

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DIMENSIONAMIENTO DE LA ESTACIÓN TERRENA DE RESPALDO DE SERVICIOS PARA OPERACIÓN DEL SATÉLITE SIMÓN BOLÍVAR

Tutor académico: Ing. Noel Díaz
Tutora industrial: Ing. Belkis Orozco

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Alcaíno Pizani, Manuel
para optar al Título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2008

Alcaíno Pizani, Manuel

**DIMENSIONAMIENTO DE LA ESTACIÓN TERRENA DE RESPALDO DE
SERVICIOS PARA OPERACIÓN DEL SATÉLITE SIMÓN BOLÍVAR**

**Tutor académico: Ing. Noel Díaz. Tutor industrial: Ing. Belkis Orozco. Tesis.
Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica.
Ingeniero Electricista. Opción: Comunicaciones. Institución: CANTV. 2008.
101h. + anexos.**

Palabras Claves: Dimensionamiento; Estación terrena satelital; Satélite Simón Bolívar.

Resumen. Se plantea el dimensionamiento de la estación terrena de respaldo de servicios para operación del Satélite Simón Bolívar, teniendo a CANTV como principal operador de servicios. Se incluye un análisis de los posibles servicios que pueden ser prestados a través de las bandas C, Ku y Ka; así como, una estimación de localidades de clientes en el país, para poder tener una idea del comportamiento total del sistema y realizar una propuesta de equipos de telecomunicaciones a usar en la estación terrena de respaldo, además de costos tentativos para estos. En este estudio, se realizan cálculos específicos que pudieran garantizar el mejor desempeño en cuanto a ancho de banda, potencia, antenas y amplificadores. Se determinan los altos costos para prestar servicios en banda C, la buena planificación y distribución de equipos para la banda Ku y la inviabilidad de canalizar servicios a través de la banda Ka, debido a su susceptibilidad a los efectos atmosféricos.

ÍNDICE GENERAL

CARTA DE APROBACIÓN	
RESUMEN.....	ii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABLAS.....	xv
SIGLAS.....	xIv
ABREVIATURAS.....	xv
ACRÓNIMOS.....	xvi
 INTRODUCCIÓN.....	 1
Reseña histórica de CANTV.....	2
Reseña histórica de los satélites.....	5
 CAPÍTULO I	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS.....	7
1.1 Antecedentes.....	7
1.2 Justificación.....	7
1.3 Planteamiento del problema.....	7
1.4 Objetivos.....	8
1.5 Metodología.....	8
 CAPÍTULO II	
FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	11
2.1 Comunicaciones satelitales.....	11
2.1.1 Órbitas de los satélites.....	11
2.1.2 Tipos de órbitas satelitales.....	11
2.1.3 Estructura de un satélite.....	12
2.1.3.1 Plataforma.....	13
2.1.3.2 Carga útil.....	13
2.1.4 Satélites de comunicaciones.....	14
2.1.5 Transmisores y amplificadores en el satélite.....	14

2.1.6 Estructura de una estación terrena.....	15
2.1.6.1 Enlace de subida.....	15
2.1.6.2 Enlace de bajada.....	16
2.2 Sistemas VSAT (Very Small Aperture Terminal).....	16
2.2.1. Antena.....	17
2.2.1.2 Polarización cruzada y discriminación de la polarización....	19
2.2.1.3 Temperatura de ruido de la antena (Tant).....	19
2.2.1.4 Configuraciones típicas de antenas para sistemas VSAT....	20
2.2.1.4.1 Antenas Parabólicas	
Axis-Simétricas (Foco Primario).....	20
2.2.1.4.2 Antenas Asimétricas (Offset).....	21
2.2.1.4.3 Cassegrain.....	21
2.2.1.4.4 Gregorian.....	22
2.2.2. LNB (Low Noise Block Downconverter).....	23
2.2.2.1 LNA (Low Noise Amplifier).....	24
2.2.2.2 LNC (Low Noise Conveter).....	25
2.2.3. HPA (High Power Amplifiers).....	25
2.2.3.1 TWTAs (Travelling Wave Tube Amplifiers).....	25
2.2.3.1.1 Características RF Entrada/Salida.....	25
2.2.3.1.2 Consideración en la aplicación de los TWTAs.....	26
2.2.3.1.3 Consideraciones de diseño	
para TWTAs en VSATs.....	26
2.2.3.2 SSPAs (Solid State Power Amplifiers).....	26
2.2.3.3 Comparación entre TWTAs y SSPAs.....	26
2.2.4 Up converter.....	27
2.2.5 Modulador.....	28
2.2.6 Demodulador.....	28
2.2.7 Corrección y detección de errores.....	28
2.2.8 Tecnologías de acceso.....	29
2.2.8.1 TDM / TDMA (Time Division	

Multiplex/Multiple Access).....	29
2.2.8.2 Sistema SCPC (Single Channel Per Carrier).....	29
2.2.8.3 MCPC (Multi Carrier Per Channel).....	29
2.2.8.4 DVB-S.....	29
2.2.8.5 DVB-RCS.....	30
2.2.9 Aplicaciones.....	31
2.2.10 Distribución de los componentes.....	31
2.3 Cálculo de un enlace satelital.....	32
2.3.1 Potencia recibida.....	32
2.3.2 Diámetro de la antena.....	32
2.3.3 Pérdida por atenuación en el espacio libre.....	33
2.3.4 P.I.R.E: Potencia Isotrópica Equivalente Radiada.....	33
2.3.5 Ángulo Azimut, ángulo de elevación y distancia.....	34
2.3.5.1 Cálculo del ángulo de elevación de la estación terrena (θ).....	35
2.3.5.2 Cálculo del Azimut (Azm).....	35
2.3.5.3 Cálculo de la distancia desde el satélite geoestacionario hasta la estación terrena (D).....	35
2.3.6 Pérdidas adicionales.....	36
2.3.6.1 Atenuación por gases atmosféricos (L_g).....	36
2.3.6.2 Atenuación producida por la lluvia (L_r).....	37
2.3.6.3 Atenuación por centelleo troposférico para ángulos de elevación (θ_t) superiores a 4° (L_s).....	45
2.3.6.4 Atenuación debida a las nubes y la niebla (L_c).....	49
2.3.6.5 Atenuación por reducción (Back Off).....	51
2.3.6.6 Atenuación por efectos de polarización cruzada.....	51
2.3.6.7 Atenuación por seguimiento y desalineamiento de la antena (L_d).....	51
2.3.7 Ruido térmico.....	52
2.3.8 Figura de ruido.....	53

2.3.9 Factor de mérito (G/T).....	54
2.3.9.1 Cálculo de G/T	54
2.3.10 Ruido en el sistema.....	55
2.3.10.1 Temperatura de ruido en el receptor (T_{rx}).....	55
2.3.10.2 Pérdida introducida por el cable en el sistema de recepción.....	56
2.3.10.3 Temperatura equivalente del sistema (T_s).....	56
2.3.11 Relación Portadora a Ruido (C/N).....	58
2.3.12 Relación Energía de bit a densidad de ruido (E_b/N_o).....	59
2.3.13 Relación Potadora a ruido total en el sistema (C/N)total.....	61
2.3.13.1 Ruido de interferencia por señales.....	62
polarizadas ortogonalmente.....	62
2.3.14 Modulación Digital.....	62
2.3.14.1 BER (Bit Error Rate).....	62
2.3.14.1.1 BER y Ruido.....	63
2.3.14.1.2 Factores que afectan al BER.....	63
2.3.14.2 Modulación PSK (Phase Shift Keyed).....	65
2.3.14.3 Ancho de banda ocupado en modulación digital.....	65
2.3.15 Velocidades de transmisión y ancho de banda de ruido.....	66
2.3.16 El transpondedor en el satélite.....	66
2.3.16.1 Punto de operación del transpondedor.....	67
2.3.16.2 Consideraciones a tomar en cuenta en el uso del transpondedor.....	69
2.3.17 Cálculo del HPA en la estación terrena en Tx.....	69
2.3.18 Datos del Satélite Simón Bolívar.....	70
2.3.19 Bandas de frecuencia.....	71
2.3.19.1 Acerca de la banda Ka.....	72

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	73
3.1 Datos geográficos de las estaciones remotas (clientes).....	73
3.2 Datos geográficos de las estación terrena de respaldo (Hub).....	74
3.3 Lineamientos a seguir por parte de CANTV.....	75
3.3.1 Banda C.....	75
3.3.2 Banda Ku.....	77
3.3.3 Banda Ka.....	80
3.4 Resumen de cálculos para las bandas C, Ku y Ka.....	80
3.4.1 Ángulo de elevación (θ).....	81
3.4.2 Azimut (Azm).....	81
3.4.3 Distancia entre el satélite y la estación terrena (Dist.).....	82
3.4.4 Enlace Subida Hub-Satélite.....	82
3.4.4.1 Pérdida por espacio libre (Lo).....	82
3.4.4.2 Ganancia de la antena transmisora (Gtx).....	82
3.4.4.3 Ancho de banda ocupado en modulación digital (AB ocup).....	82
3.4.4.4 Ancho de banda asignado (ABasig).....	83
3.4.4.5 Densidad de flujo de saturación satélite (SDFnom).....	83
3.4.4.6 Ganancia antena de 1m ² y eficiencia 100% (G1m ²).....	83
3.4.4.7 Potencia Isotrópica Equivalente Radiada Estación Terrena (PIREest).....	83
3.4.4.8 Potencia en el HPA para una portadora (P_{HPA} Una portadora).....	84
3.4.4.9 Relación Portadora Temperatura Ruido (C/T up).....	84
3.4.4.10 Relación Portadora Densidad de Ruido (C/No up).....	84
3.4.4.11 Relación Energía Bit Densidad Ruido (Eb/No) up.....	84
3.4.5 Estimación para el año 2011 (Banda C).....	85
3.4.5.1 Potencia requerida en el HPA para cada velocidad de transmisión (P_{HPA} Total/Vel.Tx).....	85

