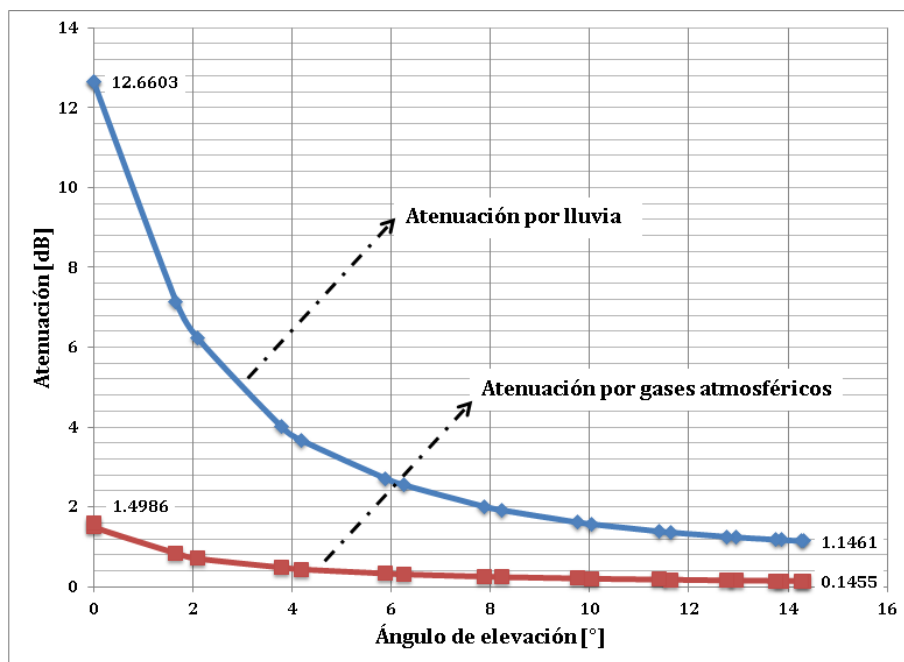


Fig. 6.63 Variación de la atenuación por lluvia y gases atmosféricos para una órbita no geoestacionaria

CAPÍTULO 7

7.1. Análisis y diseño de un sistema de comunicaciones por satélite con STK

En este proyecto se establecerá la conformación y estudio de un modelo conformado por dos estaciones terrenas conectadas a través de un satélite geostacionario. Primero lo analizaremos bajo un escenario de cielo despejado y después con la presencia de fenómenos atmosféricos.

A continuación se describe el proceso de diseño del escenario para operar en una banda (C, Ku y Ka), seguidamente se procede a obtener un informe de algunas características del sistema.

Posteriormente se realizará una comparativa de como varían los parámetros en los reportes en función de la frecuencia empleada y más tarde en relación de si existen efectos atenuantes atmosféricos o no.

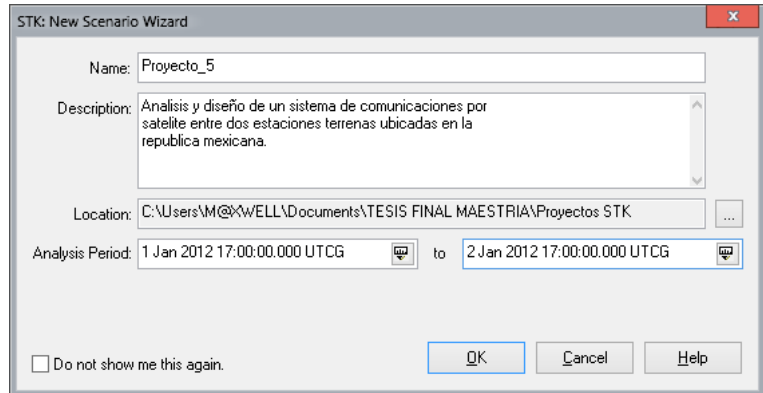


Fig. 7.1 Creación de un sistema de comunicación por satélite

Comenzamos insertando los distintos objetos al modelo. Para agregar las instalaciones empleamos la ventana "Insert STK Objects" y en el método seleccionamos "Insert From City Database". Habilitamos la opción "Country" y buscamos a Mexico, damos clic en el botón "Search".

En este caso para facilitar la ubicación presionamos sobre "Province", esto nos ordena alfabéticamente las distintas posiciones geográficas en función del estado de la república mexicana.

La estación transmisora la ubicaremos en el Distrito Federal y la receptora en Chihuahua.

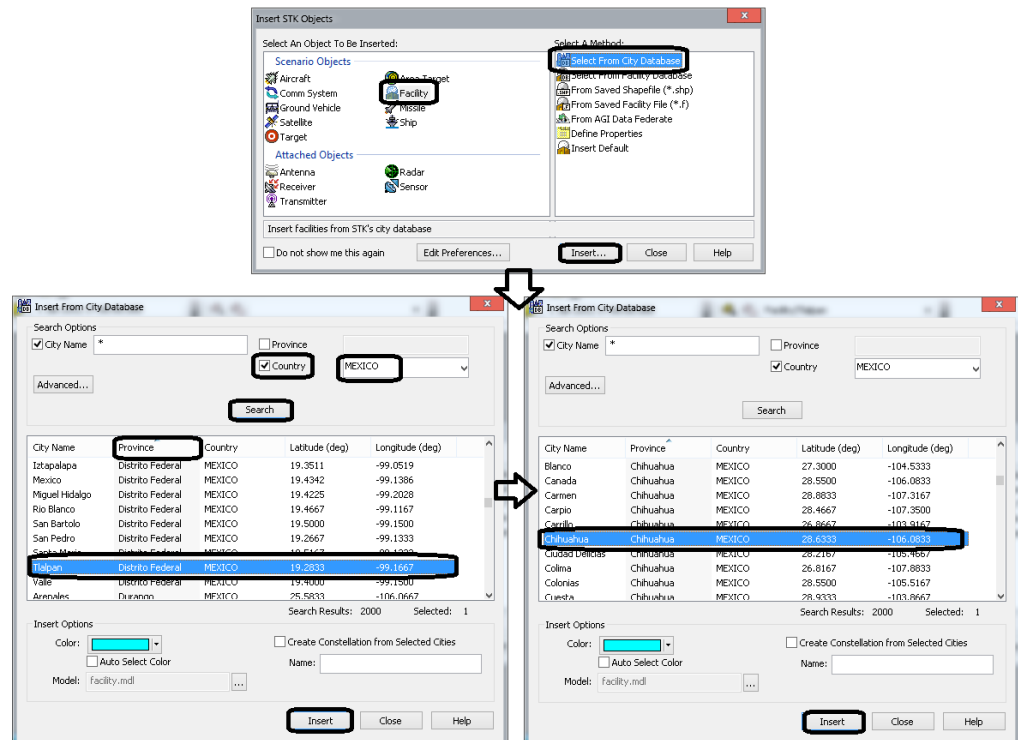


Fig. 7.2 Insertando y ubicando las estaciones terrenas transmisora y receptora

Tabla 7.1 Ubicación de la estación terrena transmisora y receptora

Estación terrena	Ubicación	Latitud	Longitud
Transmisora	Distrito Federal, Tlalpan	19.2833	-99.1667
Receptora	Chihuahua, Chihuahua	28.6333	-106.083

A continuación insertamos al satélite, seleccionamos una órbita de tipo “Geosynchronous” con una posición orbital de 113 [°] Oeste y un ángulo de inclinación de 0 [°].

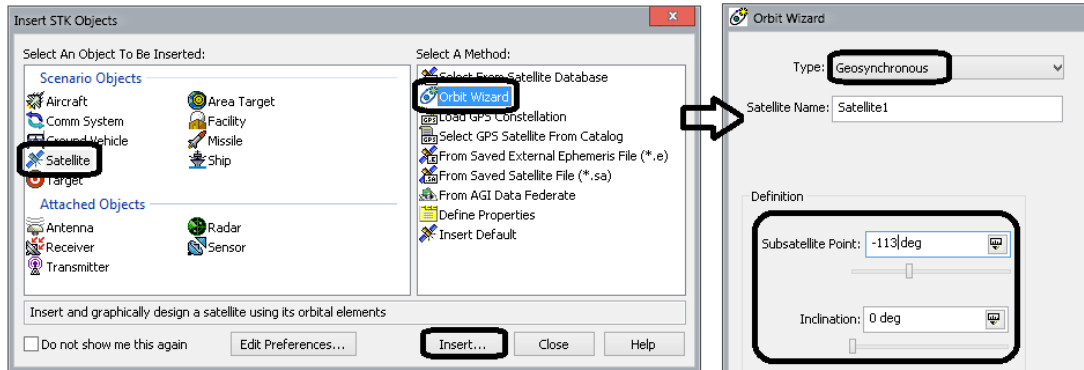


Fig. 7.3 Insertando y ubicando el satélite geostacionario

A continuación añadiremos un sensor a cada instalación y dos al satélite, para ello seleccionamos al objeto “Sensor” en la ventana “Insert STK Objects”.

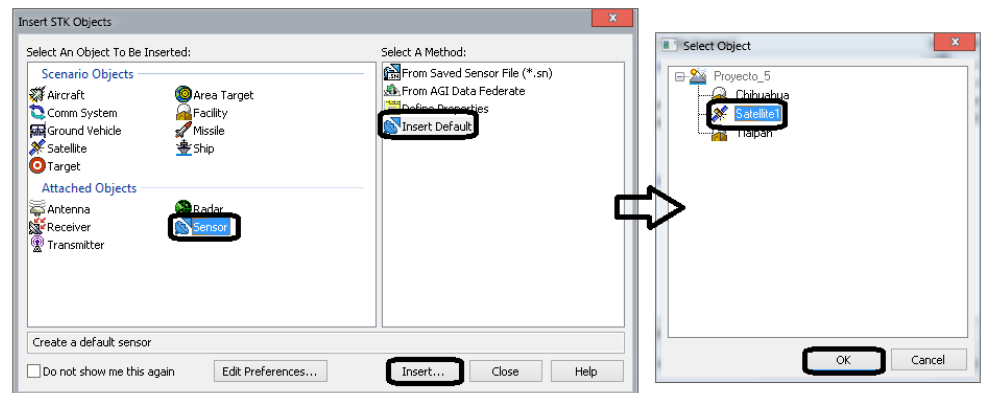


Fig. 7.4 Insertando los sensores a cada una de las estaciones terrenas y el satélite

Lo siguiente es agregar los equipos transmisor y receptor.

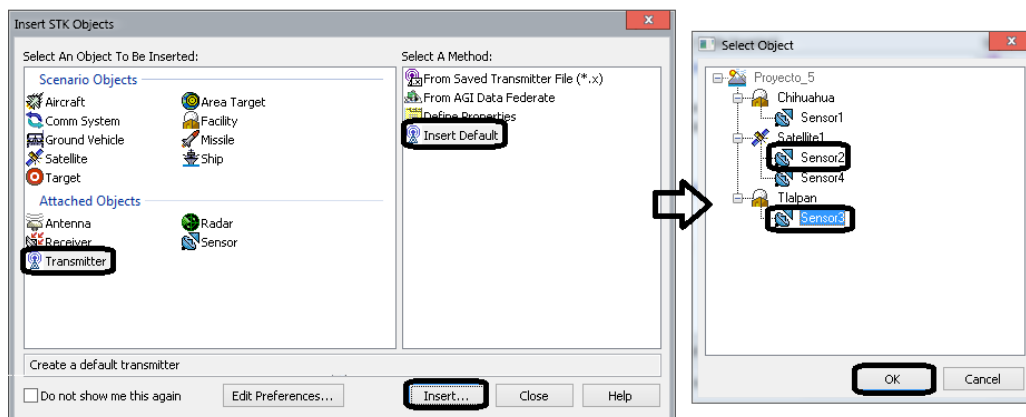


Fig. 7.5 Insertando los transmisores

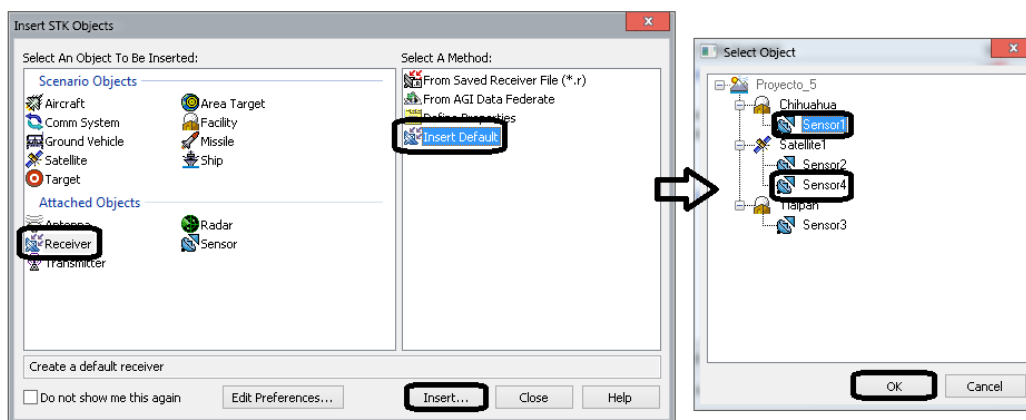


Fig. 7.6 Insertando los receptores

Para esta primera simulación trabajaremos en la banda Ka.

El enlace ascendente a 28 [GHz] y para descendente a 18.5 [GHz].

En el caso de transmisor seleccionamos el tipo *“Complex Transmitter Model”* mientras que el receptor *“Complex Receiver Model”*. Por otra parte cambiamos el tipo de antena a *“Parabolic”*.

Fijaremos un valor de PIRE de 80 [dBW] de la estación transmisora (para todos los casos).

Para ello seleccionamos la opción de variar la ganancia del lóbulo principal. Establecemos un nivel de 60 [dB] (en el apartado *“Antenna”*) considerando valor de potencia de 20 [dBW] (configurado en *“Model Specs”*) con la finalidad de alcanzar el PIRE deseado.

Esto automáticamente nos definirá el valor del diámetro de la antena parabólica en función de la frecuencia de operación.

Adema emplearemos una modulación QPSK en el apartado *“Modulator”*.

Por parte del equipo en el satélite dejamos marcada la opción *“Auto Track”* que nos permitirá sincronizar la frecuencia de recepción con la de transmisión.

En la sección *“Model Specs”* establecemos un nivel de ganancia del amplificador de bajo ruido de 20 [dB] y definimos las pérdidas de conexión (entre la antena-LNA y LNA-receptor) de 0.5 [dB].

En la opción *“Antenna”* asignamos una ganancia 40 [dB] para la antena.

En el caso de *“System Noise Temperature”* dejamos que los valores sean calculados por STK en vez de considerarlos constantes. Para ello habilitamos la opción *“Compute”* tanto del equipo receptor como en la sección *“Antenna Noise”*.

Además para la temperatura de ruido de la antena habilitamos todas las opciones que nos permita el programa (*“Earth”*, *“Sun”* y *“Cosmic Background”*). Para el valor de la Tierra dejamos los 290 K.

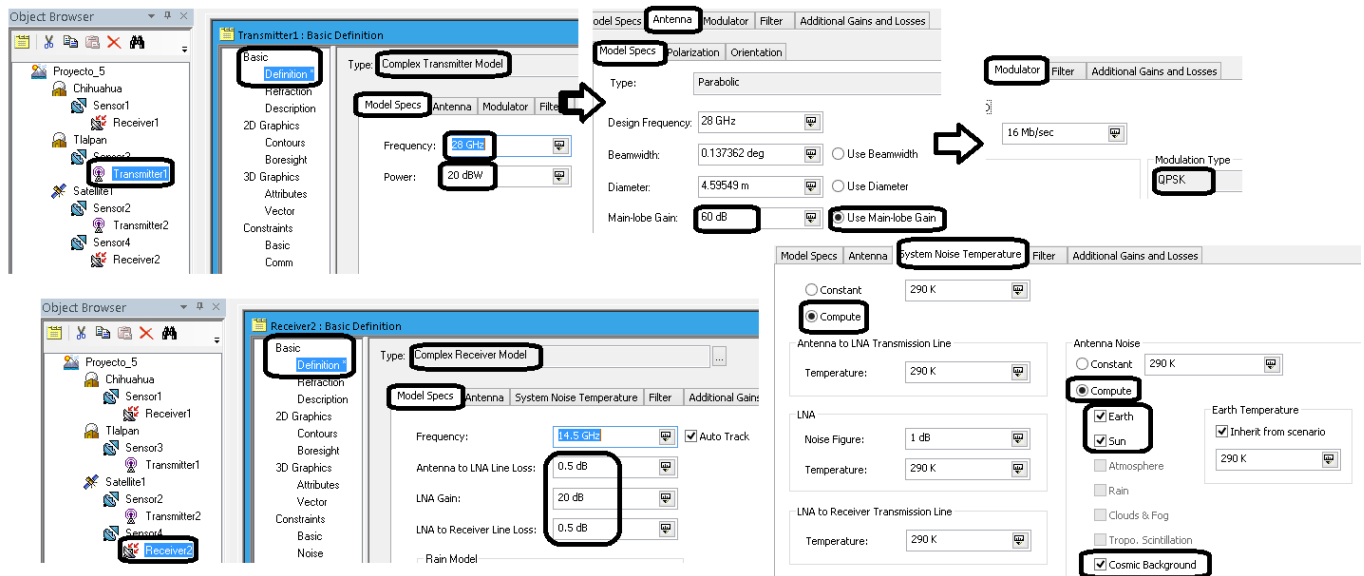


Fig. 7.7 Configuración de los equipos del enlace ascendente

Para el caso del enlace descendente entre el retransmisor y la estación receptora.