3.4.5.2 Potencia total requerida en el HPA para todas las velocidades de transmisión ($P_{\text{HPA Total}}$).....	85
3.4.5.3 Ancho de banda total (AB total).....	85
3.4.5.4 Número total transpondedores requeridos (Total Transp.)...	86
3.4.6 Estimación para el año 2011 (Banda Ku).....	86
3.4.6.1 Outbound e Inbound en la banda Ku.....	86
3.4.6.2 Potencia requerida en el HPA para cada velocidad de transmisión ($P_{\text{HPA Total/Vel.Tx}}$).....	87
3.4.6.3 Potencia total requerida en el HPA para todas las velocidades de transmisión ($P_{\text{HPA Total}}$).....	88
3.4.6.4 Ancho de banda total requerido por el Outbound (AB total Outbound).....	88
3.4.6.5 Número total de transpondedores requeridos por el outbound (Total Transp. Outbound).....	88
3.4.6.6 Moduladores DVB-S (Outbound).....	88
3.4.6.7 Ancho de banda total requerido por el inbound (AB total Inbound).....	89
3.4.6.8 Número total de transpondedores requeridos por el inbound (Total Transp. Inbound).....	89
3.4.6.9 Demoduladores DVB-RCS (Inbound).....	89
3.4.7 Enlace Bajada Hub-Satélite.....	89
3.4.7.1 Potencia Isotrópica Equivalente Radiada funcional del satélite (PIRE fun).....	90
3.4.7.2 Relación Portadora a Temperatura Ruido (C/T down).....	90
3.4.7.3 Relación Portadora a Densidad de Ruido (C/No down).....	90
3.4.7.4 Relación Energía Bit a Densidad de Ruido (Eb/No down).	91
3.4.8 Figura de mérito de la estación de respaldo (Hub).....	91
3.4.8.1 Ganancia de la antena receptora (Gan. Ant. Rx).....	91
3.4.8.2 Temperatura de ruido del sistema de recepción (Ts).....	91
3.4.8.3 Figura de mérito (G/Ts).....	91

3.4.9 Desempeño total del sistema (Bandas C y Ku).....	92
3.4.9.1 Relación Portadora a Temperatura de Ruido Intermodulación(C/T)I.....	92
3.4.9.2 Relación Portadora a Temperatura Ruido total (C/T total)..	92
3.4.9.3 Relación Portadora Densidad de Ruido total (C/No total)...	92
3.4.9.4 Relación Portadora a Ruido total (C/N total).....	92
3.4.9.5 Desempeño total del sistema para la Banda Ka.....	93
3.5 Equipos seleccionados para el dimensionamiento del hub.....	93
3.5.1 Banda C.....	94
3.5.2 Banda Ku.....	95
3.6 Aspectos a ser tomados en cuenta para la banda C.....	97
3.6.1 Atenuación por lluvia, centelleo troposférico, gases atmosféricos y nubes.....	97
3.7 Aspectos a ser tomados en cuenta para la banda Ku.....	97
3.7.1 Atenuación por lluvia, centelleo troposférico, gases atmosféricos y nubes.....	97
3.8 Aspectos a ser tomados en cuenta para la banda Ka.....	97
3.8.1 Atenuación por lluvia.....	98
3.8.2 Atenuación por centelleo troposférico, gases atmosféricos y nubes.....	98
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	99
Banda C.....	99
Banda Ku.....	100
Banda Ka.....	100
Aspectos generales.....	101
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102
BIBLIOGRAFÍAS.....	104
ANEXOS.....	106
[Anexo 1] Distribución de equipos en el hub (Banda C 1).....	107

[Anexo 2] Distribución de equipos en el hub (Banda C 2).....	108
[Anexo 3] Distribución de equipos en el hub (Banda Ku).....	109
[Anexo 4] Haz de cobertura Banda C Centro América, Caribe y Sur América.....	110
[Anexo 5] Haz de cobertura Banda Ku Región norte.....	111
[Anexo 6] Haz de cobertura Banda Ku Región sur.....	112
[Anexo 7] Haz de cobertura Banda Ka.....	113
[Anexo 8] PIRE para polarización horizontal en banda C.....	114
[Anexo 9] G/Tsat para polarización horizontal en banda C.....	115
[Anexo 10] PIREsat para polarización Horizontal en banda Ku (Haz Sur).....	116
[Anexo 11] G/Tsat para polarización horizontal en banda Ku (Haz sur).....	117
[Anexo 12] Tabla de cálculos para Banda C SCPC (Hub→Satélite→VSAT Cliente).....	118
[Anexo 13] Tabla de cálculos para Banda C SCPC (VSAT Cliente →Satélite→ Hub).....	119
[Anexo 14] Tabla de cálculos para Banda Ku Internet VSAT (Outbound).....	120
[Anexo 15] Tabla de cálculos para Banda Ku Internet VSAT(Inbound).....	121
[Anexo 16] Tabla de cálculos para Banda Ka.....	122
[Anexo 17] Tabla de cálculos atenuaciones en el Hub (San Tomé).....	123
[Anexo 18] Tabla cálculos atenuaciones locación cliente (D. Amacuro).....	124

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 Modelo básico de una estación terrena en Tx y Rx.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.2 Modelo básico de subida para una estación terrena.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.3 Modelo básico de bajada para una estación terrena.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.4 Posición del Feed horn en una antena terrestre.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.5 Feedhorn con sus sistema asociado.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.6 Antena axis-simétrica.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.7 Antena asimétrica.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.8 Antena de tipo Cassegrain.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.9 Antena de tipo Gregorian.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.10 Diagrama de un Low Noise Block.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2.11 Relación entre dBc y frecuencia. Se muestra la señal deseada y el ruido agregado dentro de cierto rango de frecuencia.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2.12 Atenuación específica debida a los gases atmosféricos.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 2.13 Representación esquemática de un trayecto Tierra-Espacio con indicación de los parámetros que se utilizarán en el proceso de predicción de atenuación.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 2.14 Altura media anual de la isoterma de 0°C por encima del nivel del mar (Km).....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 2.15 Zonas en América correspondientes a distintos valores de intensidad de lluvia excedida.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 2.16 Término Nhumedad de la refractividad de la superficie (ppm)rebasado durante el 50% del año.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 2.17 Atenuación específica de las pequeñas gotas de agua a diversas temperaturas en función de la frecuencia.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 2.18 Contenido total normalizado de la columna de agua líquida de nube (kg/m²)rebasado durante el 1% del año.....</i>	<i>50</i>

<i>Figura 2.19 Potencia de salida de un HPA.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 2.20 Generadores de ruido equivalentes en el modelo de bajada o receptor.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 2.21 Componente pasivo con una pérdida L.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 2.22 Temperatura de ruido en función de la frecuencia y el ángulo de elevación de la antena.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 2.23 Relación entre BER y C/N.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 2.24 Relación entre BER y Eb/No.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 2.25 Modulación BPSK.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 3.1 Diagrama del sistema en Banda C mediante el cual se prestará el servicio SCPC.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 3.2 Asignación de frecuencias banda C.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 3.3 Diagrama del sistema en Banda Ku con las direcciones de transmisión del Outbound y el Inbound.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 3.4 Posibles distribuciones del ancho de banda en los transpondedores de Banda Ku.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 3.5 Asignación de frecuencias banda Ku.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 3.6 Asignación de frecuencias banda Ka.....</i>	<i>80</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 2.1 Tipos de órbitas satelitales.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 2.2 Intensidad de lluvia excedida en mm/hr.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 2.3 Coeficientes que dependen de la frecuencia para estimar la atenuación específica de la lluvia.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 2.4 datos de la carga útil del satélite Simón Bolívar.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 2.5 Comparación entre las bandas de frecuencia C, Ku y Ka.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 3.1 Ubicación de las estaciones terrenas de los clientes.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 3.2 Datos de la estación terrena de respaldo servicios (Hub).....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 3.3 Parámetros de la estación terrena de respaldo (Hub) en Tx banda C, Ku y Ka.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 3.4 Demanda Satelital CANTV Banda C SCPC.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 3.5 Demanda Satelital CANTV Banda Ku.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 3.6 Cantidad de agregación por portadora y porcentaje de uso de las estaciones terrenas para cada velocidad de transmisión en banda Ku.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 3.7 Equipos seleccionados para el hub operando en banda C.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 3.8 Equipos seleccionados para el hub operando en banda Ku.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 3.9 Costos totales para los hubs en banda C y Ku.....</i>	<i>97</i>

SIGLAS

AT&T: American Telephone and Telegraph.

CANTV: Compañía Anónima Nacional Teléfonos de Venezuela

CEV: Centro Espacial Venezolano

CONATEL: Comisión Nacional de Telecomunicaciones

NASA: National Aeronautics and Space Administration

PDVSA: Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima

UCV: Universidad Central de Venezuela

ABREVIATURAS

AB asig.: Ancho de banda asignado

AB ocup.: Ancho de banda ocupado

AB transp. Ancho de banda del transpondedor

Ant.: Antena

E_b/N_0 down: Relación energía de bit a densidad de ruido enlace descendente

E_b/N_0 up: Relación energía de bit a densidad de ruido enlace ascendente

Ec: Ecuación

C/N down: Relación portadora a ruido para el enlace descendente

C/N up: Relación portadora a ruido para el enlace ascendente

C/N₀ down: Relación portadora a densidad de ruido para el enlace descendente

C/N₀ up: Relación portadora a densidad de ruido para el enlace ascendente

C/U: Cada uno

C/T down: Relación portadora a temperatura de ruido para el enlace descendente

C/T I: Relación portadora a temperatura de ruido de interferencia

C/T up: Relación portadora a temperatura de ruido para el enlace ascendente

Dist.: Distancia

Down: Se refiere al enlace descendente

Feedhorn. Alimentador situado en las antenas

Gest/Ts: Figura de mérito de la estación terrena

Gsat/Ts: Figura de mérito del satélite

Hub: Se refiere a la estación de respaldo de servicios

Hub DVB-RCS: Se refiere al subsistema donde se encuentran los equipos de modulación y demodulación

P_{HPA} : Potencia en el HPA

Sat.: Satélite

Transp. Transpondedor

Up: Se refiere al enlace ascendente

ACRÓNIMOS

ASK: Amplitude Shift Keying. Codificación por cambio de amplitud

BER: Bit Error Rate. Tasa de error de bit

BFP: Filtro Pasa Banda

BPSK: Binary Phase Shift Keying. Codificación por cambio de fase en binario

C: Banda de frecuencia 4/ 6 Ghz.

DAB: Digital Audio Broadcasting. Difusión de audio digital

dBc: Decibels relative to Carrier. Decibeles en relación a la portadora

DC: Direct Current. Corriente directa

DTH: Direct To Home. Directo a casa

DVB-S: Digital Video Broadcasting –Satellite. Difusión de video digital por satélite

DVB-RCS: Digital Video Broadcasting – Return Channel Satellite. Difusión de video digital por satélite con canal de retorno

PIRE: Potencia Isotrópica Radiada Efectiva

FEC: Forward Error Correction. Corrección de errores a posteriori

FM: Frequency Modulation. Modulación en frecuencia

GaAsFet: Gallium Arsenide Field Effect Transistor

GEO: Geosynchronous Earth Orbit. Órbita geoestacionaria ecuatorial

Ghz: Gigahertz

HDTV: High Definition Television. Televisión de alta definición

HPA: High Power Amplifier. Amplificador de alta potencia

HPBW: Half Power Beam Width. Ancho del lóbulo de mitad de potencia

IBO: Input Back Off. Reducción de potencia de entrada

IDU: In-Door Unit. Unidad interna

IF: Intermediate Frequency. Frecuencia intermedia 70/140 Mhz

IM: Inter Modulation

Inbound: Canal de comunicación desde los terminales VSAT hacia el hub satelital.