Cambiamos el tipo de retransmisor y receptor por “Complex Re-Transmitter Model” y “Complex Receiver Model” respectivamente. Además establecer una antena tipo “Parabolic” para los dos equipos.

Comenzamos configurando el equipo en el satélite.

Fijamos un valor de potencia 10 [dBW] y -110 [dBW/m²] en la densidad de flujo de saturación dentro de “Model Specs”.

Ahora nos dirigimos al apartado “Antenna”. Habilitamos la opción “Use Main-lobe Gain” y establecemos el valor de ganancia de 50 [dB] en la opción “Main-lobe Gain”.

Para finalizar definimos la frecuencia 18.5 [GHz].

Para ello debemos ir al apartado “Transfer Functions” y al subapartado “Frequency” para modificar el coeficiente con índice “0”. El valor que debemos insertar es función de la frecuencia del enlace ascendente y descendente de acuerdo con la siguiente expresión.

$$\text{Coeficiente}[0] = [\text{frecuencia descendente}]_{\text{Hz}} - [\text{frecuencia ascendente}]_{\text{Hz}}$$

En nuestro escenario particular tendremos lo siguiente:

$$\text{Coeficiente}[0] = 18500000000 - 28000000000$$

$$\text{Coeficiente}[0] = -9500000000$$

Las características de las secciones “Filter” y “Additional Gains and Losses” no se modificarán.

En el caso del receptor de Chihuahua establecemos los mismos valores que configuramos en el enlace ascendente (todo esto en el apartado “Model Specs”).

Pasando al apartado "Antenna" fijamos un nivel de ganancia de 45 [dB] (habilitado la opción "Use Main-lobe Gain"). Además de cambiar el tipo de antena a "Parabolic".

Por último nos dirigimos a la opción "System Noise Temperature" dejando que los valores sean calculados habilitando la opción "Compute" para los componentes y en "Antenna Noise".

Además en el caso de la temperatura de ruido de la antena marcamos todas las opciones que nos permita STK ("Sun" y "Cosmic Background").

Notamos en este caso que el programa no considera las contribuciones de ruido por parte de la Tierra.

Si se desea tomar en cuenta su efecto, estos deben ser ingresados en la opción "Other:" (todo esto en el apartado "Antenna Noise").

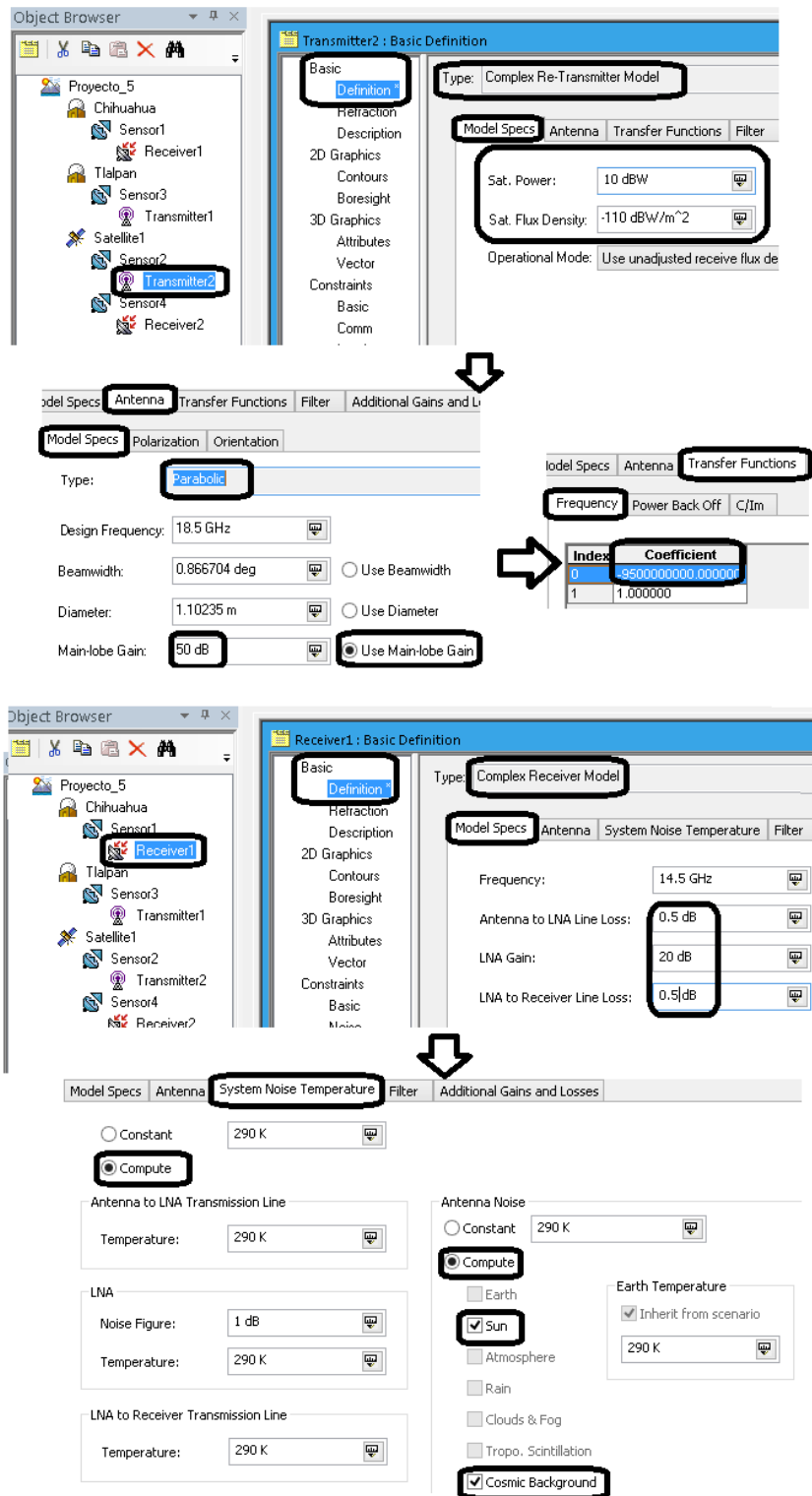


Fig. 7.8 Configuración de los equipos del enlace descendente

A continuación configuramos los distintos sensores.

En ambos enlaces (de subida y bajada) el tipo es "Half Power" y el apuntamiento es "Targeted".

El proceso de llevado a cabo en el enlace ascendente es el siguiente.

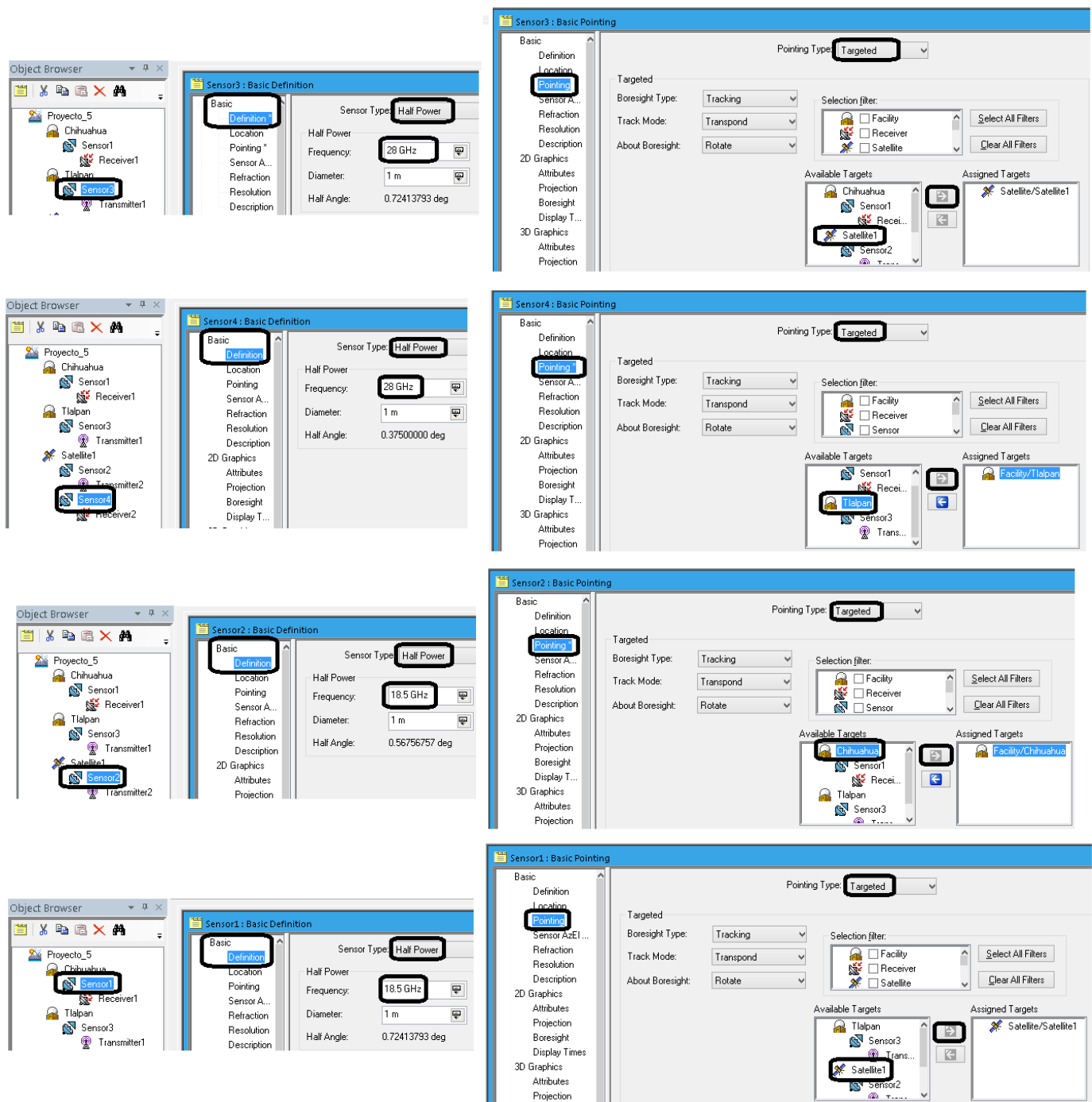


Fig. 7.9 Apuntamiento de lo sensores en el enlace ascendente y descendente

Notaremos claramente en la representación 3D que los campos de visión de los sensores se encuentran apuntando en la dirección respectiva para los enlaces de comunicación.

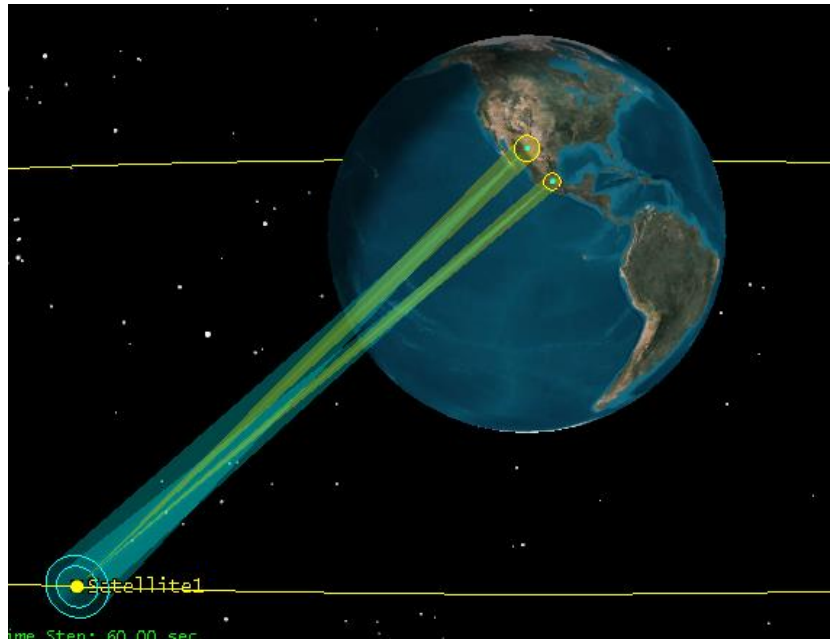


Fig. 7.10 Representación gráfica 3D del campo de visión de los sensores

Ahora utilizaremos el objeto “Chain” para encadenar los distintos elementos del escenario con la finalidad de establecer el orden del flujo de información.

Para ello seleccionamos objetos Proyecto_5 y damos clic a la pestaña del icono “New Object...” ubicado en la barra de herramientas e insertamos “Chain”

Ahora configuramos este elemento. Para ello damos clic en icono “Properties”. Se nos abre una ventana en la cual nos dirigimos a la opción “Basic” en el apartado “Definition”.

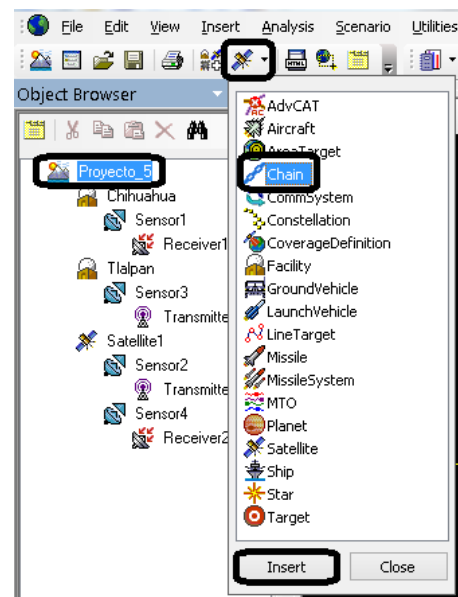


Fig. 7.11 Insertando el objeto “Chain”

Nos ubicamos en la sección “Available Objects” y definimos el orden de los objetos del escenario como sigue:

- Colocamos primero el transmisor de la estación en Tlalpan y lo pasamos al apartado “Assigned Objects”.
- Después seleccionamos el receptor del satélite.
- Continuamos con el retransmisor del mismo elemento.
- Y por último al equipo ubicado en Chihuahua.

Solo falta dar clic en “Apply” y “Ok” para guardar la configuración anterior.

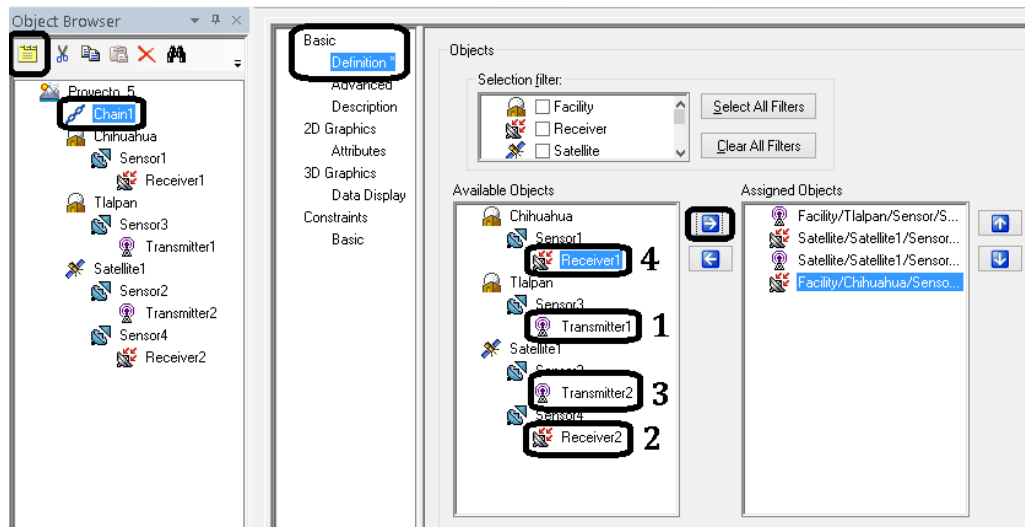


Fig. 7.12 Configuración del objeto "Chain"

Lo siguiente es obtener el reporte de algunos parámetros del escenario.