IP: Internet Protocol. Protocolo de Internet

Ka: Banda de frecuencia 20/30 Ghz

Kbps: Kilobits por segundo

Ku: Banda de frecuencia 12/14 y 17/20 Ghz

KVA: Kilo Voltio Ampere

L: Banda de frecuencia 0,95/2,4 Ghz

LAN: Local Area Network. Red de área local

Lc: Atenuaciones causadas por nubes y niebla

LEO: Low Earth Orbit. Órbita media terrestre

Lg: Atenuaciones causadas por los gases atmosféricos

LNA: Low Noise Amplifier. Amplificador de bajo ruido

LNB: Low Noise Block. Bloque de bajo ruido

LNC: Low Noise Converter. Convertidor de bajo ruido

Ld: Atenuaciones por seguimiento y desalineamiento de la antena

Lo: Atenuaciones causadas por pérdidas en espacio libre

Lr: Atenuaciones causadas por la lluvia

Ls: Atenuaciones causadas por centelleo troposférico

LTWTA: Linearizer Travelling Wave Tube Amplifier. Amplificador de tubo linealizado de onda que viaja.

MCPC: Multiple Carrier Per Channel. Múltiples portadoras por canal

MEO: Médium Earth Orbit. Órbita media terrestre

MF-TDMA: Multi Frequency – Time Division Multiple Access. Acceso múltiple por división de tiempo en múltiples portadoras

Mhz: Megahertz

N/A: No aplica

OBO: Output Back Off. Reducción de potencia de salida

ODU: Out-Door Unit. Unidad de exteriores

Outbound: Canal de comunicación desde el hub hasta los terminales VSAT.

PABX: Private Automatic Branch Exchange. Central privada automática de intercambio

PBX: Private Branch Exchange. Central privada de intercambio

PC: Personal Computer. Computador personal

PSK: Phase Shift Keying. Codificación por cambio de fase

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying. Codificación por cambio de fase en cuadratura

RF: Radio Frequency. Frecuencia de radio

SCPC: Single Carrier Per Channel. Canal único por portadora

SSPA: Solid State Power Amplifier. Amplificador de potencia de estado sólido

TDM: Time Division Multiplexing. Multiplexación por división de tiempo

TDMA: Time Division Multiple Access. Acceso múltiple por división de tiempo

TWT: Travelling Wave Tube. Tubo de onda que viaja

TWTA: Travelling Wave Tube Amplifier. Amplificador de tubo de onda que viaja

Tx: Transmisión

UIT: Unión Internacional de Telecomunicaciones

VSAT: Very Small Antenna Terminal. Terminal de baja apertura

XPI: Cross Polarization Interference. Interferencia de polarización cruzada

INTRODUCCIÓN

El Satélite Simón Bolívar, será el primer satélite artificial lanzado por Venezuela y estará en órbita en el último trimestre del año 2008; permanecerá a una altitud de 35.786,04 Km sobre la tierra y su órbita será del tipo geoestacionaria ubicada a una longitud de 78°O. Este satélite fabricado por la Administración Nacional China del Espacio, tendrá un costo de 240 millones de dólares y el principal objetivo de su puesta en órbita, será darle mayor independencia tecnológica a nuestro país; además se buscará satisfacer las necesidades de comunicación, tanto de Venezuela como de los demás países latinoamericanos, con miras a una mayor integración regional; teniendo a los siguientes sectores como sus principales prioridades: salud, educación, defensa, PDVSA, gobierno, interconexión entre centrales de CANTV, etc...

El satélite contará con 28 transpondedores en total, los cuales estarán distribuidos entre tres bandas de frecuencia: C, Ku y Ka.

Adicional al proyecto del lanzamiento del satélite como tal , se tiene prevista la construcción de 3 estaciones terrenas cuyas funciones y ubicación son descritas a continuación:

1. Bamari, Edo. Guarico: Estación principal encargada de concentrar el sistema de telemetría y control del satélite y el telepuerto principal de servicios del Estado.
2. Luepa, Edo. Bolívar: Estación de respaldo del sistema de telemetría y control.
3. San Tomé, Edo. Anzoátegui: Estación de respaldo del telepuerto de servicios del Estado.

La responsabilidad de la operación de los sistemas de telemetría y control estará a cargo de la Asociación Bolivariana para Actividades Aeroespaciales (ABAE), antiguamente llamado Centro Espacial Venezolano (CEV), mientras que CANTV estará a cargo de manejar los servicios y administrar la carga útil del satélite (ancho de banda del satélite).

Este trabajo de grado estará enfocado en el dimensionamiento de la estación de respaldo de servicios, el cual tiene las siguientes funciones:

- Converger la información de datos desde la red terrestre en el telepuerto y en el enlace ascendente hasta el satélite.
- Recibir las señales del satélite para su distribución en la red terrestre, proveer la capacidad necesaria para los canales del satélite.
- Compartir la plataforma satelital con los usuarios (proveedores de servicios, etc...).
- Fungir como telepuerto espejo de los servicios a ser prestados por el telepuerto principal.

Reseña histórica de CANTV

El Teléfono y sus Inicios:

Alexander Graham Bell, inventor de origen inglés y nacionalizado Estadounidense (1847 – 1922) inventó en 1874 las primeras ideas que dieron origen al teléfono y fueron probadas con éxito el 10 de marzo de 1876. En aquel año, usaban un único dispositivo como transmisor y receptor llamado Transmisor de Bell por el cual la voz era reproducida muy débilmente.

Trayectoria de CANTV: El Teléfono en Venezuela

En 1856, el ingeniero español Manuel de Montúfar inaugura la primera línea del telégrafo entre Caracas y La Guaira.

En 1881, Borges, hombre de vastos conocimientos en electricidad, física y química, trae al país los tres primeros aparatos de teléfonos.

El 24 de junio del siguiente año, se realizan las pruebas utilizando las líneas telegráficas entre Caracas y La Guaira.

En 1884, se instalan los primeros tres teléfonos en Caracas ubicados en:

- La Casa Amarilla (Presidencial).
- La Universidad Central.

En 1912, el servicio telefónico se había extendido por casi todo el país y ya existían 5.900 líneas, 4.509 aparatos y 219 compañías explotadoras del servicio.

El 19 de febrero de 1920, se inaugura en Maracay, estado Aragua, el primer servicio de radiotelégrafo y con él la telegrafía inalámbrica en el territorio nacional.

Igualmente el 11 de abril de 1930, Félix Guerrero, Manuel Pérez Abascal y Alfredo Damiron con un capital de 500.000 bolívares fundan CANTV. La empresa se registró como Sociedad Anónima, sólo podía funcionar en calidad de concesionaria y comenzó sus operaciones el 20 de junio de ese mismo año.

En 1940, se promulga una Ley de Telecomunicaciones que le asigna al Poder Ejecutivo, la Administración de los servicios telefónicos.

El Estado a través del Ministerio de Transporte y Comunicaciones inicia una competencia con CANTV en 1946 y es así como crea su propio sistema de Telégrafo, Teléfono y Télex.

En el año 1950, existían en el país 48.529 líneas telefónicas y funcionaban 50 emisoras de radio.

Para 1953, el Estado adquiere la totalidad de las acciones de CANTV por un monto de 29.900.911 bolívares. En 1965, con la Ley de Reorganización, se le concede a esta empresa el derecho de operar los servicios de comunicaciones en Venezuela. Durante 25 años a partir de dicha fecha, CANTV se convertiría en instrumento del Estado para el desarrollo de los servicios de telecomunicaciones del país. En 1967, el Ministerio de Transporte y Comunicaciones le otorga a CANTV el derecho exclusivo para explotar los servicios de Telecomunicaciones.

El 29 de noviembre de 1970 se inaugura la estación Rastreadora Camatagua y en el año 1975 se constituye la filial C.A., Venezolana de Guías llamada CAVEGUÍAS. Finalmente, se nacionalizan las empresas privadas de teléfonos del país y en 1974 CANTV se transforma en un monopolio.

En la década de los 80 se estiman la diversificación de los servicios, se extiende la telefonía rural y se elaboran ambiciosos programas de modernización para elevar de 6 a 12 teléfonos por cada 100 habitantes, lo cual no fue posible.

Durante 61 años CANTV formó parte de la lista de empresas del Estado venezolano. Esta situación cambia en 1991, cuando surge la necesidad de privatizar la compañía en medio de un programa de ajustes para enfrentar la situación de estancamiento y deterioro de diversas actividades estatales. De esta forma el 40% de las acciones ordinarias de la empresa son vendidas a Venworld Telecom, C.A., una

compañía organizada bajo las leyes de la República de Venezuela y establecida por un consorcio particular de compañías dirigidas por GTE Corporation con 51% de las acciones, Telefónica Internacional de España con 16%, Compañía Anónima La Electricidad de Caracas con 16%, Consorcio Mercantil CIMA con 12% y AT&T Internacional INC con 5%.

Los estatutos sociales de la empresa otorgan al Consorcio Venworld Telecom C.A. el control operativo de la empresa, logrando GTE convertirse en el accionista mayor de las acciones Clase A. Es así como Venworld obtuvo el control operativo de la Compañía, bajo los términos del Contrato de Concesión suscrito con la República de Venezuela.

Este mismo año se rompe con el monopolio que la empresa poseía en el mercado de telecomunicaciones de Venezuela, con la apertura parcial del sector en el área de redes de datos. Para este momento, también se crea la Comisión Nacional de Telecomunicaciones en Venezuela (CONATEL), organismo estatal rector de este sector económico. A partir de entonces, CANTV debe regir su actuación respetando los lineamientos dictados por el mismo.

En 1991, se privatiza CANTV por la suma de 1.885 millones de dólares. En 1996 la compañía confirmó su carácter privado con la colocación del 34,8% de las acciones del Fondo de Inversiones de Venezuela, en oferta pública en las principales bolsas de valores del mundo. La venta de estas acciones fue recibida de manera entusiasta en Venezuela, logrando concentrar a más de 100.000 nuevos accionistas.

Según el informe Anual de CANTV (1997), la composición accionaria de la corporación es la siguiente: Consorcio Internacional Venworld Telecom, C.A. con 40% de las acciones ordinarias; inversionistas privados nacionales y extranjeros con el 35,29%; empleados de CANTV en Fideicomiso con el 10,52% y el Fondo de Inversiones de Venezuela con el 14,19%.

CANTV tiene tres empresas filiales, que ofrecen a sus clientes servicios de valor agregado:

- Movilnet, C.A: Servicios de telefonía celular y datos inalámbricos.

- CANTV Servicios: Provee el acceso a Internet y servicios de valor agregado.
- Caveguías C.A: Presta el servicio de publicación de guías telefónicas.

A partir de 1997 CANTV inicia un proceso de transformación de la organización y su gente, orientado a aumentar la lealtad y la satisfacción de los clientes así como mejorar la calidad de los servicios ofrecidos. En 1998, se reestructura la empresa y entran en funcionamiento las Unidades de Negocios, encargadas de establecer estrategias competitivas para cada uno de los segmentos del mercado, y así poder enfrentar la competencia que se abre totalmente en el año 2000 con la apertura en telefonía básica.

La concesión contempla un período inicial de 35 años sujeto a una extensión adicional de 20 años, de acuerdo a la aprobación del Ministerio de Transporte y Comunicaciones. Los términos de la concesión establecen que CANTV es el proveedor exclusivo de servicios de comunicación locales, de larga distancia nacional e internacional hasta noviembre del año 2000.

Paralelamente, la empresa se compromete a cumplir con metas de expansión y mejoramiento del servicio, cuyo seguimiento es efectuado por el organismo regulador del sector CONATEL (Comisión Nacional de Telecomunicaciones).

En 2007, CANTV es nacionalizada nuevamente por el estado venezolano, condición en la que permanece hasta la actualidad.

Reseña histórica de los satélites [1], [25]

Luego de finalizada la segunda guerra mundial en 1945, el escritor de ciencia ficción Arthur C. Clarke publicó en la revista Wireless World, un artículo llamado “Extra-Terrestrial Relays”, en el cual incluía una propuesta de un sistema de comunicación global, utilizando 3 repetidores separados 120° entre sí, a una distancia de 36000Km de la tierra. Esta idea empezó a concretarse con el desarrollo del primer satélite artificial: el Sputnik, el cual fue lanzado en octubre de 1957 y contenía un radio faro que emitía señales en el orden de los 20 y 40 Mhz.

Años después, el satélite COURIER fue puesto en órbita por el departamento de defensa de los Estados Unidos, y puede ser considerado hoy en día, como el

primer repetidor totalmente activo. Este dispositivo transmitía conversaciones y telegrafía; y aunque fue el primero en usar celdas solares, su duración en servicio fue de solo 70 días.

En febrero de 1963 la NASA lanzó el primer satélite de órbita geoestacionaria, el SYNCOM 3 y fue a través de este, que se transmitieron los juegos olímpicos de 1964.

Un año más tarde, es puesto en órbita el “Early Bird”, primer satélite de INTELSAT, consorcio formado por una gran cantidad de países a nivel mundial. Este satélite contaba con 240 circuitos telefónicos y estuvo en servicio durante cuatro años; actualmente INTELSAT cuenta con 32 satélites en órbita.

Para este mismo año, se desarrolló la primera red satelital doméstica a través del sistema ruso llamado MOLNIYA (relámpago), el cual consistía en una serie de 4 satélites en órbitas elípticas con los cuales, se podía mantener cubierto el territorio soviético en su totalidad.

El 29 de Noviembre de 1970, CANTV se incorpora al mundo de las telecomunicaciones satelitales con la puesta en funcionamiento la Estación Terrena Satelital “Andrés Bello”, ubicada en Camatagua, Estado Aragua, y desde entonces los servicios satelitales forman parte importante de la red de telecomunicaciones operada por la empresa.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS

1.1 Antecedentes

Los servicios satelitales que se han prestado en el país hasta la actualidad, han sido brindados mediante el alquiler de transpondedores en satélites pertenecientes a compañías extranjeras (INTELSAT, PANAMSAT); lo que se ha traducido en costos muy altos para las operadoras locales y en el compromiso de las comunicaciones de la Nación hechas por esta vía. Esta situación ha creado una dependencia con estas empresas debiendo amoldarnos a sus tarifas y disponibilidad lo que ha sido de alguna manera, un obstáculo para llevar las telecomunicaciones a aquellos lugares de difícil acceso a través de redes convencionales.

1.2 Justificación

Con la construcción de las nuevas estaciones terrenas para el satélite Simón Bolívar, Venezuela incursionará en el desarrollo de una plataforma espacial integral, diseñada especialmente para trabajar en conjunto. Específicamente, la construcción de la estación de respaldo de servicios, garantizará una continuidad en la prestación de los mismos y constituirá una inversión necesaria para asegurar la rigidez del sistema ante cualquier tipo de falla; dada la visión de CANTV como único prestador de servicios de telecomunicaciones del estado y teniendo el reto de convertirse en un operador satelital serio y confiable.

1.3 Planteamiento del problema

Una vez puesto en órbita el satélite Simón Bolívar, CANTV necesitará tener completamente dimensionada una estación de respaldo de servicios, que pueda cumplir en su totalidad con las funciones desempeñadas por la estación principal y otros servicios que no puedan ser prestados por esta última. Esto con miras a

mantener la continuidad del servicio intacta, en caso de que ocurriese una falla en el sistema principal.

1.4 Objetivos

Objetivo general

Dimensionar y diseñar una propuesta de la estación de respaldo de servicios para operación del satélite Simón Bolívar, buscando garantizar la continuidad permanente del servicio en caso de fallas del sistema principal.

Objetivos específicos

- Determinar los servicios que serán canalizados por esta base terrena, para cada una de las bandas de frecuencia que manejará la misma: C, Ku y Ka.
- Proponer equipos de telecomunicaciones a utilizar, en la base terrena de respaldo.
- Realizar algunos cálculos específicos que pudieran garantizar el mejor desempeño en cuanto a: ancho de banda, potencia, antenas y amplificadores.
- Elaborar un informe final que sirva tentativamente como guía para la implementación definitiva de esta estación, con las recomendaciones a que diera lugar.

1.5 Metodología

Fase 1: Estudios Preliminares

Se analizaron las plataformas y equipos satelitales ya existentes en el país, mediante los cuales se han canalizado los servicios prestados por otros operadores satelitales hasta ahora. Así mismo, se realizó un estudio mediante la recopilación de información sobre el funcionamiento y diseño, tanto de enlaces satelitales, como de estaciones terrenas para este tipo de sistemas. Luego se investigó acerca de los servicios específicos que se brindarán a través de esta nueva plataforma, las tecnologías disponibles en la actualidad que pudieran adaptarse a estos servicios y se determinó las ventajas y desventajas que ofrecían cada una de las bandas de frecuencias de trabajo.

Para realizar esta primera fase y obtener la información requerida para el cumplimiento de la misma, se contó con un computador con acceso a internet, material bibliográfico, información técnica y especializada aportada por CANTV y consultas con personal calificado en el tema.

Fase 2: Realización de cálculos y análisis

Se estudiaron las características y especificaciones técnicas de los fabricantes de equipos que más se relacionaran con el proyecto, considerando la eficiencia y el costo de los mismos. Además, se estimó la distribución más adecuada de servicios, a través de cada una de las bandas de frecuencias a usar. Para la selección de los equipos de telecomunicaciones que se propusieron, se tomaron en cuenta los siguientes aspectos: asignación de espacios físicos, cálculo del tamaño de las antenas, amplificadores, equipos transmisores y receptores y estimación económica. De igual manera, se realizaron cálculos referentes al enlace satelital.

Una vez recopilada y organizada, la información obtenida en la fase 1, se comenzaron a realizar los cálculos necesarios, para ir determinando cuales serían las soluciones más convenientes. Para esto, se contó con un computador equipado con paquetes matemáticos, acceso a internet y supervisión del personal de CANTV.

Fase 3: Propuesta y revisión del diseño

Luego de los estudios realizados en la fase 1 y de los cálculos y análisis obtenidos en la fase 2, se planteó un diseño tentativo para la estación de respaldo de servicios, el cual fue revisado tanto por el personal de CANTV, como por el tutor universitario. En esta fase se hicieron comparaciones del diseño obtenido, con otros sistemas satelitales implementados en la actualidad en nuestro país y se determinó la viabilidad de la propuesta.

Fase 4: Validación de los procedimientos propuestos

Luego de la evaluación del diseño propuesto en la fase 3, se atendieron las recomendaciones hechas por el personal de CANTV y por el tutor universitario, para

así realizar los ajustes necesarios. Luego de las validaciones finales se comenzó la redacción del informe definitivo el cual fue desarrollado y presentado en la siguiente fase.

Fase 5: Elaboración del informe final

Es la presentación final del estudio, basado en los resultados obtenidos en las fases anteriores.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Comunicaciones satelitales [1], [25]

2.1.1 Órbitas de los satélites

Las propiedades fundamentales de las órbitas, son resumidas por las tres leyes del movimiento planetario de Kepler, quien fue un físico que desarrolló sus estudios durante el siglo XVII. Estas leyes fueron descubiertas empíricamente, ya que Kepler se basó en notas hechas durante extensas observaciones al planeta Marte y logró con esto establecer el movimiento planetario con respecto al sol. Debido a que la dinámica de un satélite con respecto a la tierra, es similar a la de los planetas con respecto al sol, las leyes de Kepler son aplicables también para órbitas satelitales.

Leyes de Kepler:

1. La órbita de cada planeta (satélite) es una elipse con el sol (tierra) en uno de sus focos. El punto de la órbita en el cual el planeta está mas cerca del sol se denomina *perigeo*, y el punto donde está más lejos del sol se le denomina *apogeo*.
2. La línea que une al sol (tierra) a el planeta (satélite) barre áreas iguales en tiempos iguales.
3. El cuadrado del periodo de revolución es proporcional al cubo de su eje mayor.