Para ello seleccionamos el objeto "Chain1" y damos clic en el botón "Report & Graph Manager..." ubicado en la barra de herramientas.

En nuestro caso definiremos el informe para un cierto intervalo de tiempo menor al configurado al inicio del proyecto. Esto lo configuramos en la sección "Time Properties".

En el apartado "Styles" dejamos marcada solo la opción "Show Reports". Después seleccionamos el reporte "Bent Pipe Comm Link" dentro de la carpeta "Installed Styles" y damos clic "Generate".

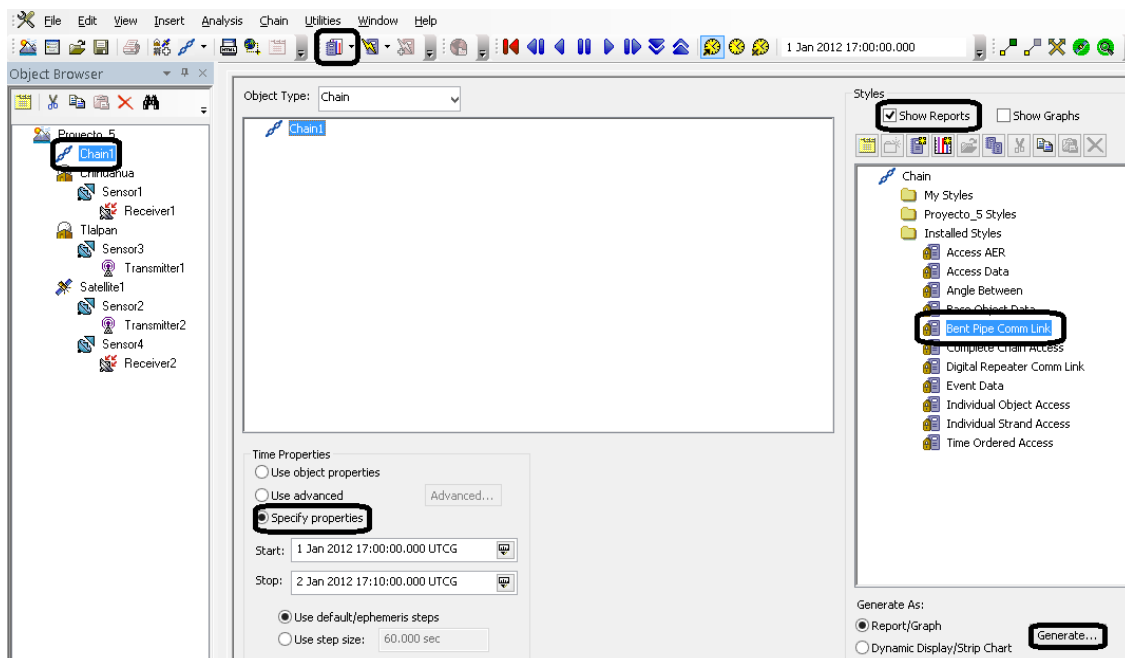


Fig. 7.13 Creando un reporte sobre nuestro escenario

Los datos generados corresponden al enlace ascendente, descendente y el rendimiento total del sistema.

For Unfunded Educational Use Only
Chain-Chain1

Strand 1

Time (UTCG)	Xntr Power1 (dBW) Xntr Power2 (dBW) IB02 (dB)	Xntr Gain1 (dB) Xntr Gain2 (dB) OB02 (dB)	EIRP1 (dBW) EIRP2 (dBW) C/No Tot. 2 (dB*Hz)	Prop Loss1 (dB) Prop Loss2 (dB) C/N Tot. 2 (dB)	Rcvd. Frequency1 (GHz) Rcvd. Frequency2 (GHz) Eb/No Tot. 2 (dB)	Rcvd. Iso. Power1 (dBW) Rcvd. Iso. Power2 (dBW) BER Tot. 2
1 Jan 2012 17:00:00.000	20.000 10.000 0.0000	59.9959 44.0000 0.0000	79.996 54.000 92.602204	-212.6147 -209.0932 20.5610	28.000000 18.500000 20.5610	-132.619 -155.093 1.000000e-030

Fig. 7.14 Reporte generado por STK de nuestro escenario

A continuación se presentan una serie de tablas que resumen la información obtenida.

Tabla 7.2 Parámetros del enlace ascendente y descendente en banda Ka

Enlace	P _{Tx} [dBW]	G _{Tx} [dB]	PIRE [dBW]	Pérdidas de propagación [dB]	Frecuencia [GHz]	RIP [dBW]
Ascendente	20	59.9959	79.996	-212.6147	28	-132.619
Descendente	10	50.0000	60.000	-209.0932	18.5	-149.093

Tabla 7.3 Parámetros del enlace ascendente y descendente en banda Ka (continuación)

Enlace	Densidad de flujo [dBW/m ²]	g/T [dB/K]	C/No [dB*Hz]	Ancho de banda [kHz]	C/N [dB]	Eb/No [dB]
Ascendente	-82.219957	13.871812	109.852149	16000.000	37.8109	37.8109
Descendente	-102.294104	24.110232	103.616148	16000.000	31.5749	31.5749

Dentro de la sección “*Styles*” en la pestaña “*Report & Graph Manager*” buscamos reporte titulado “*Access AER*” para obtener datos sobre las características de azimut, elevación y rango para cada uno de los enlaces.

13 Jun 2013 16:04:11

For Unfunded Educational Use Only
Chain-Chain1: Chain Access AER Data

Sensor3/Transmitter1 to Sensor4/Receiver2

Time (UTCG)	Azimuth (deg)	Elevation (deg)	Range (km)
1 Jan 2012 17:00:00.000	216.736	62.421	36407.166529
1 Jan 2012 17:00:40.000	216.736	62.421	36407.166529
1 Jan 2012 17:01:00.000	216.736	62.421	36407.166529

Sensor2/Transmitter2 to Sensor1/Receiver1

Time (UTCG)	Azimuth (deg)	Elevation (deg)	Range (km)
1 Jan 2012 17:00:00.000	282.524	-85.140	36736.708700
1 Jan 2012 17:00:40.000	282.521	-85.140	36736.684986
1 Jan 2012 17:01:00.000	282.521	-85.140	36736.684986

Fig. 7.15 Reporte AER del escenario

Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 7.4 Características de azimut, elevación y rango para los enlaces ascendente y descendente

Enlace	Azimut [°]	Elevación [°]	Rango [km]
De la estación terrena transmisora al satélite	216.736	62.4214	36407.2
Del satélite a la estación terrena receptora	282.521	-85.1401	36736.7

A partir de los datos de las tablas 7.2 y 7.3 establecemos los siguientes comentarios:

- Primero tenemos que el nivel de 20 [dBW] es el establecido a la estación de Tlalpan y los 10 [dBW] al retransmisor en el satélite.
- En cuanto a los valores de ganancia estos corresponde a los presentes en el lóbulo principal del patrón de radiación en los equipos transmisores para cada uno de los enlaces.
- El PIRE es la suma de los anteriores parámetros.

$$[\text{PIRE}]_{\text{dBW}} = [P_{\text{Tx}}]_{\text{dBW}} + [G_{\text{Tx}}]_{\text{dB}}$$

- Las pérdidas de propagación para el escenario configurado vienen dadas solamente por propagación de espacio libre.

$$[\text{Pérdidas de propagación}]_{\text{dB}} = [L_{\text{FSL}}]_{\text{dB}}$$

- La siguiente columna representa la frecuencia de operación de cada trayectoria (subida y bajada). La forma en que se establece la traslación de este factor sigue la expresión.

$$f_{\text{descendente}} = c_{[0]} + c_{[1]} \cdot (f_{\text{descendente}}) + c_{[2]} \cdot (f_{\text{descendente}})^2 + \dots + c_{[n]} \cdot (f_{\text{descendente}})^n$$

En donde los valores de los coeficiente $\{c_{[0]}, c_{[1]}, c_{[2]}, \dots, c_{[n]}\}$ son definidos y añadidos en la parte de las funciones de transferencia para el retransmisor.

- La RIP se calcula como:

$$[\text{RIP}]_{\text{dBW}} = [\text{PIRE}]_{\text{dBW}} + [\text{Pérdidas de propagación}]_{\text{dB}}$$

- El nivel de densidad de flujo de potencia se determina por el valor del PIRE menos de un factor logarítmico que depende del cuadrado de la distancia de separación entre la estación y el satélite.

$$\text{Densidad de flujo} = [\text{PIRE}]_{\text{dBW}} - 10 \log_{10} (4\pi R^2) \rightarrow \begin{cases} \text{Enlace ascendente : } R = 36\,407.2 [\text{km}] \\ \text{Enlace descendente : } R = 36\,736.7 [\text{km}] \end{cases}$$

- Enseguida tenemos la figura de mérito (G/T) que depende de la temperatura de ruido del sistema y el nivel de ganancia en recepción ya sea en el satélite o en la estación.

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{\text{dB/K}} = [G_{\text{Rx}}]_{\text{dB}} - 10\log_{10}([T_{\text{sistema}}]_{\text{K}}) \rightarrow \begin{cases} [T_{\text{sistema}}]_{\text{Satélite}} = 410.033[\text{K}] & [G_{\text{Rx}}]_{\text{Satélite}} = 40 [\text{dB}] \\ [T_{\text{sistema}}]_{\text{Estación Terrena Rx}} = 122.733[\text{K}] & [G_{\text{Rx}}]_{\text{Estación Terrena Rx}} = 45 [\text{dB}] \end{cases}$$

- Para el caso de la relación (C/N₀) su valor viene dado por la expresión.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{dB-Hz}} = [\text{PIRE}]_{\text{dBW}} + [\text{Pérdidas de propagación}]_{\text{dB}} + \left[\frac{G}{T}\right]_{\text{dB/K}} - 10\log_{10}(k)$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{dB-Hz}} = [\text{RIP}]_{\text{dBW}} + \left[\frac{G}{T}\right]_{\text{dB/K}} - 10\log_{10}(k) \rightarrow k = 1.3806 \times 10^{-23} \left[\frac{\text{J}}{\text{K}}\right]$$

- Y por último la (C/N) y (E_b/N₀) están ligadas al valor de (C/N₀) a través del ancho de banda y la tasa de transmisión.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{dB}} = \left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{dB-Hz}} - 10\log_{10}(\text{BW}) \quad \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{dB}} = \left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{dB-Hz}} - 10\log_{10}(R_{\text{bps}})$$

- En este caso recordemos que estamos analizando un sistema conformado por dos enlaces a partir de los cuales se define el rendimiento global y que se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 7.5 Parámetros globales del escenario

Enlace	C/No Total [dB*Hz]	C/N Total [dB]	Eb/No Total [dB]
Total	102.689282	30.6481	30.6481

Los valores anteriores se evalúan a través de las ecuaciones:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{Total}} [\text{dBHz}] = -10\log_{10} \left(10^{\frac{-(\frac{C}{N_0})_{\text{Ascendente}}}{10}} + 10^{\frac{-(\frac{C}{N_0})_{\text{Descendente}}}{10}} \right) \quad \left(\frac{C}{N}\right)_{\text{Total}} [\text{dB}] = -10\log_{10} \left(10^{\frac{-(\frac{C}{N})_{\text{Ascendente}}}{10}} + 10^{\frac{-(\frac{C}{N})_{\text{Descendente}}}{10}} \right)$$

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{Total}} [\text{dB}] = -10\log_{10} \left(10^{\frac{-(\frac{E_b}{N_0})_{\text{Ascendente}}}{10}} + 10^{\frac{-(\frac{E_b}{N_0})_{\text{Descendente}}}{10}} \right)$$

Empleando el escenario ya configurado, ahora analizaremos el comportamiento de este sistema para frecuencias de la banda C y Ku. Con la finalidad de comparar los cambios generados en algunos parámetros característicos previamente analizados.

Para ello mantendremos algunas de las configuraciones establecidas en los distintos elementos salvo por los niveles de ganancia de transmisión y recepción de algunas antenas serán modificadas.

El resultado de los reportes se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 7.6 Comparativa de parámetros del sistema en las bandas C, Ku y Ka

Banda	Enlace	P _{Tx} [dBW]	G _{Tx} [dB]	PIRE [dBW]	Pérdidas de propagación [dB]	Frecuencia [GHz]	RIP [dBW]	Densidad de flujo [dBW/m ²]
C	Ascendente	20	59.9959	79.996	-199.2345	6	-119.239	-82.219957
	Descendente	10	35.0000	45.000	-196.2148	4.2	-151.215	-117.294104
Ku	Ascendente	20	59.9959	79.996	-206.6559	14.1	-126.660	-82.219957
	Descendente	10	45.0000	55.000	-205.4055	12.1	-150.405	-107.294104
Ka	Ascendente	20	59.9959	79.996	-212.6147	28	-132.619	-82.219957
	Descendente	10	50.0000	60.000	-209.0932	18.5	-149.093	-102.294104

Tabla 7.7 Comparativa de parámetros del sistema en las bandas C, Ku y Ka (continuación)

Banda	Enlace	T _{equivalente de ruido} [K]	g/T [dB/K]	C/No [dB*Hz]	Ancho de banda [kHz]	C/N [dB]	Eb/No [dB]
C	Ascendente	410.033	3.871811	113.232284	16000	41.1911	41.1911
	Descendente	122.733	9.110344	86.494709	16000	14.4535	14.4535
Ku	Ascendente	410.033	8.871812	110.810928	16000	38.7697	38.7697
	Descendente	122.733	19.110328	97.303971	16000	25.2628	25.2628
Ka	Ascendente	410.033	13.871812	109.852149	16000	37.8109	37.8109
	Descendente	122.733	24.110232	103.616148	16000	31.5749	31.5749

A partir de los datos anteriores observamos lo siguiente:

- En principio tenemos que la potencia de transmisión es diferente para los dos enlaces. Esto con la finalidad de ejemplificar las limitaciones de energía que tenemos en el caso del satélite a comparación de la estación terrena.
- En el caso de la ganancia sus niveles corresponden al máximo presente en el lóbulo principal del patrón de radiación generado dado que las antenas están alineadas correctamente. Además esta propiedad es dependiente de la frecuencia de diseño, la eficiencia ($\eta=55\%$) y del diámetro de la antena (ϕ).

Tabla 7.8 Niveles de ganancia de las antenas

Banda de frecuencias	Enlace ascendente		Enlace descendente	
	Ganancia de Tx [dB]	Ganancia de Rx [dB]	Ganancia de Tx [dB]	Ganancia de Rx [dB]
C (6 [GHz]/4.2 [GHz])	60 ($\phi=21.4$ [m])	30 ($\phi=0.67$ [m])	35 ($\phi=1.7$ [m])	30($\phi=0.96$ [m])
Ku (14.1 [GHz]/12.1 [GHz])	60 ($\phi=9.1$ [m])	35($\phi=0.51$ [m])	45($\phi=1.9$ [m])	40($\phi=1.06$ [m])
Ka (28 [GHz]/18.5 [GHz])	60 ($\phi=4.5$ [m])	40($\phi=0.45$ [m])	50($\phi=2.2$ [m])	45($\phi=1.23$ [m])

- Las pérdidas de propagación corresponde con las de propagación de espacio libre para este caso de estudio. Este aumenta con la frecuencia de operación en donde vemos una variación máxima de 12 y 13 [dB] de la banda C a la banda Ka para el enlace ascendente y descendente respectivamente.

- El parámetro (RIP) cambia en función del diámetro de las antenas de Tx. La razón de este comportamiento se puede verificar si analizamos la expresión:

$$[RIP]_{dBW} = [P_{Tx}]_{dBW} + [G_{Tx}]_{dB} + [L_{FSL}]_{dB} = [P_{Tx}]_{dBW} + 10\log_{10} \left[\eta \left(\frac{\pi D f}{c} \right)^2 \right] + 10\log_{10} \left(\frac{c}{4\pi R f} \right)^2$$

$$[RIP]_{dBW} = [P_{Tx}]_{dBW} + 10\log_{10} \left[\eta \left(\frac{D}{4R} \right)^2 \right]$$

- En el caso de la densidad de flujo de potencia no existe variación el lado ascendente. Esto como consecuencia de que el PIRE y la distancia de separación entre los equipos es “fija”.

Por parte del enlace descendente hay un incremento y además siempre es mayor su nivel en comparación a la otra trayectoria.

- La figura de mérito (G/T) es creciente con la frecuencia de operación dada relación con el valor de ganancia de la antena y la temperatura de ruido del sistema (constante).
- Por último los parámetros (C/N₀), (C/N) y (E_b/N₀) presentan un comportamiento similar dada la dependencia a través de la tasa de transmisión y el ancho de banda empleado por la señal.

Tabla 7.9 Rendimiento total del sistema para las distintas bandas

Banda	Enlace	C/No Total [dB*Hz]	C/N Total [dB]	Eb/No Total [dB]
C	Total	86.485514	14.4443	14.4443
Ku	Total	97.114484	25.0733	25.0733
Ka	Total	102.689282	30.6481	30.6481

Ahora analizaremos el comportamiento del escenario tras añadir los efectos atenuantes por la presencia de lluvia y gases atmosféricos.

Para ello primero configuraremos lo que en STK se denomina como ambiente RF.

Para establecer estos modelos elegimos al objeto escenario y configuramos las propiedades de este objeto.

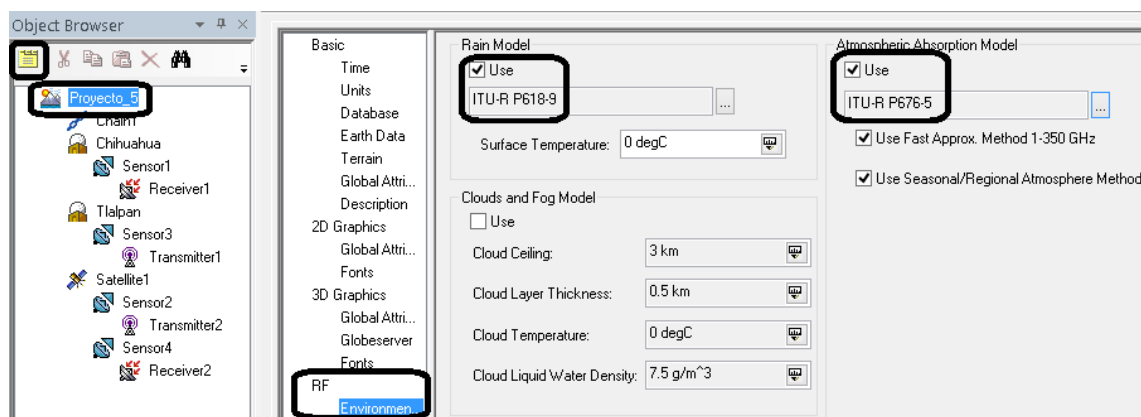


Fig. 7.16 Estableciendo un modelo de lluvia y de absorción atmosférica

Debido a la configuración anterior es necesario modificar algunas propiedades en los equipos receptores (en el satélite y estación terrena).

El primero es en “Model Specs” referente al “Outage Percent” y el segundo es en “System Noise Temperature” donde debemos marcar las opciones de “Atmosphere” y “Rain” en los cálculos de la temperatura de ruido de la antena.

El “Outage Percent” está relacionado con la disponibilidad del enlace de manera complementaria:

$$[\text{Outage Percent}]_{\%} + [\text{Disponibilidad}]_{\%} = 100 \%$$

Es un parámetro que adquiere relevancia a medida que aumentamos la frecuencia de operación del sistema como veremos más adelante. En este caso estableceremos un valor de disponibilidad del 99.99 %, 99.9 % y 99.5 % para las bandas C, Ku y Ka respectivamente.

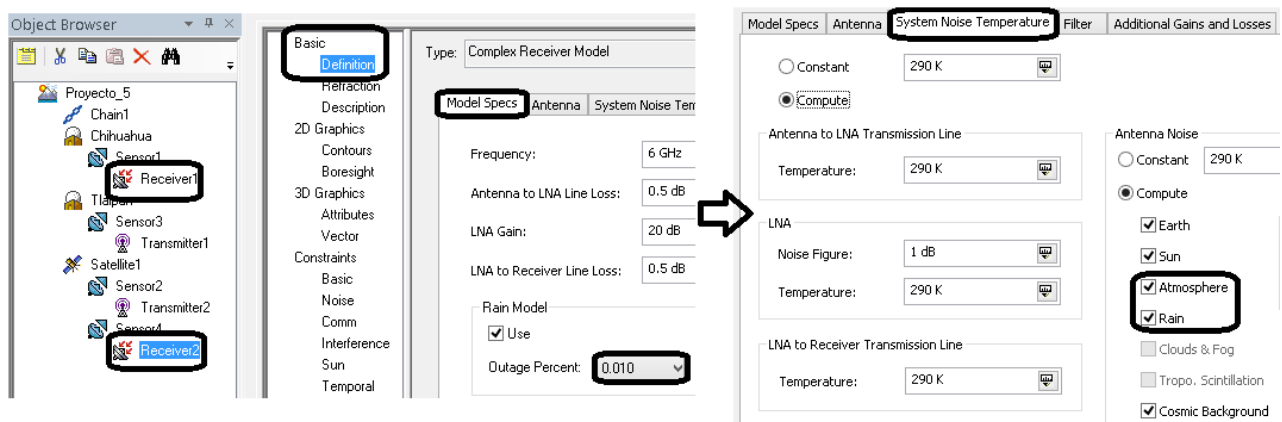


Fig. 7.17 Estableciendo la disponibilidad y contribuciones de ruido por lluvia y absorción atmosférica

Lo siguiente es obtener el reporte para la nueva situación en la que se encuentra nuestro sistema de comunicaciones.

Seguimos el proceso similar al llevado a cabo anteriormente.

Seleccionamos al objeto “Chain1” y damos clic secundario seleccionando la opción “Report & Graph Manager...”. En la ventana que se nos abre vamos a la sección “Styles” y generamos el reporte “Bent Pipen Comm Link”.

Strand 1						
Time (UTC)	Xmtr Power1 (dBW)	Xmtr Gain1 (dB)	EIRP1 (dBW)	Prop Loss1 (dB)	Rcvd. Frequency1 (GHz)	
	Xmtr Power2 (dBW)	Xmtr Gain2 (dB)	EIRP2 (dBW)	Prop Loss2 (dB)	Rcvd. Frequency2 (GHz)	
	IB02 (dB)	OB02 (dB)	C/No Tot.2 (dB*Hz)	C/N Tot.2 (dB)	Eb/No Tot.2 (dB)	
1 Jan 2012 17:00:00.000	20.000	59.9959	79.996	-199.8898	6.000000	
	10.000	35.0000	45.000	-196.5269	4.200000	
	0.0000	0.0000	85.557983	13.5168	13.5168	

Fig. 7.18 Reporte generado para el sistema bajo efectos de lluvia y absorción atmosférica

Dentro de la misma pestaña de “Report & Graph Manager...”, en la sección “Styles” seleccionamos la carpeta creada para el escenario particular y damos clic en el icono “Create New Report Style”.

Renombramos el archivo que se genera y en este caso lo llamaremos “Atenuación atmosférica, lluvia” y después de dar enter se nos abre otra ventana en donde nos dirigimos a la cadena “Link Information”.

Damos clic sobre ella y se nos despliega una gran cantidad de parámetros de los cuales es posible generar un reporte, en este caso buscamos la atenuación debido a lluvia y absorción atmosférica tanto para el enlace ascendente y descendente.

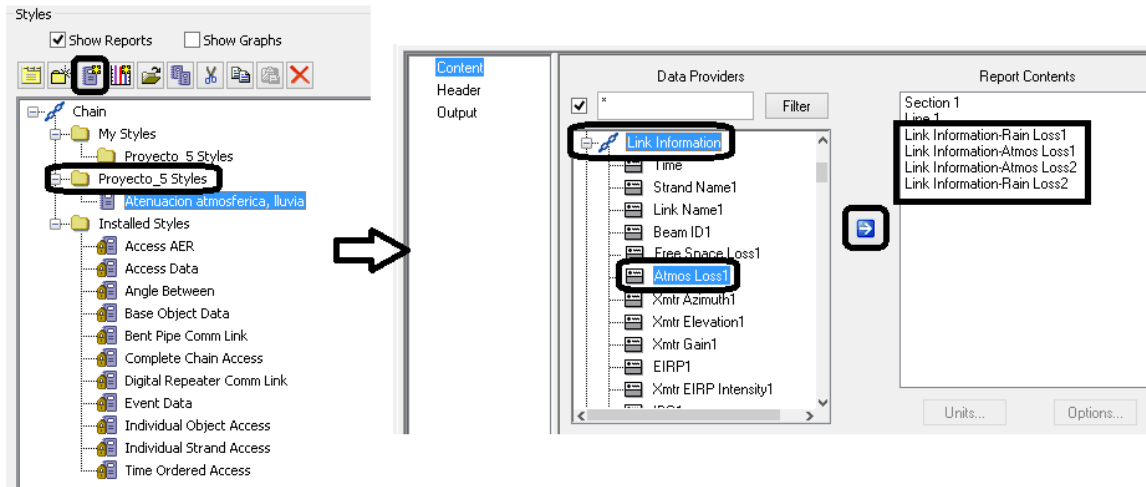


Fig. 7.19 Creando un reporte sobre las pérdidas debido a efectos atmosféricos y lluvia

Las siguientes tablas resumen los valores de los informes obtenidos en los pasos anteriores.

Tabla 7.10 Comparativa de parámetros del sistema en las bandas C, Ku y Ka bajo efectos de absorción atmosférica y lluvia

Banda	Enlace	Frecuencia [GHz]	PTx [dBW]	GTx [dB]	PIRE [dBW]	Pérdidas de espacio libre [dB]	Pérdidas atmosféricas [dB]
C	Ascendente	6	20	59.99	79.99	-199.2345	-0.0431
	Descendente	4.2	10	35.00	45.00	-196.2148	-0.0459
Ku	Ascendente	14.1	20	59.99	79.99	-206.6559	-0.0686
	Descendente	12.1	10	45.00	55.0	-205.4055	-0.0634
Ka	Ascendente	28	20	59.99	79.99	-212.6147	-0.2105
	Descendente	18.5	10	50.00	60.0	-209.0932	-0.1520

Tabla 7.11 Comparativa de parámetros del sistema en las bandas C, Ku y Ka bajo efectos de absorción atmosférica y lluvia (continuación)

Banda	Enlace	Pérdidas por lluvia [dB]	Pérdidas de propagación [dB]	g/T [dB/K]	C/No [dB*Hz]	C/N [dB]	Eb/No [dB]
C	Ascendente	-0.0431	-199.8898	3.485589	112.190785	40.1496	40.1496
	Descendente	-0.2662	-196.5269	8.495155	85.567423	13.5262	13.5262
Ku	Ascendente	-2.8369	-209.5614	7.639432	106.673014	34.6318	34.6318
	Descendente	-3.0367	-208.5055	15.792274	90.885901	18.8447	18.8447
Ka	Ascendente	-5.1092	-217.9343	12.149565	102.810244	30.7690	30.7690
	Descendente	-3.2746	-212.5198	20.601094	96.680429	24.6392	24.6392

Con la intención de visualizar claramente cuales son los cambios del sistema en las distintas bandas de frecuencias y en condiciones de cielo despejado y con fenómenos atmosféricos se presentan a continuación una serie de gráficas correspondientes a diferentes variables.

La primera gráfica corresponde con el comportamiento de las pérdidas de propagación. Observamos que conforme aumentamos la frecuencia de operación los efectos de absorción atmosférica y lluvia contribuyen a un incremento en el valor de este parámetro. Sin embargo, su nivel de importancia es mínimo en la banda C y adquiere relevancia en las bandas Ku y Ka.

$$[\text{Pérdidas de propagación}]_{\text{dB}} = [L_{\text{FSL}}]_{\text{dB}} + [L_{\text{Gases atmosféricos}}]_{\text{dB}} + [L_{\text{Lluvia}}]_{\text{dB}}$$

Si bien la tendencia será emplear bandas cada vez más altas debido a sus ventajas en cuanto a anchos de banda y tasas de transmisión, es claro que la presencia de gases y precipitación en la trayectoria son de considerar en caso de presentarse.

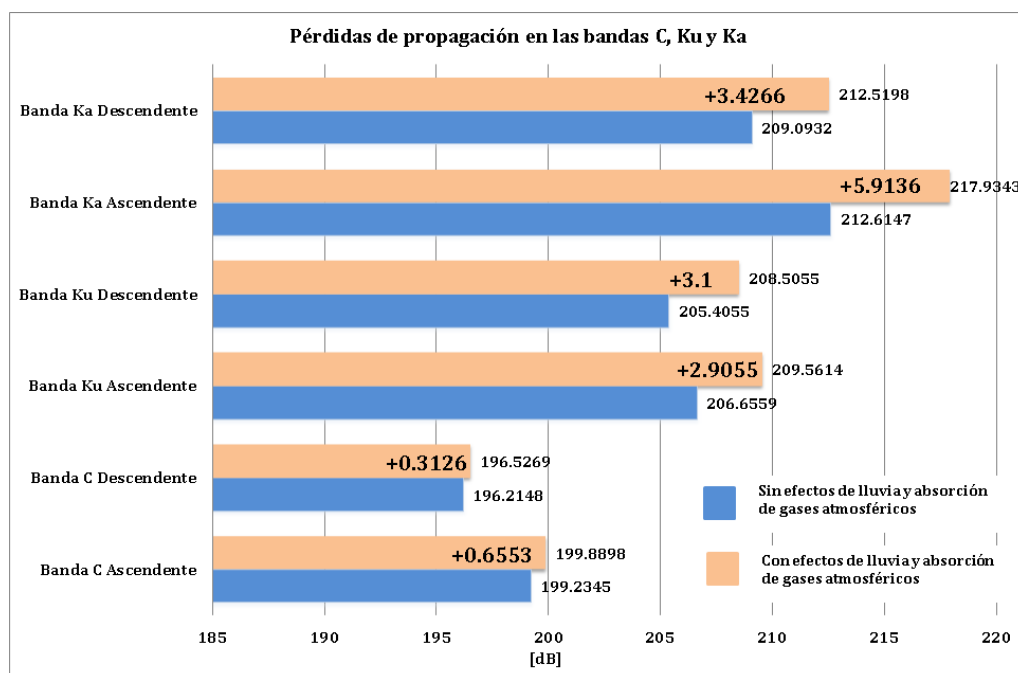


Fig. 7.20 Comparativa de las pérdidas de propagación

Por otra parte, para entender cual es el comportamiento de los dos atenuantes anteriores se muestra la siguiente gráfica. Hablando de las pérdidas generadas por gases atmosféricos, notamos que no llegan siquiera a los 0.5 [dB] en todas las bandas.

Estos efectos son más severos en ángulos de elevación menores a 10 [°]. En nuestro caso particular (62.4214 [°] y 85.1401 [°] para el enlace ascendente y descendente respectivamente) no es de preocupación en una órbita geoestacionaria. Sin embargo, se sabe de la existencia de un pico de atenuación de 20 [dB] aproximadamente en los 22.2 [GHz] y los niveles se disparan a más de 200 [dB] a medida que la frecuencia de operación se aproxima a los 60 [GHz].

Por último si analizamos el comportamiento de la atenuación por lluvia, notamos que sus efectos son más negativos a partir de la banda Ku en adelante. Y en general, el lado ascendente tiene niveles mayores para estos fenómenos limitantes que del lado descendente.

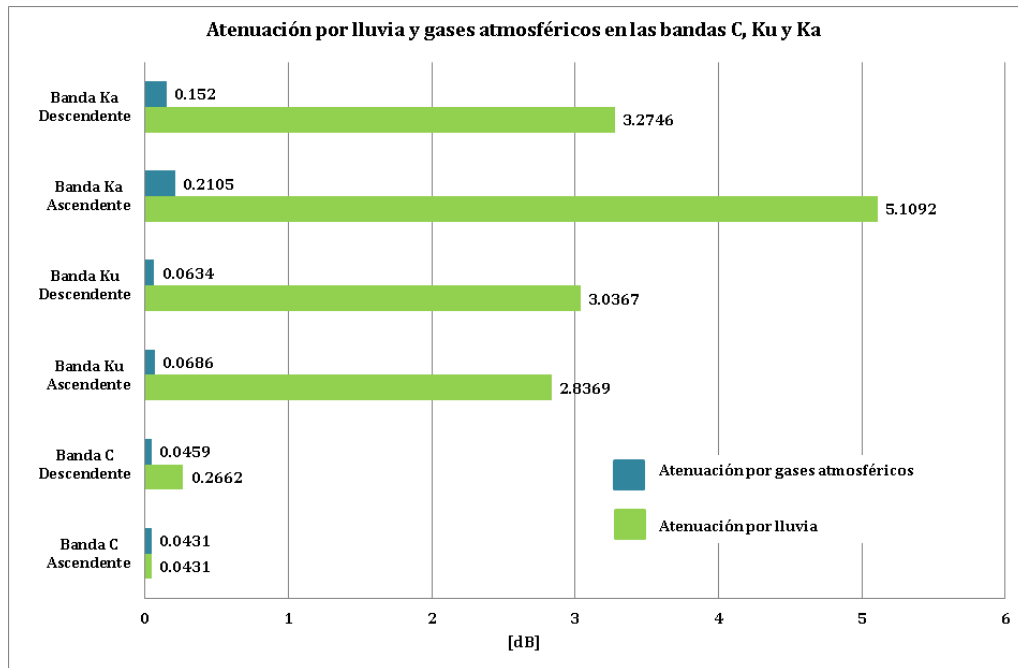


Fig. 7.21 Atenuación por lluvia y gases atmosféricos en las bandas C, Ku y Ka

La siguiente gráfica muestra el comportamiento de la potencia isotrópica recibida (RIP).