2.1.2 Tipos de órbitas satelitales

Existen varios tipos de órbitas para los satélites artificiales, las cuales se clasifican de acuerdo a: su distancia de la tierra, su plano orbital con respecto al ecuador y la trayectoria orbital que describen; esto se ve con detalle en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Tipos de órbitas satelitales

Tipo de órbita	Distancia (Km)	Velocidad del satélite (Km/h)	Funciones	Características
LEO (Órbita Terrestre Baja)	250 - 1.500	25.500 - 28.000	Comunicaciones Observaciones de la tierra	Poco retraso en las comunicaciones. Menor requerimiento de potencia que GEO
MEO (Órbita Terrestre Media)	1.500 - 30.000	12.000 - 25.500	Navegación GPS	Normalmente opera a una altura cercana a los 10.000Km
GEO (Órbita Terrestre Geosincrónica)	36000 sobre el ecuador	11.000	Comunicaciones Clima Navegación GPS	Posición constante en el cielo ya que giran a la misma velocidad angular del planeta
Polar	500 - 800 sobre el eje polar	26.600 - 27.300	Clima Navegación	Satélites LEO con órbita perpendicular a la línea del Ecuador
Elíptica	Perigeo: 200 - 1.000 Apogeo: 39.000	Perigeo: 34.200 Apogeo: 5.400	Comunicaciones	Prestan servicio a grandes latitudes

2.1.3 Estructura de un satélite

Los satélites cargados con numerosos elementos electrónicos muy delicados, deben ser capaces de funcionar en el ambiente hostil que representa el espacio: temperaturas que fluctúan entre -200°C en sombra y 200°C a la luz del sol, campos magnéticos, vientos solares, etc; además de resistir todo el proceso de lanzamiento y puesta en órbita.

Los satélites han ido evolucionando a lo largo del tiempo; sin embargo su estructura básica así como la mayor parte de sus elementos, sigue siendo la misma. El avance de la tecnología ha proporcionado instrumentos más precisos, sistemas de provisión de energía eléctrica más potentes y componentes de menor peso; pero en esencia estos, no han cambiado mucho.

La estructura de un satélite puede resumirse en dos elementos principales: la plataforma y la carga útil.

2.1.3.1 Plataforma

Es una estructura encargada de orientar en la dirección correcta, proteger, suministrar energía a la carga útil del satélite, para que esta pueda realizar correctamente sus funciones. Para lograr esto, la plataforma posee los siguientes elementos conocidos como subsistemas y los cuales son descritos a continuación:

Subsistema de estructura: Es la estructura que sustenta y protege a todos los demás elementos del satélite y está construido con metales ligeros y muy resistentes.

Subsistema de propulsión: Compuesto por múltiples motores o impulsores de bajo empuje, que sirven al satélite para realizar pequeñas correcciones y cambios de velocidad para controlar su orientación en el espacio y proporcionar el control adecuado de los parámetros de la órbita.

Subsistema de control de orientación: Se encarga de monitorear el funcionamiento de los sistemas del satélite así como la posición y velocidad del mismo. Además orienta los paneles solares hacia el sol, sin importar como esté posicionado el satélite.

Subsistema de potencia: Es la estructura responsable de suministrar energía a los sistemas del satélite. La fuente primaria de energía la constituyen las celdas solares mientras que las baterías se encargan de el suministro de energía secundario.

Subsistema de telemetría: Es el encargado de hacer contacto con las estaciones terrenas con el fin de recibir órdenes y darles seguimiento. Esto permite el correcto mantenimiento de los subsistemas del satélite.

2.1.3.2 Carga Útil

Es el módulo en el cual están instalados los instrumentos que justifican la misión espacial, algunos de estos pueden ser: cámaras, telescopios, detectores sensibles a fenómenos atmosféricos, antenas, amplificadores, transpondedores, etc...

Un transpondedor está formado por un filtro de entrada que selecciona la frecuencia a amplificar, un controlador de ganancia y su respectiva fuente de alimentación. La función de estos dispositivos, es recibir la señal desde la tierra a

través de antenas y receptores, amplificarla y enviarla al destinatario. Una explicación más detallada de los transpondedores será expuesta más adelante.

2.1.4 Satélites de comunicaciones

Son satélites cuya función es transmitir informaciones entre distintos puntos en la tierra: comunicaciones telefónicas, programas de televisión, datos, internet, etc... “Dado que no hay problema de visión directa se suelen utilizar frecuencias elevadas en el rango de los Ghz que son más inmunes a las interferencias; además la elevada direccionalidad de las ondas a estas frecuencias permite alumbrar zonas concretas de la tierra.”[1]

2.1.5 Transmisores y amplificadores en el satélite

Uno de los elementos claves en cualquier transpondedor espacial es el transmisor de salida, el cual consiste en un HPA y su correspondiente fuente de energía. El amplificador es operado en zona de saturación o cerca de esta (máxima potencia de salida) para lograr una alta eficiencia en convertir la energía DC proveniente de las fuentes, en energía RF útil para transmitir la información. El transmisor es requerido para amplificar la señal deseada sin distorsiones y sin otras atenuaciones que pudieran disminuir la utilidad de la señal. Dos tipos de amplificadores son usados, los TWTA y los SSPA; para los primeros se requiere una fuente de energía que sea capaz de suministrar voltajes bastante altos (por el orden de los 1.5 KVA), lo que significa un reto en cuanto a tecnología y diseño.

Para bajas frecuencias y aplicaciones donde se requiere poca potencia, los SSPAs son usados a menudo como el amplificador final en el transpondedor espacial. Los amplificadores para usos en los satélites, han sido desarrollados desde la banda L hasta la banda Ka. Las eficiencias son cercanas al 30%, tendiendo a incrementarse con la disminución de la frecuencia.

2.1.6 Estructura de una estación terrena

En un sistema satelital se requiere de estaciones terrenas, tanto para los enlaces de subida como para los de bajada; estas están compuestas básicamente por cuatro segmentos. “El primero es un modulador de FI, le sigue un convertidor elevador de frecuencias de FI a microondas RF. En tercer lugar, se encuentra un amplificador de alta potencia (HPA) para transmisión y un amplificador de bajo ruido (LNA) para recepción” [2]. La última etapa está conformada por las antenas. En la figura 2.1 se muestra un diagrama donde se puede apreciar la distribución de las etapas aquí mencionadas:

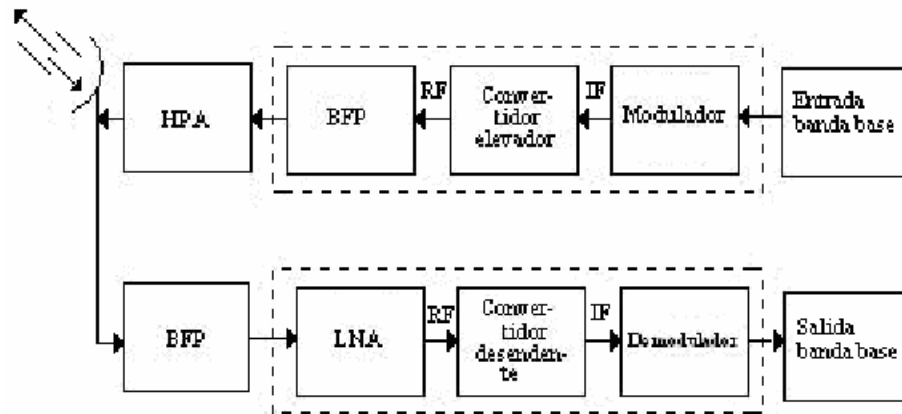


Figura 2.1 Modelo básico de una estación terrena en Tx y Rx. [2]

2.1.6.1 Enlace de subida

Consiste en llevar una señal banda base entrante a una frecuencia intermedia IF, mediante modulaciones del tipo: FM, PSK y QAM. Luego viene el convertidor elevador, el cual está constituido por un mezclador y un filtro pasabandas, el cual convertirá la señal IF en RF. Por último la señal pasará a través de un amplificador de potencia HPA, el cual le dará a la misma la potencia suficiente, para que llegue al satélite. En la figura 2.2 se presenta el esquema de una estación terrena transmisora:

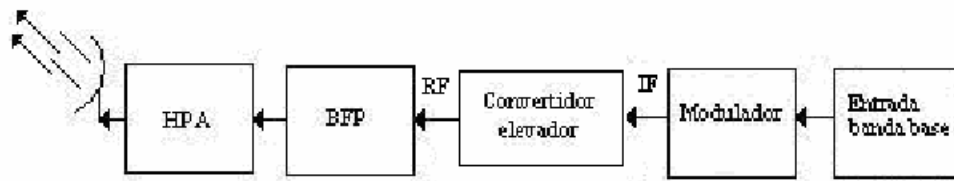


Figura 2.2 Modelo básico de transmisión para una estación terrena. [2]

2.1.6.2 Enlace de bajada

La señal entra a través de la antena receptora, es pasada en primer lugar por un filtro pasa banda (BFP), el cual limita la potencia de entrada que recibe el LNA. Una vez amplificada la señal en bajo ruido, esta es transformada de RF a IF por medio de un convertidor descendente. Por último se procede a demodular para obtener una señal en banda base. En la figura 2.3 se muestra el esquema de una estación terrena receptora.

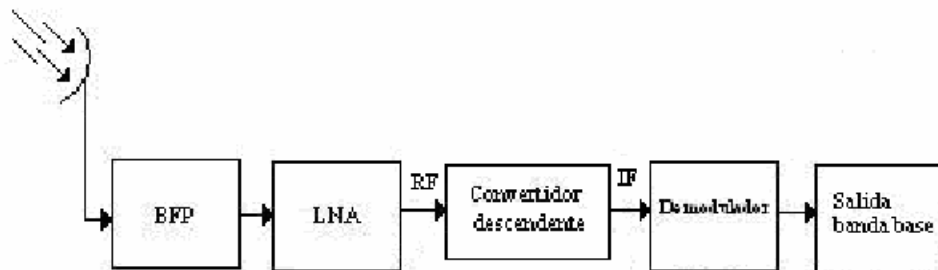


Figura 2.3 Modelo básico de bajada para una estación terrena. [2]

2.2 Sistemas VSAT (Very Small Aperture Terminal)

El término VSAT se refiere a una estación terrena fija y de pequeño tamaño, que provee un enlace de acceso a una red satelital de comunicaciones, la cual es capaz de soportar voz, datos y video. Los satélites que conforman esta red, son de órbita geoestacionaria.

Las configuraciones de red posibles para estos sistemas, son:

- Tipo malla: Cuando la comunicación se realiza desde una estación terrena, hacia otras similares, a través del satélite.
- Tipo estrella: Cuando la comunicación entre las estaciones terrenas se realiza a través desde un Hub principal. En este tipo de configuración, el Hub o concentrador (proveedor de servicios), posee una o varias antenas de mayor tamaño y tiene la capacidad de manejar un gran número de terminales terrenas más pequeñas (clientes).