Mientras que en la banda C presenta reducciones menores a 1 [dB] para las dos trayectorias, en las bandas Ku y Ka los niveles de degradación van desde los 3 [dB] hasta poco más de 5 [dB].

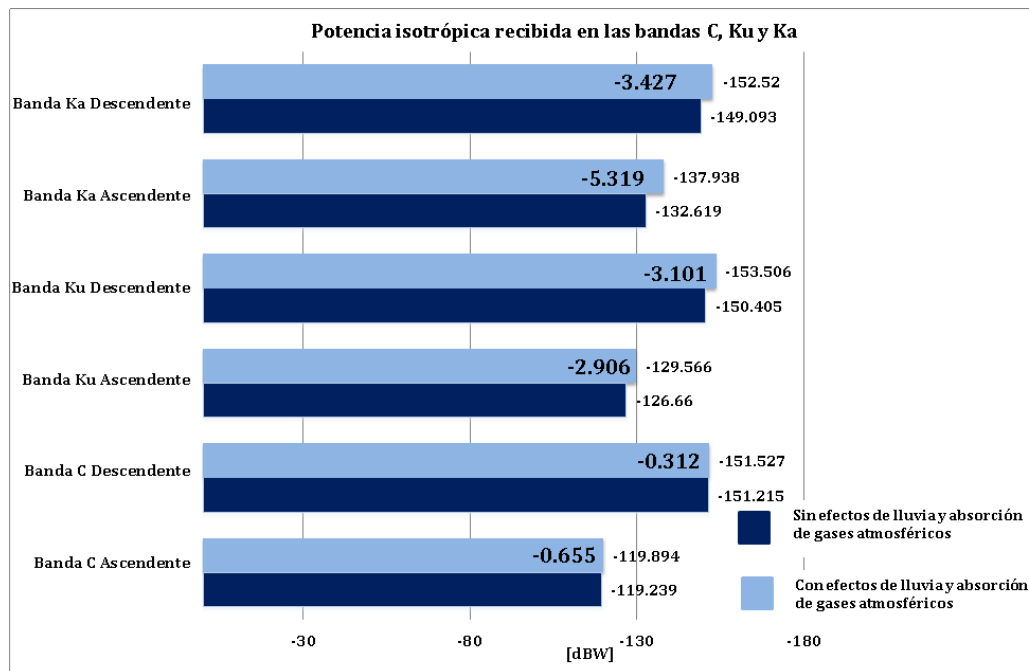


Fig. 7.22 Comparativa de la potencia isotrópica recibida (RIP)

Al analizar la expresión siguiente:

$$[RIP]_{dBW} = [PIRE]_{dBW} + [L_{FSL}]_{dB} + [L_{Lluvia}]_{dB} + [L_{Absorción\ gases\ atmosféricos}]_{dB}$$

$$[RIP]_{dBW} = [P_{Tx}]_{dBW} + 10\log_{10} \left[\eta \left(\frac{D}{4R} \right)^2 \right] + [L_{Lluvia}]_{dB} + [L_{Absorción\ gases\ atmosféricos}]_{dB}$$

Notamos que variables influyen en el valor del (RIP) y a partir de esto sabremos como controlar su valor.

En seguida tenemos la gráfica de la temperatura de ruido del sistema.

En general se puede decir que su valor se incrementa de manera directa con la frecuencia de operación.

Las diferencias que se presentan entre los valores que adquiere dicho parámetro bajo condiciones de cielo despejado y bajo efectos de gases atmosféricos y lluvia son más notorias en bandas superiores a la C.

El aumento en el nivel de esta propiedad es algo negativo para el rendimiento del equipo receptor tanto en el satélite como en la estación terrena, debido a que se encuentra ligado a la figura de mérito (G/T).

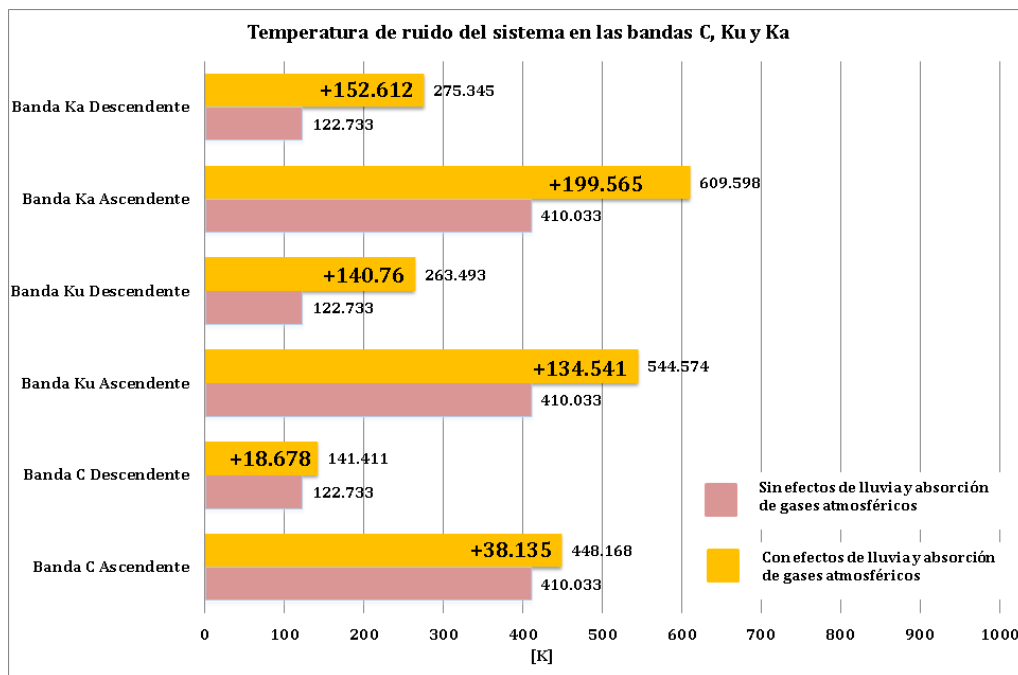


Fig. 7.23 Comparativa de la temperatura de ruido del sistema

Para un mejor entendimiento de esta propiedad en función de las características configuradas en el receptor del lado ascendente o descendente; se presenta la ecuación que define su valor.

$$T_s = T_{Antena} + T_{LTx1} \left[10^{\left(\frac{L_{LTx1}}{10} \right)} - 1 \right] + \frac{T_{LNA} \left[10^{\left(\frac{NF}{10} \right)} - 1 \right]}{10^{\left(\frac{L_{LTx1}}{10} \right)}} + \frac{T_{L_{LTx2}} \left[10^{\left(\frac{L_{LTx2}}{10} \right)} - 1 \right]}{10^{\left(\frac{L_{LTx1}}{10} \right)} \left(10^{\left(\frac{G_{LNA}}{10} \right)} \right)}$$

En donde la temperatura de ruido de la antena (T_{Antena}) es la suma de distintas contribuciones configuradas en el equipo (Tierra, Lluvia, Atmósfera, Nubes y niebla, Centelleo troposférico, Sol, fondo cósmico, otros).

Por otra parte los demás parámetros de la expresión anterior representan:

- La figura (NF) y ganancia del amplificador de bajo ruido (G_{LNA}).
- La temperatura de las dos líneas de transmisión (T_{LTx1}), (T_{LTx2}) y del LNA (T_{LNA}).
- Las pérdidas de transmisión de la antena al LNA (L_{LTx1}) y del amplificador de bajo ruido al receptor (L_{LTx2}).

Para el diseño de este tipo de sistemas se debe tener un control en la ganancia de la antena receptora que permita minimizar el efecto de la presencia de gases atmosféricos y lluvia sobre el valor final de la temperatura de ruido del sistema y por ende de la figura de mérito (G/T). O con una correcta configuración en los valores de los distintos elementos que conforman al equipo.

Por otra parte se nota en la gráfica siguiente, que los efectos negativos debido a la presencia de los fenómenos atmosféricos sobre el valor de la figura de mérito (G/T) son más visibles en la banda Ku y Ka.

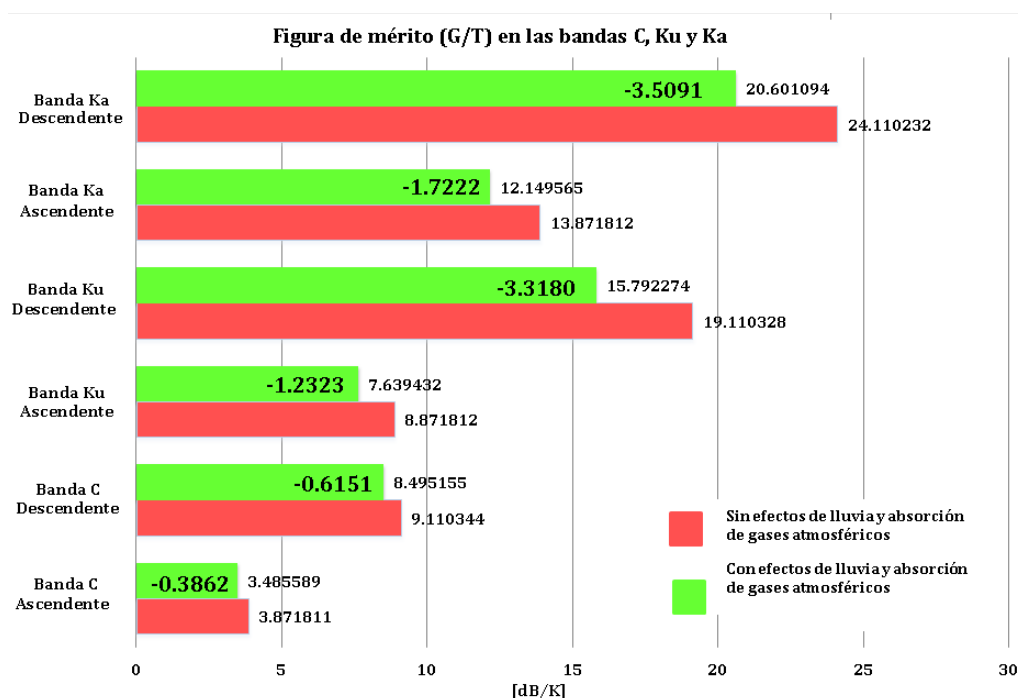


Fig. 7.24 Comparativa de la figura de mérito (G/T)

Enseguida tenemos la representación correspondiente a (C/N_0) .

Este nos ofrece una forma para medir la calidad del enlace a través de la relación entre la potencia de la señal de interés y los efectos del ruido presentes en el sistema de recepción dentro del ancho de banda empleado para la señal.

Para entender mejor el comportamiento que se presenta en la gráfica, analizaremos la expresión que define a (C/N_0) .

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{dBHz} = 10\log_{10}(C) - 10\log_{10}(N_0) = 10\log_{10}(C) - 10\log_{10}\left(\frac{N}{B} \right) = 10\log_{10}(C) - 10\log_{10}(kT)$$

Por tanto, conociendo que factores influyen directamente, se concluye que:

- La potencia de la portadora recibida (C) será menor en el escenario sometido a efectos de gases atmosféricos y precipitación que en el caso de cielo despejado.
- Por otra parte, la temperatura de ruido del sistema presenta un comportamiento opuesto, es decir, es mayor el nivel para la primera situación.

Por último, los efectos negativos configurados para el ambiente RF sobre (C/N_0) son menos despreciables en la banda Ku y Ka.

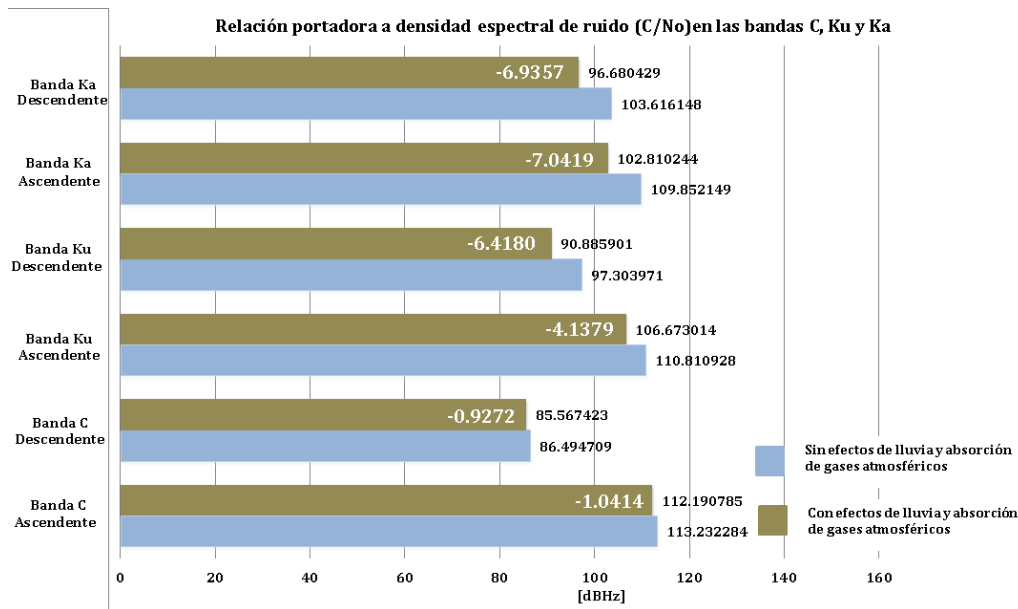


Fig. 7.25 Comparativa de la relación portadora a densidad espectral de potencia del ruido en el sistema

En el caso de (C/N) y (E_b/N_0) no es necesaria su representación dado que su comportamiento es similar a la curva anterior, salvo por una disminución en los valores que adquieren como consecuencia de la relación que existe a través de la tasa de transmisión y ancho de banda.

Por último presentamos la tabla correspondiente a (C/N_0) , (C/N) y (E_b/N_0) para las distintas bandas empleadas.

Tabla 7.12 Rendimiento total del sistema para las bandas C, Ku y Ka bajo efectos de absorción atmosférica y lluvia

Banda	Enlace	C/No Total [dB*Hz]	C/N Total [dB]	Eb/No Total [dB]
C	Total	85.557982	13.5167	13.5167
Ku	Total	90.772815	18.7316	18.7316
Ka	Total	95.732953	23.6918	23.6918

Además se muestra la gráfica comparativa de los niveles que adquiere $(C/N)_{total}$ para los dos escenarios simulados en este proyecto dentro de STK.

Es claro que los niveles de $(C/N)_{total}$ sufren una mayor reducción para las bandas de frecuencias superiores a la banda C.

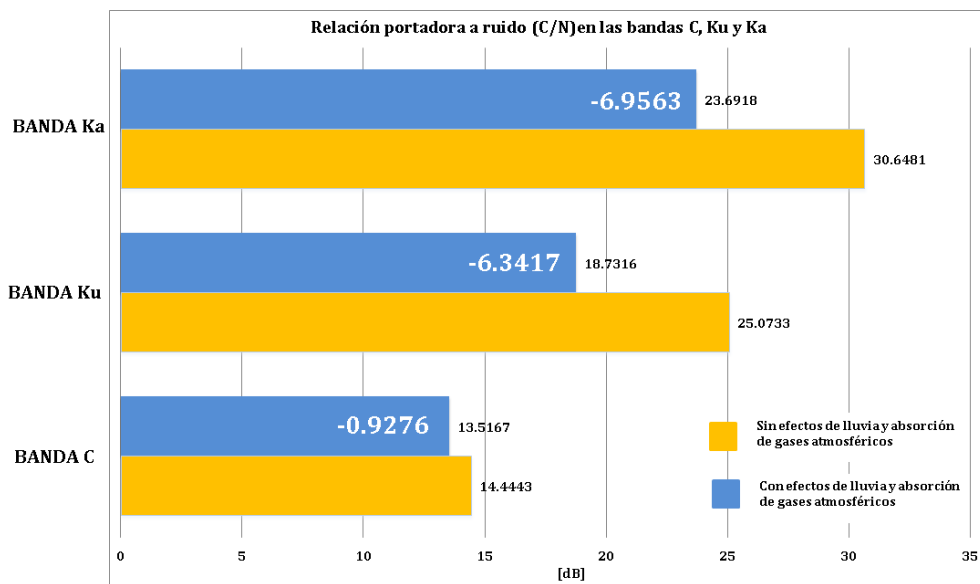


Fig. 7.26 Comparativa del rendimiento total del sistema

7.2. Análisis y diseño de un sistema de comunicaciones por satélite para TV Digital DVB-S2

En este proyecto se analizará el comportamiento de un escenario enfocado a la transmisión de señales de video para las bandas Ku y Ka.

Además se realiza una comparativa de los resultados obtenidos con STK y a través de cálculos programados en Matlab de una tesis enfocada a la transmisión de señales de video con el estándar DVB-S2.

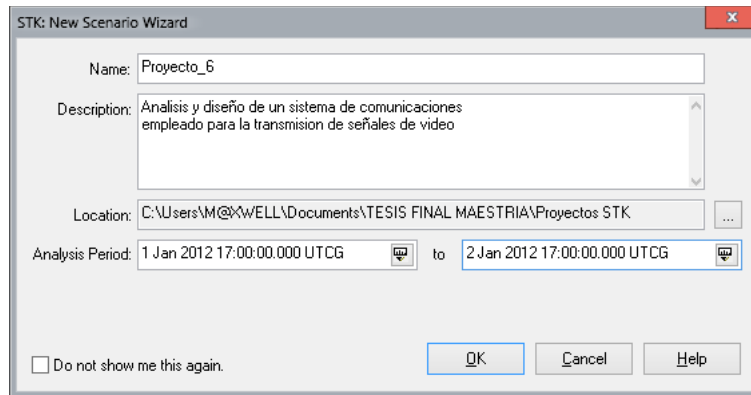


Fig. 7.27 Configurando el escenario para transmisión de video en STK

A continuación se presentan los datos proporcionados en la Tesis “**Perspectivas tecnológicas en sistemas de televisión digital por satélite**”, los cuales servirán como referencia para las configuraciones realizadas en STK.

Tabla 7.13 Datos del sistema de televisión digital por satélite en banda Ku

DATOS DE LA PORTADORA		
Estándar	DVB-S2	
Symbol Rate	30000 <i>KBaud</i>	
Modulación:	8PSK	
F.E.C.:	2/3	
Tasa De Datos	58071.0 <i>Kbps</i>	
Roll-off:	0.2	
Eb/No:	3.75 <i>dB</i>	
BER:	1E-7	
Ancho de Banda Requerido	36000.00 <i>kHz</i>	
Ancho de Banda Asignado:	36000.00 <i>kHz</i>	
DATOS DEL SATÉLITE		
Posición del satélite	116.80 °W	
Ancho de banda del Transpondedor:	36.00 <i>MHz</i>	
	<i>Enlace Ascendente</i>	<i>Enlace Descendente</i>
Banda de Operación:	17.8-18.3 <i>GHz</i>	12.2-12.7 <i>GHz</i>
Frecuencia Central del TP	17.84 <i>GHz</i>	12.24 <i>GHz</i>
Polaridad:	LHCP	RHCP

Tabla 7.14 Datos del sistema de televisión digital por satélite en banda Ku (continuación)

DATOS DE ESTACION TERRENA	Transmisor		Receptor	
Localidad	Atlanta, Georgia, E.U.		México D.F., México	
Latitud:	33.75	°N	19.40	°N
Longitud:	84.38	°W	99.15	°W
Disponibilidad Ascendente.:	99.70	%	99.70	%
Disponibilidad Descendente.:	99.70	%	99.70	%
Diámetro de Antena:	7.00	m	0.7	m
Ganancia de Antena Tx:	60.12	dBi	40.12	dBi
Ganancia de Antena Rx:	56.85	dBi	36.85	dBi
Temperatura Total del Sistema:	190	K	152	K
Figura de Merito Satélite (G/T):	3.36	dB/K	3.88	dB/K
PIRE en saturación del Transpondedor:	51.02	dBW	50.58	dBW

Comenzamos con insertar los distintos elementos necesarios para llevar a cabo la simulación, en este caso serán dos estaciones terrenas (Tx y Rx), un satélite geoestacionario, 4 sensores, 1 equipo transmisor y re-transmisor y 2 receptores.

Las características de posición de algunos objetos anteriores son.

Tabla 7.15 Características de latitud y longitud de los elementos del escenario

Elemento	Latitud [°]	Longitud [°]
Estación terrena transmisora (Atlanta, Georgia)	33.749	-84.388
Estación terrena transmisora (México, Distrito Federal)	19.4	-99.15
Satélite	-	-116.8

Para la primera parte de este proyecto vamos a operar en la banda Ku.

Primero configuraremos el transmisor de la estación Tx. Seleccionamos el tipo “Complex Transmitter Model”, establecemos una frecuencia de 17.84 [GHz]. La antena será parabólica de 7 [m] (ganancia de 59.7401 [dBi]) y una potencia de 20.2599 [dBW] con lo cual garantizamos un de PIRE de 80 [dBW].

$$[\text{PIRE}]_{\text{dBW}} = [P_{\text{Tx}}]_{\text{dBW}} + [G_{\text{Tx}}]_{\text{dBi}} \rightarrow [P_{\text{Tx}}]_{\text{dBW}} = [\text{PIRE}]_{\text{dBW}} - 10 \log_{10} \left[\eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right]$$

Por último en la parte del modulador establecemos una tasa de transmisión de 58 [Mbps], además de un ancho de banda de 36 [MHz] y una modulación 8PSK que son características del estándar de video DVB-S2.

Para el receptor del satélite elegimos el “Complex Receiver Model”, luego en la parte de la temperatura de ruido del sistema establecemos que sean calculados. Además añadimos pérdidas misceláneas de 1 [dB] en “Additional Gains and Losses”.

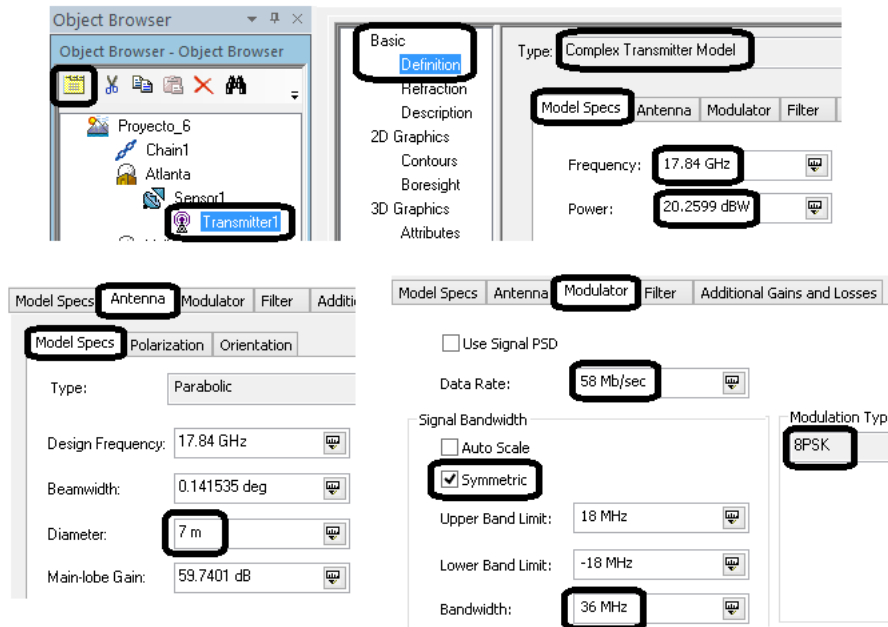


Fig. 7.28 Configuración del transmisor de la estación terrena

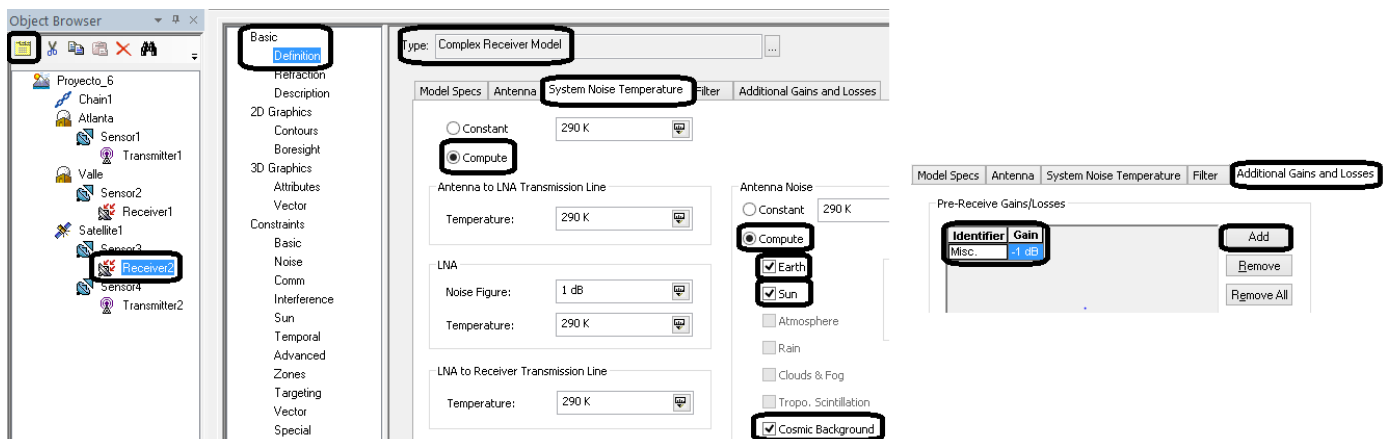


Fig. 7.29 Configuración del receptor en el satélite

Para el retransmisor del satélite elegimos el tipo “*Medium Re-transmitter Model*” (modelo que nos facilita la configuración del PIRE de saturación). Después establecemos un valor de potencia de transmisión de 20.58 [dBW] y una ganancia de 30 [dBi] (lo cual nos asegura un valor del PIRE del satélite de 50.58 [dBW]).

$$PIRE_{Sat} [dBW] = 50.58 [dBW] - (L_{lluvia})_{ascendente} [dB] \rightarrow (P_{Tx})_{Sat} = PIRE_{Sat} [dBW] - 30 [dBi]$$

Y en el apartado de las funciones de transferencia modificamos el valor de uno de los coeficientes referente a la frecuencia, con la finalidad de realizar la conversión de 17.84 [GHz] a 12.24 [GHz].

$$Coeficiente = f_{descendente} [Hz] - f_{ascendente} [Hz]$$

Y para el receptor seleccionamos “*Complex Receiver Model*” con una antena tipo parabólica de 0.7 [m]. En el apartado de la temperatura de ruido del sistema lo configuramos para que los valores sean calculados. Finalmente añadimos las pérdidas misceláneas de -1 [dB].

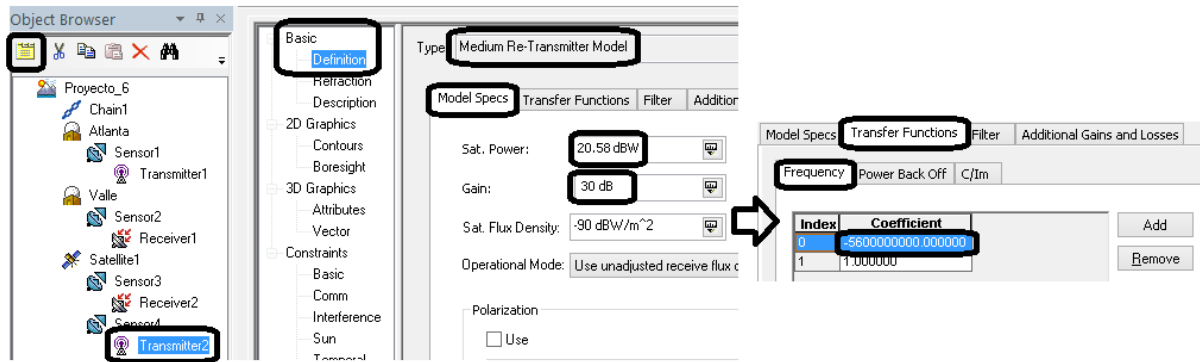


Fig. 7.30 Configuración del retransmisor en el satélite

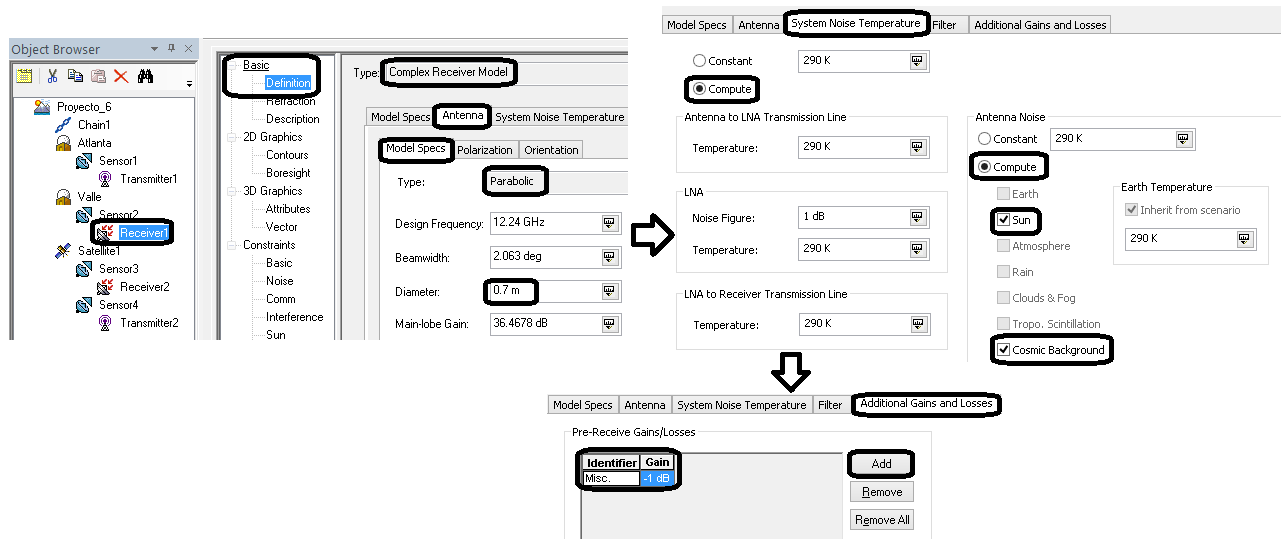


Fig. 7.31 Configuración de la estación terrena receptora

Ahora procedemos a generar los respectivos reportes. Para ello seleccionamos al escenario y luego damos clic en el botón “New Object” e insertamos el objeto “Chain”.

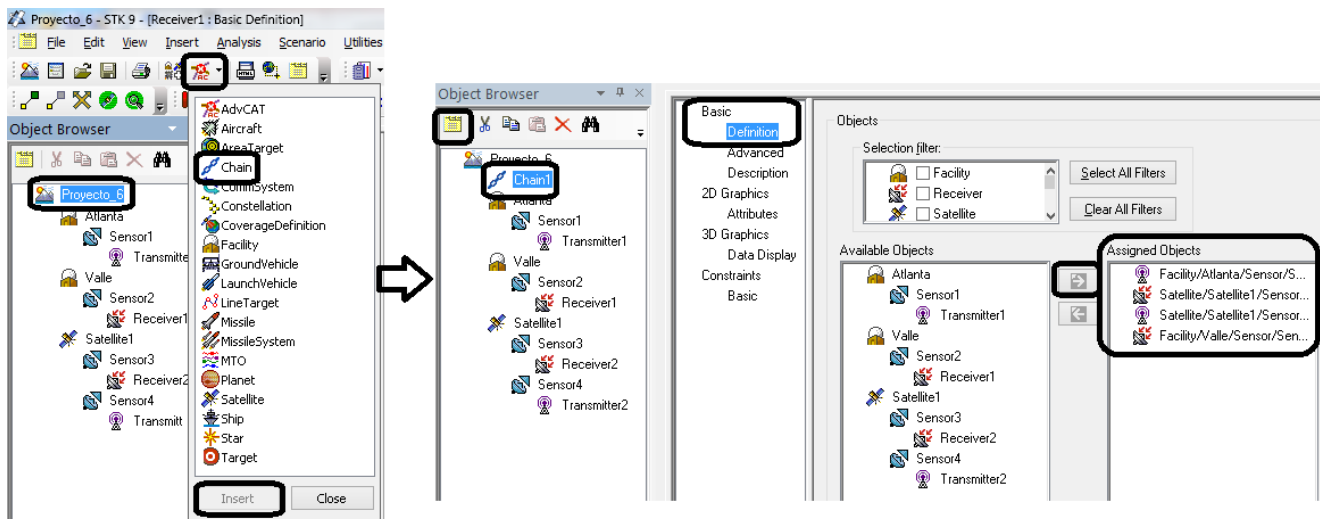


Fig. 7.32 Empleando la herramienta “Chain” para encadenar los elementos del escenario

Habiendo establecido el encadenamiento de los distintos elementos del escenario, notaremos los cambios en las representaciones 2D y 3D.