Los subsistemas utilizados tanto en el hub como en las VSATs son descritos a continuación:

2.2.1. Antena

“El mayor objetivo en el diseño de una antena, es alcanzar una alta eficiencia y una alta ganancia en dirección del satélite; pero con bajos niveles de radiación en otras direcciones. Esto se traduce en un haz principal con una gran concentración de potencia, en comparación a los lóbulos laterales.” [3]

El subsistema de la antena abarca un reflector y un alimentador (feedhorn) y puede operar en las bandas C, Ku y Ka. El reflector es una superficie metálica formada por un paraboloide de revolución, generalmente truncado dentro de un borde circular que determina el diámetro de la antena. Este paraboloide posee un punto focal distintivo, en donde una fuente puntual de luz en este foco, produce un rayo de luz paralelo y alineado con el eje de revolución; esto ocurre gracias a las propiedades reflectoras de las parábolas. Por su parte, el alimentador está sujeto al marco de la antena, mediante soportes que lo mantienen en el punto focal de la misma y se encarga tanto de dirigir la potencia de transmisión hacia el plato de la antena, como de recoger la potencia recibida, igualmente a través del plato (ver figuras 2.4 y 2.5). El alimentador funciona en conjunto con los siguientes elementos: LNA, HPA, Down converter y Low converter. Las características específicas de cada uno de estos dispositivos serán explicadas con detalle más adelante.

En los enlaces que usan polarización lineal, el sistema de la antena se debe poder rotar, para lograr que el alimentador permanezca alineado con el satélite en la posición correcta, tanto en transmisión como en recepción.

Cuando la polarización es lineal en la banda Ka, a diferencia de la banda C y Ku, las técnicas usadas para mantener el alineamiento deseado son un poco más complejas.



Figura 2.4 Posición del alimentador en una antena terrestre

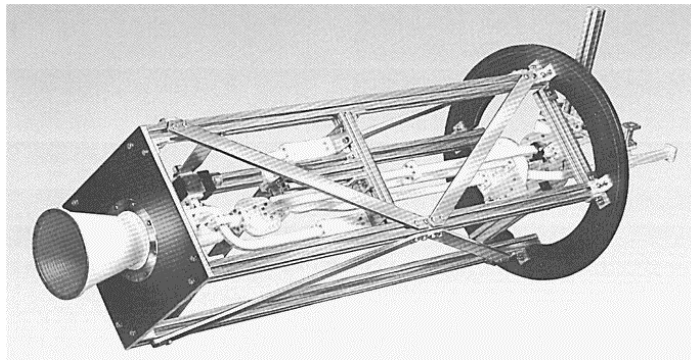


Figura 2.5 Alimentador con su sistema asociado. [4]

2.2.1.2 Polarización cruzada y discriminación de la polarización

La onda radiada por una antena está formada por un componente de campo eléctrico y otro de campo magnético, los cuales son ortogonales entre sí, perpendiculares a la dirección de propagación de la onda y variables en el tiempo. La polarización de una onda electromagnética radiada, es la curva trazada por el punto final del vector del campo eléctrico instantáneo, observada a lo largo de la dirección de propagación; esta polarización puede ser lineal, circular o elíptica.

“Para doblar la cantidad de información manejada por un satélite, se usa el método de re-uso de frecuencia, el cual consiste en transmitir dos señales en la misma banda de frecuencia (co-canal), poniendo cada una en polarizaciones ortogonales. La antena es caracterizada para una polarización dada, por un patrón de radiación para polarización nominal (co-polares) y un patrón de radiación para polarización ortogonal (cross polar). En el eje de la antena, la discriminación de polarización cruzada es máxima y se va degradando para otras direcciones distintas a la de máxima ganancia.” [3]

La interferencia cross polar (XPI) se conoce como la razón de discriminación de polarización cruzada entre las señales co-polar y cross polar, especialmente en el haz principal de la antena. Este parámetro es de gran importancia, para determinar la calidad de los sistemas satelitales con re-uso de frecuencia a través de polarización dual.

2.2.1.3 Temperatura de ruido de la antena (T_{ant})

En las comunicaciones satelitales, el ruido causado por la energía térmica tanto del suelo como de la atmósfera, es recibido a través de los lóbulos laterales de la antena, lo que degrada el desempeño total de la banda recibida. Este parámetro está dado en °K, depende del ángulo de elevación de la antena (θ) y es proporcionado por el fabricante.

2.2.1.4 Configuraciones típicas de antenas para sistemas VSAT

Las antenas a utilizar en sistemas VSAT, tienen por lo general, una diámetro que está comprendido entre 0,8 y 3,4 metros en los terminales de los clientes y alcanzando hasta 13 metros en los hubs. Los reflectores parabólicos son los más usados, tanto en configuraciones Axis-simétrica como en Offset (asimétricas).

2.2.1.4.1 Antenas Parabólicas Axis-Simétricas (Foco Primario)

“Conceptualmente, este tipo de antenas representan la configuración más simple posible y es capaz de satisfacer las especificaciones en RF para estaciones terrenas.” [5]. El nombre de Axis-simétrica viene dado ya que el centro del reflector parabólico está alineado con el alimentador (ver figura 2.6). El desempeño, en términos de eficiencia y envolvente de los lóbulos laterales, especialmente para antenas cuyos diámetros son pequeños en comparación a la longitud de onda, se reduce por la obstrucción de la apertura de la antena, debido a la localización central del alimentador. Este tipo de antenas son usadas generalmente en grandes estaciones terrenas (Hubs), debido a su geometría, simplicidad mecánica y bajos costos relativos. La eficiencia de las mismas están alrededor de 65% y la atenuación de los lóbulos laterales disminuyen a -30dB con respecto al pico de máxima ganancia.

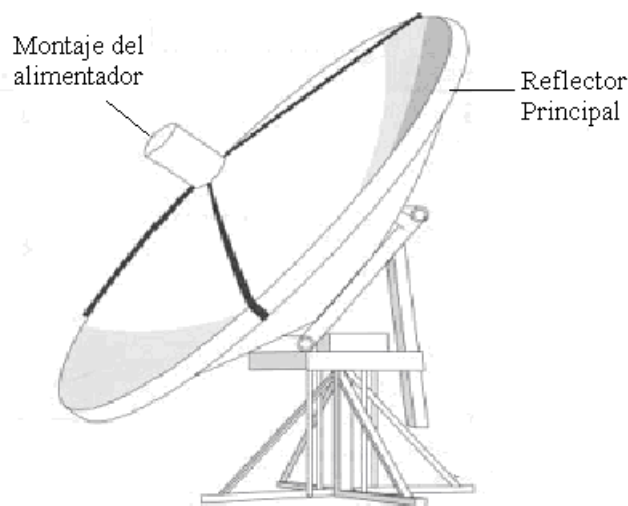


Figura 2.6 Antena axis-simétrica

2.2.1.4.2 Antenas Asimétricas (Offset)

Para aplicaciones en antenas de pequeña apertura, este tipo de configuración es muy recomendada, debido a las ventajas electrónicas que ofrece. Su principal característica es que el foco no está situado en el centro de la antena, sino en la parte baja de ésta. Además, como ya no hay una obstrucción de la apertura de la antena por parte de la bocina de alimentación, se logra una mejora en la eficiencia y el desempeño de los lóbulos laterales. “Las eficiencias logradas pueden llegar al 85%, mientras que los niveles de los lóbulos laterales, al igual que en las antenas axis-simétricas, pueden estar hasta 30 dB por debajo del pico de ganancia del haz principal” [5]. Esta configuración puede observarse en la figura 2.7. La desventaja más notoria de estas antenas es que la asimetría de la iluminación de la apertura lleva a un gran lóbulo cross polar en polarización lineal.

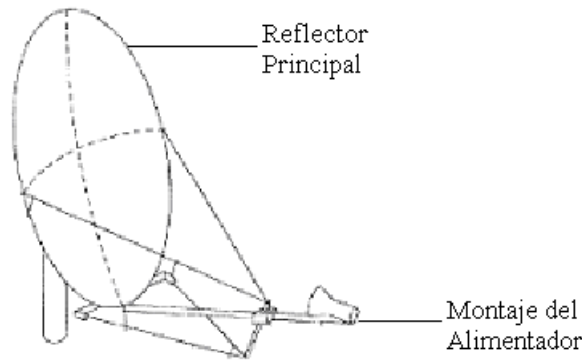


Figura 2.7 Antena asimétrica. [10]

2.2.1.4.3 Cassegrain

Es una antena de tipo axis-simétrica, en la cual el alimentador se ubica sobre o cerca de un reflector principal cóncavo y es apuntado hacia un reflector secundario convexo, donde ambos reflectores tienen un punto focal común (Ver figura 2.8). La energía proveniente del feedhorn “ilumina” al reflector secundario, el cual refleja esta energía de vuelta hacia el reflector principal, formándose así el haz deseado; esto en modo de transmisión. Para el caso de recepción, la onda es recibida en el

reflector principal, para ser reflejada hacia el dispositivo detector a través del reflector secundario.

Ventajas:

- El alimentador se apoya fácilmente y la antena es geométricamente más compacta.
- Proporciona pérdidas mínimas mientras el receptor puede colocarse directamente cerca de la bocina de alimentación.

Desventajas:

- El reflector y las barras que lo sujetan, representan una obstrucción para los rayos que provienen desde el reflector primario, en la dirección de máxima efectividad.

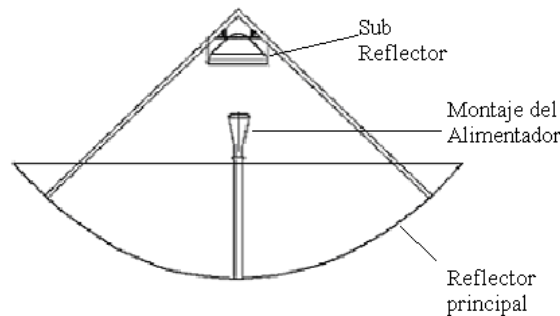


Figura 2.8 Antena tipo Cassegrain

2.2.1.4.4 Gregorian

“Ésta es una versión de la antena Off set que utiliza un reflector secundario para reducir el tamaño del brazo que sostiene el LNB y poder mantener el feed fuera de la apertura principal” [5] (ver figura 2.9). El desempeño en RF, similar que para las antenas axis-simétricas simples, es limitado por el bloqueo de la apertura debido a la posición en la que se encuentra el subreflector.