Por último para generar el reporte seleccionamos el objeto "Chain" y damos clic en el botón "Report & Graph Manager" lo cual nos abre una ventana.

Nos dirigimos a la sección "Styles" y dejamos marcada solamente la opción "Show Reports" y después abrimos la carpeta "Installed Styles".

Buscamos el informe "Bent Pipe Comm Link".

Se presenta a continuación los cuatro estados posibles que pudiésemos tener en nuestro sistema de comunicaciones.



Fig. 7.33 Representaciones 2D y 3D del escenario

- **Cielo despejado.** No existe presencia de precipitación en los dos enlaces.
- **Lluvia ascendente.** Se activa la opción "Rain" en el ruido de la antena del receptor en el satélite. Se modifica la potencia de saturación en función del nivel de atenuación por este fenómeno. Se establece el valor en "Outage Percent".
- **Lluvia descendente.** Se activa la opción "Rain" en la temperatura de ruido del sistema en receptor en la estación terrena. Se establece el valor en el parámetro "Outage Percent".
- **Lluvia ambos lados.** Se realiza la configuración de los dos puntos anteriores..

A continuación se presenta una tabla que resume los datos obtenidos tanto para el enlace ascendente, el enlace descendente y de manera global.

Tabla 7.16 Parámetros del escenario para transmisión de video en la banda Ku con STK

ENLACE ASCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	UNIDADES
Azimut E.T. Tx	228.841	228.841	228.841	228.841	[°]
Elevación E.T. Tx	37.731	37.731	37.731	37.731	[°]
Disponibilidad	99.7	99.7	99.7	99.7	[%]
PIRE E.T. Tx	80	80	80	80	[dBW]
Pérdidas por espacio libre	209.0612	209.0612	209.0612	209.0612	[dB]
Pérdidas misceláneas	1	1	1	1	[dB]
Margen de lluvia	0	4.8793	0	4.8793	[dB]
G/T del Rx en el satélite	17.214127	15.439011	17.214127	15.439011	[dB/K]
Relación (C/N ₀) ascendente	115.751331	109.097417	115.751831	109.097417	[dBHz]
Relación (C/N) ascendente	40.1888	33.5344	40.1888	33.5344	[dB]
ENLACE DESCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	UNIDADES
Azimut E.T. Tx	223.798	223.798	223.798	223.798	[°]
Elevación E.T. Tx	59.630	59.630	59.630	59.630	[°]
Disponibilidad	99.7	99.7	99.7	99.7	[%]
Pérdidas por espacio libre	205.4582	205.4582	205.4582	205.4582	[dB]
PIRE en saturación del transpondedor	50.58	45.701	50.58	45.701	[dBW]
Pérdidas misceláneas	1	1	1	1	[dB]
Margen de lluvia	0	0	1.0069	1.0069	[dB]
G/T de la E.T. Rx	17.558645	17.558645	15.186635	15.186635	[dB/K]
Relación (C/N ₀) descendente	90.279544	85.400244	86.900627	82.021327	[dBHz]
Relación (C/N) descendente	14.7165	9.8372	11.3376	6.4583	[dB]
Margen del enlace	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	UNIDADES
Relación (C/N) total del sistema	14.7042	9.8187	11.3319	6.4498	[dB]
Relación (C/N) requerida	5.83	5.83	5.83	5.83	[dB]
Margen del enlace	8.8742	3.9887	5.5019	0.6198	[dB]

Para comparar los resultados generados en la simulación en STK de la tabla anterior, se muestran los valores obtenidos por la Tesis consultada.

Tabla 7.17 Parámetros obtenidos con Matlab en la Tesis (Banda Ku)

ENLACE ASCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Transmisora	228.82	228.82	228.82	228.82	°
Elevación E/T Transmisora	37.7	37.7	37.7	37.7	°
Disponibilidad	99.7	99.7	99.7	99.7	%
PIRE estación transmisora	80	80	80	80	dBW
Perdidas por Espacio Libre	209.06	209.06	209.06	209.06	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	5.6	0	5.6	dB
Relación C/No Ascendente	101.9	96.3	101.9	96.3	dBHz
Relación C/N Ascendente	26.33	20.74	26.33	20.74	dB
ENLACE DESCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Receptora	223.77	223.77	223.77	223.77	°
Elevación E/T Receptora	59.62	59.62	59.62	59.62	°
Disponibilidad	99.7	99.7	99.7	99.7	%
Perdidas por Espacio Libre	205.46	205.46	205.46	205.46	dBW
P.I.R.E. en saturación Transpondedor	50.58	44.98	50.58	44.98	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	0	1.55	1.55	dB
G/T de la E/T Receptora	15.03	15.03	13.51	13.51	dB/K
Relación C/No Descendente	87.75	82.15	84.68	79.09	dBHz
Relación C/N Descendente	12.19	6.59	9.12	3.52	dB
MARGEN DE ENLACE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Relación C/N Total del Sistema	12.03	6.43	9.04	3.44	dB
Relación C/N Requerida	5.83	5.83	5.83	5.83	dB
MARGEN DEL ENLACE:	6.2	0.6	3.21	-2.39	dB

Ahora se analiza el sistema de transmisión de video pero en la banda Ka. Para ello se presentan los datos proporcionados en la tesis consultada. En donde notaremos cuales son los cambios que debemos de realizar al escenario conformado previamente.

Tabla 7.18 Datos del sistema de televisión digital por satélite en banda Ka

DATOS DE LA PORTADORA	
Estándar	DVB-S2
Symbol Rate	30000 Kbaud
Modulación:	8PSK
F.E.C.:	2/3
Tasa De Datos	58071.0 kbps
Roll-off:	0.2
Eb/No:	3.75 dB
BER:	1E-7
Ancho de Banda Requerido	36000.00 kHz
Ancho de Banda Asignado:	36000.00 kHz

Tabla 7.19 Datos del sistema de televisión digital por satélite en banda Ka (cont.)

DATOS DEL SATÉLITE			
Posición del satélite	116.80	°W	
	<i>Enlace Ascendente</i>	<i>Enlace Descendente</i>	
Banda de Operación:	29.5-30	GHz	19.7-20.2 GHz
Frecuencia Central del TP	29.7	GHz	19.9 GHz
Polaridad:	Horizontal		Vertical
DATOS DE ESTACION TERRENA		Receptor	
	Transmisor		
Localidad	Atlanta, Georgia, E.U.		México D.F., México
Latitud:	33.75	°N	19.40 °N
Longitud:	84.38	°W	99.15 °W
Disponibilidad Ascendente.:	99.00	%	99.00 %
Disponibilidad Descendente.:	99.00	%	99.00 %
Diámetro de Antena:	7.00	m	0.70 m
Ganancia de Antena Tx:	64.55	dBi	44.55 dBi
Ganancia de Antena Rx:	61.07	dBi	41.07 dBi
Temperatura Total del Sistema:	350	K	300 K
Figura de Merito Satélite (G/T):	16.0	dB/K	16.0 dB/K
PIRE en saturación del Transpondedor:	54	dBW	54 Dbw

En este caso la modificación que se realiza es al PIRE de saturación empleado en el satélite, su valor es de 54 [dBW]. Además debe ser modificado en función de los niveles de atenuación generados en la banda Ka.

$$\text{PIRE}_{\text{Sat}} [\text{dBW}] = 54 [\text{dBW}] - (L_{\text{lluvia}})_{\text{ascendente}} [\text{dB}]$$

$$(P_{\text{Tx}})_{\text{Sat}} = \text{PIRE}_{\text{Sat}} [\text{dBW}] - 30 [\text{dBi}]$$

Además la frecuencia del enlace ascendente es de 29.7 [GHz] y para el descendente es de 19.9 [GHz]. Por tanto, habrá que calcular el coeficiente para la traslación.

$$\text{Coeficiente} = f_{\text{descendente}} [\text{Hz}] - f_{\text{ascendente}} [\text{Hz}]$$

Y por último el valor de la disponibilidad del enlace es del 99 [%] en las dos trayectorias, es decir, en caso de que exista presencia de lluvia en un enlace se debe establecer un "Outage Percent" en las propiedades del equipo receptor que se vea afectado.

A continuación se presenta la tabla que resume los valores de simulación para el enlace ascendente, descendente y de manera global para escenario simulado en STK.

Tabla 7.20 Parámetros del sistema de comunicaciones por satélite para transmisión de video en la banda Ka con STK

ENLACE ASCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	UNIDADES
Azimut E.T. Tx	228.841	228.841	228.841	228.841	[°]
Elevación E.T. Tx	37.731	37.731	37.731	37.731	[°]
Disponibilidad	99	99	99	99	[%]
PIRE E.T. Tx	80	80	80	80	[dBW]
Pérdidas por espacio libre	213.4884	213.4884	213.4884	213.4884	[dB]
Pérdidas misceláneas	1	1	1	1	[dB]
Margen de lluvia	0	6.5551	0	6.5551	[dB]
G/T del Rx en el Satélite	21.641359	19.647119	21.641359	19.647119	[dB/K]
Relación (C/N ₀) ascendente	115.751519	107.202138	115.751519	107.202138	[dBHz]
Relación (C/N) ascendente	40.1885	31.6391	40.1885	31.6391	[dB]
ENLACE DESCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	UNIDADES
Azimut E.T. Tx	223.798	223.798	223.798	223.798	[°]
Elevación E.T. Tx	59.630	59.630	59.630	59.630	[°]
Disponibilidad	99	99	99	99	[%]
Pérdidas por espacio libre	209.6797	209.6797	209.6797	209.6797	[dB]
PIRE en saturación del transpondedor	54	47.4449	54	47.4449	[dBW]
Pérdidas misceláneas	1	1	1	1	[dB]
Margen de lluvia	0	0	1.3036	1.3036	[dB]
G/T de la E.T. Rx	21.780015	21.780015	18.968548	18.968548	[dB/K]
Relación (C/N ₀) descendente	93.699481	87.144381	89.584448	83.029348	[dBHz]
Relación (C/N) descendente	18.1365	11.5814	14.0214	7.4663	[dB]
Margen del enlace	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	UNIDADES
Relación (C/N) total del sistema	18.1095	11.5387	14.0109	7.4497	[dB]
Relación (C/N) requerida	5.83	5.83	5.83	5.83	[dB]
Margen del enlace	12.2795	5.7087	8.1809	1.6197	[dB]

A modo de comparar los resultados obtenidos en STK con los obtenidos en la tesis consultada, se presentan los valores obtenidos de la simulación en Matlab.

Tabla 7.21 Parámetros del sistema de comunicaciones por satélite para transmisión de video en la banda Ka con Matlab

ENLACE ASCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Transmisora	228.82	228.82	228.82	228.82	°
Elevación E/T Transmisora	37.7	37.7	37.7	37.7	°
Disponibilidad	99	99	99	99	%
PIRE estación transmisora	80	80	80	80	dBW
Perdidas por Espacio Libre	213.49	213.49	213.49	213.49	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	5.57	0	5.57	dB
Relación C/No Ascendente	110.11	104.53	110.11	104.53	dBHz
Relación C/N Ascendente	34.55	28.97	34.55	28.97	dB
ENLACE DESCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Receptora	223.77	223.77	223.77	223.77	°
Elevación E/T Receptora	59.62	59.62	59.62	59.62	°
Disponibilidad	99	99	99	99	%
Perdidas por Espacio Libre	209.68	209.68	209.68	209.68	dBW
P.I.R.E. en saturación Transponedor	54	48.43	54	48.43	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	0	1.6	1.6	dB
G/T de la E/T Receptora	16.6	16.6	17.44	17.44	dB/K
Relación C/No Descendente	88.52	82.94	87.76	82.18	dBHz
Relación C/N Descendente	12.95	7.38	12.2	6.62	dB
MARGEN DE ENLACE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Relación C/N Total del Sistema	12.92	7.35	12.17	6.6	dB
Relación C/N Requerida	5.83	5.83	5.83	5.83	dB
MARGEN DEL ENLACE:	7.1	1.52	6.34	0.77	dB

Las conclusiones obtenidas del análisis de las tablas anteriores para nuestro sistema para transmisión de video en la banda Ku y Ka son:

- Por una parte se observa que el comportamiento del escenario es función de los comportamientos individuales en cada enlace involucrado.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{Total}} [\text{dB}] = -10 \log_{10} \left(10^{\frac{-\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{Ascendente}}}{10}} + 10^{\frac{-\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{Descendente}}}{10}} \right)$$

- En este caso necesitamos un valor mínimo de 5.83 [dB] para $(C/N)_{total}$ en el diseño de nuestro modelo para asegurar una operación correcta según el estándar de transmisión de video DVB-S2.

Por tanto, a partir del esquema inicial se estudia su comportamiento ante los posibles estados en función de la presencia o ausencia de eventos de lluvia.

Cada uno de estos escenarios muestra que si bien la relación portadora a ruido ascendente presenta un nivel mucho mayor que del lado descendente, el resultado global siempre tiende a tomar el menor valor de la relación portadora a ruido (C/N) del enlace ascendente o descendente.

- Si queremos obtener el mejor rendimiento total debemos asegurar un nivel equilibrado entre $(C/N)_{asc}$ y $(C/N)_{desc}$. O conseguir grandes valores para las dos relaciones ascendente y descendente además que la diferencia de niveles portadora a ruido (C/N) para cada enlace sea lo más pequeña posible.
- Si el diseño no permitiera la obtención de niveles de (C/N) para los enlaces ascendentes y descendentes casi similares, entonces debemos de reducir o aumentar la relación (C/N) del enlace ascendente o descendente según tengamos la posibilidad de controlar su valor con la finalidad de que el peor valor de (C/N) de cualquier enlace no sea la tendencia del valor global que obtengamos de nuestro sistema de comunicaciones.
- La parte de los reportes referente al margen del enlace se interpreta de la siguiente manera:

Quando es positivo: este representa el nivel de potencia extra que tenemos sobre el diseño. Este puede emplearse en situaciones en las cuales se presenten atenuaciones no consideradas en el diseño.

Quando es negativo: este representa un mal diseño, en donde no se asegura una calidad óptima para ofrecer el servicio.

- Una característica a la que no habíamos puesto gran atención en proyectos previos es la disponibilidad del enlace (99.7 [%] en Ku y 99 [%] en Ka). Este parámetro se encuentra relacionado con el "*Outage Percent*" del modelo de lluvia.

Una disponibilidad cercana al 100 [%] en términos generales corresponde con efectos más drásticos por la presencia de precipitación. Además es más difícil este valor a medida que el sistema opera en una banda de frecuencias mucho mayor.

- Si comparamos los resultados simulados en STK y con Matlab en la Tesis consultada, se notan diferencias significativas en diversos parámetros. Esto como consecuencia de que:
 1. El modelo de lluvia empleado no es el mismo.
 2. En el programa se calculan los niveles de temperatura de ruido, mientras que en la Tesis es fijado su valor.

CONCLUSIONES

En la presente tesis se abordaron diversas cuestiones sobre los sistemas de comunicación por satélite pero principalmente aquellos relacionados al análisis y diseño. Lo anterior a través del cálculo de enlaces o presupuesto de potencia.

Los principales aspectos a considerar en este proceso de estudio son:

- La banda de operación, que es un factor crítico que determinará los niveles de pérdidas o ganancias que pudieran surgir. Además de definir las capacidades obtenidas en términos de ancho de banda y tasa de transmisión.
- Los fenómenos atmosféricos de propagación, los principales efectos negativos sobre por la señal son: atenuación y despolarización (dependientes de la frecuencia y ángulo de elevación).
- La presencia de diversas fuentes de ruido (artificial, natural y térmica), cuantificada a través de algunas características de los elementos (NF y T_e).
- Los efectos de interferencia, que abarcan los relacionados con la presencia de otros sistemas tanto terrestres como espaciales operando en la misma región del espectro de radiofrecuencias y los que se generan por tener varias portadoras.

En función de cual extremo es el transmisor o receptor se definirán dos trayectorias: ascendente y descendente. Además su desempeño y calidad se evalúa a través de la potencia isotrópica radiada efectiva (PIRE) y la figura de mérito (G/T) respectivamente.

Para la evaluación del rendimiento se emplean indistintamente cualquiera de las relaciones (C/N_0), (C/N) o (E_b/N_0). Esto como consecuencia directa de las expresiones que definen la dependencia entre los tres términos anteriores.

Por otra parte en la mayor parte de la tesis se abordó el uso de STK (Satellite Tool Kit), un software orientado a la experimentación en este campo. En donde se desarrolló una serie de proyectos sobre el estudio de diversos aspectos referentes a las comunicaciones. La simulación llevada a cabo en este caso puede ser vista como una etapa previa al diseño final, su éxito dependerá de las capacidades del programa de imitar situaciones lo más cercano posible a la realidad; además nos permite evitar posibles problemas que pudieran pasarse inadvertidos en el desarrollo y puesta en operación del sistema.

Una de las principales características de STK se encuentra en la posibilidad de emplear los recursos predefinidos o generar nuevos en función de las necesidades de cada usuario.

La primera simulación se orientó al análisis y diseño de las antenas en donde se trabajó con un par de estos elementos en distintas bandas (C, Ku y Ka). Se examinó el comportamiento de algunos parámetros intrínsecos y cambios presentes en el patrón de radiación y su respectiva proyección sobre la superficie terrestre (huella de cobertura) en función de la frecuencia de operación. Estos dispositivos radiantes son uno de los principales objetos que definimos tanto en el segmento terrestre (estación) y espacial (satélite), debido a que su configuración permite modificar los niveles que adquieren las relaciones PIRE y (G/T) que a su vez impacta en los resultados finales del sistema.

Por tanto, un correcto diseño de este elemento nos asegurará una calidad del enlace de comunicaciones ante los diferentes efectos degradantes presentes en la trayectoria de propagación. Las principales propiedades de interés analizadas son el nivel de ganancia, ancho del haz.

Además como se mencionó en dicho capítulo, tenemos la posibilidad de emplear un patrón de radiación nuevo a través de un archivo externo, el cual puede ser creado con el uso de algún programa (Satsoft, Pattern Magus). Con estas herramientas de cómputo, por ejemplo, se pueden diseñar huellas de cobertura irregulares propias de las antenas perfiladas de una forma más sencilla.

En el segundo proyecto se describió la configuración de un sistema multihaz y multiportadora. El primero consistió en la generación de diversos haces puntuales desde el mismo satélite orientados en distintas zonas territoriales y caracterizados por operar en iguales o distintas circunstancias (frecuencia de operación, niveles de potencia, ganancia, polarización, etc.) según el número de elementos añadidos. Mientras que el segundo esquema, permite utilizar la misma antena para la transmisión o recepción de distintas señales radioeléctricas teniendo como desventaja que el apuntamiento no podrá ser cambiado para cada portadora generada.

Con los modelos tradicionales que trabajan con un solo haz se encontraban en la disyuntiva de elegir entre ampliar o reducir la huella de cobertura para ofrecer una mala o mejor calidad de servicio a estaciones terrenas dispersas o concentradas geográficamente. Con el multihaz no se tiene ese dilema debido a que este permite una operación de zonas iluminadas concentradas y extendidas. Las limitaciones que presentan, sin embargo, se ven determinadas por la complejidad de diseño establecido en las antenas, además de los efectos de interferencia que se generan en el satélite debido a la presencia de distintos haces puntuales adyacentes.

Seguidamente se desarrolló un capítulo centrado en la conformación de huellas de cobertura, un correcto diseño permite reducir los niveles de potencia empleados para cubrir una región geográfica en específico o visto de otro modo implica la concentración de la energía de la antena del satélite en zonas de interés minimizando la iluminación de áreas donde el servicio no es necesario (zonas fronterizas, zonas oceánicas, etc.).

Para conformar una huella de cobertura se empleaban distintos métodos que implicaban contar con un arreglo de elementos que generaban los distintos haces, esto tiene como inconveniente la complejidad de este arreglo así como el aspecto de peso involucrado que impacta negativamente a nivel económico en el lanzamiento del satélite.

Los avances tecnológicos desarrollados entorno a este tema van orientados al diseño de antenas perfiladas, es decir, aquellas que presentan irregularidades en su reflector (determinadas mediante un proceso iterativo). Este nuevo dispositivo es más sencillo, pero tienen la desventaja de que solo es válido para una frecuencia de operación por lo cual si se deseará un sistema multifrecuencial sería necesario contar con un mayor número de elementos.

Habiendo analizado las características desde el satélite en cuanto a su patrón de radiación y huella de cobertura, lo siguiente que se desarrolló fue el estudio de una de las características importantes para el equipo receptor (la figura de mérito (G/T)).

En ese proyecto se ubicaron distintas estaciones terrenas en la república mexicana con la finalidad de analizar el comportamiento que presentaba (G/T) para distintos valores de azimut y elevación en la orientación de las antenas para establecer comunicación con el segmento espacial.

Las diferentes posiciones geográficas de cada instalación determinan el rango de separación entre el transmisor y los distintos receptores, así como los cambios en la temperatura de ruido del sistema (que afecta a G/T). Que a su vez T_{ruido} se conforma por la captada en la antena (lluvia, nubes, cielo, sol, etc.) y las generadas por los componentes (atenuadores y LNA) del receptor.

Después dedicamos un proyecto a la conformación de enlace de comunicaciones entre una estación terrena y un satélite el cual se desplazaba entorno a una órbita circular. El estudio generado se basó en modificar características del diseño inicial ante diversas limitaciones en distintos parámetros con la finalidad de mejorar los tiempos de acceso y la calidad de la conexión. En este caso específico el análisis se desarrolló de manera gráfica con ayuda de la representación 2D y estudio de las curvas para cada uno de los parámetros restringidos.

Los cambios se realizan en uno de los extremos dependiendo de la propiedad que se ve limitada, además no todas son viables de mejorarse modificando cualidades del transmisor o receptor (sino que dependen del tipo de órbita seleccionada).

Pasamos al siguiente capítulo referente a un sistema conformado por dos enlaces analizados en distintas bandas (C, Ku y Ka) y bajo una situación de cielo despejado o con la presencia de fenómenos atmosféricos atenuantes (precipitación y gases atmosféricos). Los datos obtenidos en general muestran la importancia que se tiene en la selección de la frecuencia de diseño para cada trayectoria, especialmente cuando rebasamos los 10 [GHz].

El último escenario estuvo dedicado a la transmisión de video bajo las características definidas por el estándar DVB-S2. Se presentaron datos estadísticos sobre medidas de interés en cuatro situaciones que son factibles de ocurrir (ausencia o presencia de lluvia). Los resultados obtenidos por STK fueron comparados con los proporcionados por la Tesis consultada, esto con la finalidad de mostrar las diferencias y similitudes.

En cuanto a los aspectos de mejoras relacionadas con el software STK que pudieran perfeccionar el análisis y diseño de este campo son principalmente con la actualización de los modelos que permiten estimar la atenuación en la propagación a través de la atmósfera para los diversos fenómenos típicos.

Otro aspecto de mejora que se encontró al momento de modelar los sistemas multihaz, dado que al querer modificar la orientación de un haz en particular siempre se regresaba al primero y existían momentos en los cuales se borraba el valor del azimut o elevación previamente establecido.

La licencia de tipo educativa limita la experiencia de uso en STK, si bien nos permite acceder a las principales características del programa para el desarrollo de esta tesis; no nos da acceso a los mapas terrestres.

Esto tiene un impacto en el estudio de propagación de la señal, dado que no se toma en cuenta la presencia de algún obstáculo geográfico (como puede ser la presencia de una montaña) que limitaría los ángulos de elevación y que pudiésemos emplear en los cálculos.

En cuanto a los temas a desarrollarse entorno al uso de STK no solamente estarían enfocados al módulo de que se empleo para el desarrollo de esta tesis, sino que abarcan el uso de otros módulos.

Por una parte continuando con el aspecto de las comunicaciones, se podría realizar el estudio de los efectos de interferencia por la presencia de sistemas terrestres o satélites.

Como vimos en el desarrollo de los proyectos, existen diversas propiedades que se pueden adecuar a una situación particular en caso de que los elementos predefinidos no cumplan los requerimientos a simular. Todo esto con el uso de scripts que no son otra cosa que archivos programados en lenguajes compatibles con STK definidos por el usuario. Así que otro tema a desarrollar estaría enfocado al estudio de un escenario definido a través de estos, dado que no se tiene una referencia que permita conocer como realizar dicha configuración.

Otros temas que se pueden estudiar están relacionados con los efectos de intermodulación que fue un aspecto que no se estudio a fondo, sin embargo, se deja un capítulo que permitirá analizar este tema. También se podría estudiar un nuevo esquema de modulación para este tipo de sistemas o realizar una comparativa con los tipos precargados en STK.

Por otra parte hablando del uso los otros módulos con los que cuenta STK, estos pueden ser empleados para el desarrollo de otros temas que hagan uso de las comunicaciones. Por ejemplo, emplear el paquete de orientación para el estudio de las características orbitales de un satélite en específico con nuevos modelos de propagadores y tener en cuenta estas variaciones en los cálculos.

A partir de la presente tesis, se generó un escrito resumiendo los principales apartados entorno al uso de software especializado para la experimentación en este medio y cuya publicación se realizará en una revista de divulgación científica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Maini, Anil Kumar y Agrawal, Varsha. **"Satellite technology: principles and applications"**. 2^{da} Edición 2010. Editorial Wiley
- [2] M. Braun, Teresa. **"Satellite communications. Payload and systems"**. 1^{ra} Edición 2012. Editorial Wiley.
- [3] Gérard Maral, Michel Bousquet. **"Satellite communications systems. Systems, techniques and technologies"**. 5^{ta} Edición 2009. Editorial Wiley.
- [4] Raj Cheruku, Dharma. **"Satellite communication"**. 1^{ra} Edición 2009. Editorial I. K. International Publishing House.
- [5] R. Elbert, Bruce. **"Introduction to satellite communication"**. 3^{ra} Edición 2008. Editorial Artech House.
- [6] Louis J. Ippolito, Jr. **"Satellite communications systems engineering atmospheric effects, satellite link design and system performance"**. 1^{ra} Edición 2008. Editorial Wiley.
- [7] Dennis Roddy. **"Satellite communications"**. 4^{ta} Edición 2006. Editorial McGraw-Hill.
- [8] Yadava, R. L. **"Antenna and wave propagation"**. Edición limitada 2011. Editorial Prentice Hall of India.
- [9] Raja Rao, K.N. **"Fundamentals of satellite communication"**. Edición limitada 2006. Editorial Prentice Hall of India.
- [10] Mitra, Monojit. **"Satellite communication"**. 3^{ra} Edición 2007. Editorial Prentice Hall.
- [11] R. Elbert, Bruce. **"The satellite communication applications handbook"**. 2^{da} Edición 2004.
- [12] Wave Summit Course. **"Satellite communications. System and its design technology"**. Editorial Takashi Iida.
- [13] V. S. Bagad. **"Satellite communications"**. 1^{ra} Edición 2009. Editorial Technical Publications Pune.
- [14] Neri Vela, Rodolfo. **"Comunicaciones por satélite"**. 1^{ra} Edición 2003. Editorial Thomson.
- [15] H. Martin, Donald. **"Communication Satellites"**. 4^{ta} Edición 2000. Editorial Aerospace Corp.
- [16] Sebastiano, Tirró. **"Satellite communication system design"**. 1^{ra} Edición 1993. Editado New York: Plenum Press.
- [17] Mossi García, José Manuel, Igual García, Jorge. **"Sistemas de televisión"**. Universidad Politécnica de Valencia. Servicio de publicaciones. Colección: LIBRO DOCENTE.
- [18] Figueiras, A. R. **"Una panorámica de las telecomunicaciones"**. Pearson Educación, S.A. Madrid, 2002.

- [19] N. Pelton, Joseph. **"The basics of satellite communications"**. 2^{da} Edición. 2006. International Engineering Consortium.
- [20] Pratt, Timothy. Bostian, Charles. **"Satellite communications"**. 2^{da} Edición 2002. Editorial Wiley.
- [21] Benoit, Herve. **"Satellite television: techniques of analogue and digital television"**. London : Arnold ; New York : J. Wiley, 1999
- [22] A. Balanis, Constantine. **"Antenna theory. Analysis and design"**. 3^{ra} Edición 2005. Editorial John Wiley & Sons.
- [23] L. Pritchard, Wilbur. **"Satellite communications systems engineering"**. 2^{da} Edición 1993. Editorial Prentice Hall.
- [24] R. Chartrand, Mark. **"Satellite communications for the nonspecialist"**. 1^{ra} Edición 2004. Editorial SPIE Publications.
- [25] P. Narayan, C. **"Antennas and propagation"**. 1^{ra} Edición 2005. Editorial Technical Publications.
- [26] Matos Gómez, Jorge. **"Satellite broadcast systems engineering"**. 1^{ra} Edición 2002. Editorial Artech -House Inc.
- [27] **"Diseño de un reflector parabólico perfilado para transmisión satelital sobre el territorio mexicano"**. Salvador Landeros Ayala. Ramiro Sámano Robles. Rodolfo Neri Vela.
- [28] **"Invitation to tender (ITT)-multilingual communication satellite system"**. ETSIT. UPM. Master in Space Technology.
- [29] **"Estudio teórico y experimental de la atenuación por lluvia en la banda Ka"**. Ángel Salces Sillero, Patricia Nicolás Agudo.
- [30] MST-2010-GEO-TN-001_2A. **"Master in space technology: Space Project GEO"**. Miguel Azaola, Isabel García Rojo, Jesús Crespo, Gorka González, Carlos Moriana, Joaquín Reyes.
- [31] <http://www.clarkefoundation.org/docs/ClarkeWirelessWorldArticle.pdf>
- [32] <http://www.nhk.or.jp/strl//publica/bt/en/pa0005.html>
- [33] <http://www.mtc.gob.pe/portal/comunicacion/forotv/ponencias/ATSC/Robert/Graves.pdf>
- [34] http://www.dvb.org/technology/fact_sheets/DVB-S2_Factsheet.pdf
- [35] http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102300_102399/102376/01.01.01_60/tr_102376v010101p.pdf
- [36] <http://www.eucap2012.org/files/invited/02-Otto%20Koudelka-Is%20there%20a%20need%20for%20satellite%20communications.pdf>

- [37] <http://www.itu.int/osg/gmpcs/index.asp?lang=es>
- [38] http://www.upv.es/satelite/trabajos/Grupo12_99.00/tablas.htm
- [39] www.img.lx.it.pt/~fp/cav/Additional_material/Satellite%20Direct-to-Home.pdf
- [40] <http://www.stk.com/resources/help/online/stk/STK/pdf/proTutorial.pdf>
- [41] http://www.comtechefdata.com/files/articles_papers/WP-Migration_DVB-S_to_DVB-S2.pdf
- [42] <http://ficheros.molamiweb.com/webs/coyan/trabajo-DVB-texto.pdf>
- [43] Apuntes Dr. Salvador Landeros Ayala. **“Temas selectos de telecomunicaciones”**
- [44] <http://es.scribd.com/doc/13082713/COST-255-Radiowave-Propagation-Modelling-for-SatCom-Services-at-KuBand-and-Above>
- [45] **“Analysis of the bandwidth efficiency of DVB-S2 in a typical data distribution network”**. Dirk Breynaert, Maximilien d'Oreye de Lantremange, Newtec.
- [46] <http://morse.uml.edu/Activities.d/Summer-05/PAPERS/KC/panagopoulos-satt-comm.pdf>
- [47] http://www.wtec.org/loyola/satcom/c2_s1a.htm
- [48] http://www.esoa.net/upload/files/policy/spectrum_brochure_summit.pdf
- [49] <http://weebau.com/satellite/>
- [50] http://www.atsc.org/cms/standards/a_81.pdf
- [51] <http://www.nhk.or.jp/str1//publica/bt/en/pa0005.html#f2>
- [52] <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/3105/1/5622.pdf>
- [53] <http://radiomen.tripod.com/satelites.htm>
- [54] http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.618-9-200708-S!!PDF-S.pdf
- [55] http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-5-200102-S!!PDF-S.pdf
- [56] Satellite Tool Kit (STK). <http://www.agi.com>