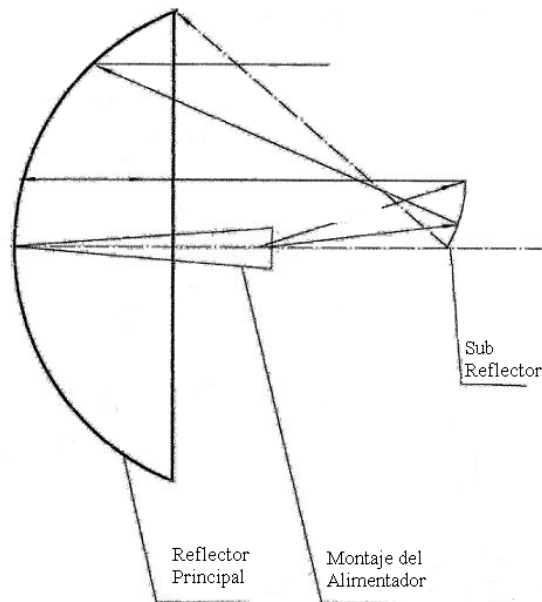


Figura 2.9 Antena de tipo Gregorian

2.2.2 LNB (Low Noise Block Downconverter)

Este dispositivo tiene como función, recibir señales de microondas de muy baja intensidad de potencia provenientes del satélite, amplificarlas, llevarlas a una banda de frecuencia menor (IF) y enviarlas hacia el resto del sistema receptor. “En estas frecuencias más bajas, las señales viajan a través de los cables con menor atenuación. Además es más sencillo y económico, diseñar circuitos electrónicos que operen a estas bajas frecuencias, en comparación a las altas frecuencias que se manejan en la transmisión satelital “[6]. El LNB está formado por un LNA (Low Noise Amplifier) y un LNC (Low Noise Converter), cuyas funciones serán explicadas más adelante con detalle. Una configuración sencilla de un LNB se puede observar en la figura 2.10:

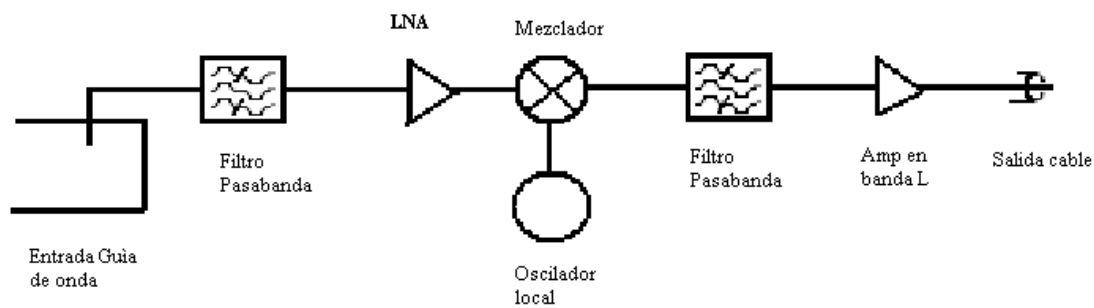


Figura 2.10 Diagrama de un Low Noise Block. [6]

En el diagrama de la figura 2.10 se puede observar la guía de onda en la entrada, conectada al alimentador. La señal satelital circula a través de un filtro pasa banda, que solo permite pasar una banda determinada de frecuencias de microondas. Luego de esto, las señales son amplificadas en un LNA (Low Noise Amplifier) y luego enviadas a un mezclador, donde un oscilador genera una amplia gama de señales en la salida. Esto ocurre debido a las sumas, restas y productos que se dan entre la señal de entrada y la señal del oscilador.

Entre estas señales de salida, las de interés son aquellas que representan la diferencia entre la frecuencia del oscilador y las frecuencias de la señal de entrada; el siguiente filtro solo permite el paso de estas frecuencias mencionadas y las envía hacia el amplificador de banda L (entre 1,5 y 2,4 Ghz).

2.2.2.1 LNA (Low Noise Amplifier)

Son amplificadores usados en sistemas de comunicación para incrementar la potencia en señales de entrada muy débiles provenientes de las antenas. Debido a que a frecuencias de microondas las atenuaciones a través de los medios guiados son importantes, el LNA es generalmente colocado muy cerca de la antena receptora. Es necesario, que el LNA eleve el nivel de la señal deseada, mientras agregue la mínima cantidad ruido y distorsión posibles; esto para que dicha señal pueda ser regenerada en las etapas posteriores.

2.2.2.2 LNC (Low Noise Conveter)

Es un dispositivo que recibe señales a frecuencias por el orden de los Ghzs desde el LNA y las lleva a frecuencias intermedias (70 – 140 Mhz) o a banda L (entre 1,5 y 2,4 Ghz).

2.2.3. HPA (High Power Amplifiers)

Este tipo de amplificador de alta potencia se encuentra en la etapa de transmisión tanto del satélite, como de las estaciones terrenas. Existen varias versiones de HPAs, dependiendo de la potencia radiada y de otros factores. Los hay de estado sólido, los SSPA (Solid State Power Amplifier), o de Tubos de Vacío, los TWTA (Travelling Wave Tube Amplifiers). Los SSPAs generalmente se usan para potencias bajas y los TWTs se utilizan para potencias muy altas.

2.2.3.1 TWTA (Travelling Wave Tube Amplifiers) [5]

Es un dispositivo electrónico usado para amplificar señales RF, el cual combina una gran potencia de salida y una alta eficiencia entre ganancia y ancho de banda; características que no son logradas por ningún otro dispositivo en el rango de las microondas. Un TWTA está formado por un TWT, un circuito de protección y una fuente regulada de poder.

Idealmente, el TWT debería producir en su salida, una replica exacta amplificada de la señal RF aplicada a su entrada.

2.2.3.1.1 Características RF Entrada/Salida [5]

El TWT es un amplificador lineal en su región de amplificación a pequeña señal, con ganancias que van desde los 35dB hasta los 60dB. Cuando se está cerca del valor de potencia de salida, el tubo empieza a comportarse de una manera no lineal y un incremento de 1dB en la entrada produce un aumento menor a este valor en la salida. Esta compresión en la amplificación continúa hasta el punto en el que cualquier incremento en la entrada no produzca ningún cambio en la salida, llegando a la llamada Zona de Saturación.

2.2.3.1.2 Consideración en la aplicación de los TWTAs [5]

Los TWTs y sus fuentes de poder asociadas, son relativamente delicados cuando se operan más allá de los límites de diseño, tomando en cuenta que en sistemas VSAT, estos dispositivos se encuentran casi siempre al aire libre en condiciones hostiles. La mayoría de los problemas ocurre más a menudo en las fuentes de poder.

2.2.3.1.3 Consideraciones de diseño para TWTAs en VSATs [5]

“El desarrollo de los GaAsFETs (Transistores de efecto de Campo de Gallium y Arsenide), capaces de amplificar potencia en frecuencias de microondas, supuso en un principio que los TWTAs no tendrían participación en las VSATs, ya que los requerimientos de PIRE para las mismas eran bajos y podían ser alcanzados por los SSPAs (Solid State Power Amplifier).; pero con limitaciones de potencia” [5]. Los fabricantes de TWTAs empezaron a desarrollar productos diseñados específicamente para trabajar en sistemas VSAT, esto con el objetivo de superar los límites de potencia antes descritos y lograr un mejor desempeño.

2.2.3.2 SSPAs (Solid State Power Amplifiers) [5]

Este tipo de amplificadores son bastante confiables, ya que requieren fuentes de baja tensión y pueden funcionar cerca de la saturación con buen desempeño en cuanto a distorsión de intermodulación. Están formados por elementos de estado sólido lo que hace que su potencia sea más limitada que la de los TWTAs.

2.2.3.3 Comparación entre TWTAs y SSPAs [5]

Existen una gran cantidad de parámetros que intervienen en el desempeño de un amplificador; uno de los más importantes es la linealidad. Para determinar el grado de linealidad de un amplificador, se toman medidas de dos tonos de intermodulación de tercer orden. La linealidad es usualmente especificada como un nivel mínimo en dBc, en una cantidad de potencia total de salida para ambos tonos.

Los dBc expresan la relación entre alguna señal determinada (ruido o espurios) con respecto a la portadora. En la figura 2.11 se puede observar a la señal deseada con ruido y espurios añadidos; teniendo la primera, mucha mayor potencia que las últimas. Como la gráfica se referencia en 0dB para la máxima potencia de la señal deseada, la medidas en dBc para las señales agregadas, se obtienen directamente midiendo desde el punto de 0dB hacia abajo.

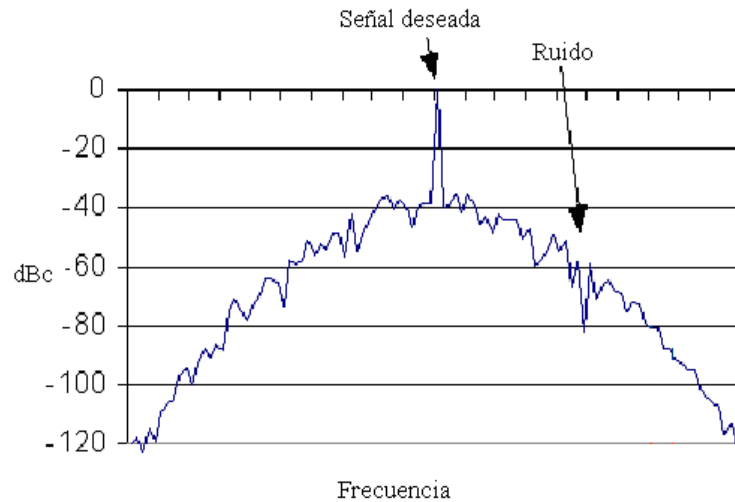


Figura 2.11 Relación entre dBc y frecuencia. Se muestra la señal deseada y el ruido agregado dentro de cierto rango de frecuencia. [7]

La eficiencia de potencia de los TWTAs (50 a 60%), es el doble que la de los SSPAs (25 a 30%); lo que se traduce en una mayor linealidad para los primeros. Para poder decidir entre un TWTA o un SSPA, se debe tener en cuenta la potencia de salida absoluta en un cierto nivel de distorsión de intermodulación

2.2.4 Up converter

Componente que lleva las señales en frecuencias intermedias o en banda L a frecuencias por el orden de los Ghz para ser transmitidas hacia el HPA.

2.2.5 Modulador

Se encarga de sobreponer las señales de tráfico del usuario sobre una portadora, para luego ser enviadas hacia el up converter, donde ocurre el proceso de Up conversión, amplificación y transmisión.

2.2.6 Demodulador

Recibe la señal del down converter en IF o en banda L y separa las señales de tráfico del usuario de la portadora, para que la información presente en estas, pueda ser traducida y utilizada

2.2.7 Corrección y detección de errores

La transmisión de información a través de sistemas satelitales, siempre resulta en la degradación de la calidad de la señal. En enlaces digitales, se usa el BER para medir el nivel de degradación de la señal; empleando modulación QPSK, se pueden alcanzar buenos niveles de BER con relaciones señal a ruido relativamente bajas. Los sistemas que pueden detectar y corregir errores en la transmisión, usan un mecanismo llamado FEC (Forward Error Correction), el cual consiste en corregir los errores en el receptor sin retransmisión de la información original. Al usar FEC en el sistema satelital, se le deben agregar una cierta cantidad de bits a la señal original; esta cantidad está determinada por una relación pre-establecida, que para el caso del satélite Simón Bolívar es de $\frac{3}{4}$. La forma en que estos bits adicionales serán agregados a la señal original, se explicará con detalle en los cálculos correspondientes a la determinación total del ancho de banda en la modulación digital.

2.2.8 Tecnologías de acceso:

2.2.8.1 TDM / TDMA (Time Division Multiplex/Multiple Access)

Es una tecnología de transmisión digital que permite a varios usuarios, acceder a un canal RF sin interferencias, esto mediante la colocación de cada usuario en una ranura de tiempo propia.

2.2.8.2 Sistema SCPC (Single Channel Per Carrier)

Se refiere al uso de una sola señal en una frecuencia y ancho de banda dados para establecer enlaces dedicados entre dos puntos, por lo que se logran condiciones muy seguras para los usuarios, debido a que no se comparte el espectro satelital entre estos. A través de SCPC se puede transmitir voz, datos, video conferencias, internet, ect...

2.2.8.3 MCPC (Multi Carrier Per Channel)

En este tipo de tecnología, varias sub-portadoras se combinan en una sola ráfaga de bits, antes de ser moduladas sobre una sola portadora pudiendo transmitir de una sola localización a uno o más sitios; para esto se usa TDM (Time División Multiplexing). Es mucho más usado que SCPC ya que aprovecha de una manera más eficiente, el espectro disponible para la comunicación satelital.

2.2.8.4 DVB-S

Es un sistema unidireccional diseñado en principio para la difusión de canales de televisión (servicios punto-multipunto) vía satélite a tasas de transferencia de entre 23,754 y 41,75 Mbps utilizando la banda Ku.

2.2.8.5 DVB-RCS

Adoptado en el año 2.002, este sistema opera con dos enlaces: uno de ida (outbound) y otro de retorno (inbound).

El enlace de ida está conformado por una única portadora TDMA con codificación QPSK, lo que lo hace idéntico al canal de transmisión de un sistema DVB-S. Este canal puede llegar a ocupar la totalidad del transpondedor satelital (limitación por ancho de banda) o toda la potencia del mismo (limitación por potencia). Las comunicaciones hacia los terminales comparten este canal, utilizando diferentes espacios en la portadora.

Por su parte el enlace de retorno está conformado por un conjunto de portadoras codificadas en QPSK, cada una de las cuales está dividida en múltiples ranuras de tiempo. A este esquema se le denomina Acceso Múltiple por División de Tiempo en Múltiples Portadoras (*Multi Frequency – Time Division Multiple Access* o MF-TDMA).

2.2.9 Aplicaciones

Las aplicaciones típicas en sistemas VSAT son: conversaciones telefónicas, fax, difusión de T.V., servicios de comunicación a altas velocidades, acceso a internet, videoconferencias, puntos de venta, Difusión de Audio Digital (DAB), educación a distancia, telemetría y telecontrol, consulta a base de datos, televisión corporativa, etc...

2.2.10 Distribución de los componentes en las VSAT

Para el caso particular de los terminales VSAT, sus componentes están distribuidos en dos módulos conocidos como: una unidad externa, ubicada al aire libre y una unidad interna.

Unidad externa (ODU)

Consiste en los amplificadores, los convertidores y la antena.

Unidad interna (IDU)

La IDU determina los esquemas de acceso bajo los cuales el sistema VSAT funciona, proporciona una interfaz hacia los equipos terminales del usuario como PCs, LANs, routers, multiplexores, equipos telefónicos, PABX, ect.. Además, realiza la conversión de protocolo necesaria en los datos de entrada del equipo del cliente, antes de la modulación y posterior transmisión a los convertidores y amplificadores. Esta unidad consiste básicamente en un modulador y un demodulador; ambos descritos anteriormente.

2.3 Cálculo de un enlace satelital

Para establecer un enlace entre dos estaciones terrenas a través de un satélite geoestacionario, se deben determinar parámetros específicos que son presentados a continuación:

2.3.1 Potencia recibida [8]

La potencia recibida por una antena (P_{rx})

$$P_{rx} = \frac{P_{tx} \cdot G_{tx} \cdot A_e}{4\pi D^2} \text{ (Watts)} \text{ (Ec. 2.3.1)}$$

$$4\pi D^2$$

P_{tx} : Potencia transmitida (watts).

G_{tx} : Ganancia de transmisión (dBi).

A_e : Área efectiva de la antena receptora (m^2).

D : Distancia entre la antena transmisora y receptora (m).

Es importante mencionar que esta ecuación es independiente de la frecuencia.

2.3.2 Diámetro de la antena [8]

La ganancia de la antena puede representarse como muestra la ecuación 2.3.2:

$$G_{dBi} = 10 \cdot \log(\eta) + 20 \cdot \log(f) + 20 \log(d) + 20,4 \text{ dB (dBi)} \text{ (Ec. 2.3.2)}$$

Donde:

$$20,4 \text{ dB} = 10 \cdot \log(1 \cdot 10^9 \cdot \pi / C) \text{ (Ec. 2.3.3)}$$

η : Eficiencia de la antena

f : Frecuencia en Ghz

d : Diámetro de la antena en metros.

C : Velocidad de la luz ($3 \cdot 10^8$ m/seg)

G(dbi): Se refiere a la ganancia de una antena determinada con respecto a una antena isotrópica ideal.

Radiador o Antena isotrópica: Es una fuente de radiación, que propaga ondas uniformemente en todas las direcciones con las mismas magnitudes y propiedades; lo que quiere decir que su directividad es de 0dBi.

La ganancia para una antena de 1m^2 con una eficiencia del 100% es la siguiente:

$$G_{1\text{m}^2} = 20\log(f) + 21.4\text{db} \quad (\text{dBi}) \quad (\text{Ec 2.3.4})$$

A partir de la ec. 2.3.2 se puede determinar el diámetro de la antena como se muestra en la ecuación 2.3.5

$$d = ((c/\pi * f)^2 * 10^{G_{\text{dBi}}/10} * 1/\eta)^{1/2} \quad (\text{m}) \quad (\text{Ec 2.3.5})$$

2.3.3 Pérdida por atenuación en el espacio libre [9]

Cuando se trata de enlaces punto a punto, es preferible calcular la atenuación en el espacio libre entre antenas isotropas. El término $(\lambda/4\pi D)^2$ corresponde al inverso de las pérdidas debido a la dispersión de la energía de la onda a través de su viaje y se representa por L_o .

$$L_o = 20\log(D) + 20\log(f) + 32.4\text{db} \quad (\text{dB}) \quad (\text{Ec. 2.3.6})$$

D: Distancia entre el satélite y la estación terrena (Km)

f: Frecuencia (Mhz).

2.3.4 P.I.R.E: Potencia Isotrópica Equivalente Radiada [8]

La PIRE se define como la cantidad de potencia que tendría que ser emitida por una antena isotrópica, para producir la máxima densidad de potencia en la dirección de máxima ganancia.

La PIRE se usa para estimar el área de servicio de un transmisor y para evitar que se solapen áreas de cobertura de varios transmisores, que estén trabajando a la misma frecuencia.

La ganancia directiva de una antena resulta en un uso más económico de la potencia RF proporcionada por el generador.

Ahora la potencia recibida por la antena (P_{rx}), puede expresarse como se muestra en la ecuación 2.3.7:

$$P_{rx} = \text{PIRE} + G_{rx} - L_o \quad (\text{dBw}) \quad (\text{Ec. 2.3.7})$$

La ecuación 2.3.6 representa un caso ideal en el cual no existen pérdidas adicionales en el enlace. En la práctica se deben tomar en cuenta ciertos factores que ocasionan pérdidas a la señal y que serán debidamente explicados más adelante.

$$\mathbf{PIRE_{est} = SDF_{nom} + L_o + L_r + L_g + L_d - G_{1m2} \text{ (dBw) (Ec. 2.3.8)}}$$

Donde:

SDF_{nom}: Densidad de flujo de saturación nominal (dBw/m²)

L_o: Pérdidas por atenuación en el espacio libre (dB)

L_r: Pérdidas causadas por lluvia (dB)

L_g: Pérdidas causadas por gases atmosféricos (dB)

L_d: Pérdidas por desalineamiento y seguimiento de la antena

2.3.5 Ángulo Azimut, ángulo de elevación y distancia [24]

Para que se pueda establecer un enlace satelital, es necesario que exista una línea de vista entre la estación terrena y el satélite; siendo necesario para esto, que la antena terrestre apunte hacia la latitud donde se encuentra el satélite. Cualquier antena de un enlace satelital realiza dos movimientos necesarios, el ángulo azimut y el ángulo de elevación.

El ángulo de azimut se define como el ángulo de apuntamiento horizontal de una antena terrestre, tomando como referencia al norte como 0°.

El ángulo de elevación representa la apertura entre el plano horizontal y la señal electromagnética radiada por la antena. Se puede ver como el ángulo que resulta al trazar un triángulo entre el punto donde nos encontramos, el horizonte y el satélite. Depende de la posición geográfica (latitud y longitud) y el satélite al que se quiere orientar la antena.

Para obtener las coordenadas geográficas en base decimal hay que efectuar la siguiente conversión ya que estas vienen dadas en grados, minutos y segundos.

$$\mathbf{(\acute{A}ngulo)_{10} = Grados + \frac{Minutos}{60} + \frac{Segundos}{3600} \text{ (}^\circ\text{) (Ec 2.3.9)}}$$

2.3.5.1 Cálculo del ángulo de elevación de la estación terrena (θ)

$$\theta = \text{Arctg} \frac{\cos \varphi * \cos(\theta_e - \theta_s) - 0,151}{[1 - \cos^2(\varphi) * \cos^2(\theta_e - \theta_s)]^{1/2}} \quad (^\circ) \quad (\text{Ec 2.3.10})$$

Donde:

φ : Latitud de la estación terrena ($^\circ$).

θ_s : Longitud del satélite ($^\circ$).

θ_e : Longitud de la estación terrena ($^\circ$).

2.3.5.2 Cálculo del Azimut (Azm)

El ángulo Azimut nos indica la posición del satélite con respecto al sur real, es decir, este valor nos indicará el punto exacto hacia donde debe "mirar" la antena.

$$\text{Azm} = \text{Arctg} \frac{\tan |\theta_e - \theta_s|}{\text{Sen}(\varphi)} \quad (^\circ) \quad (\text{Ec 2.3.11})$$

Para obtener el ángulo azimut real se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Si el satélite se encuentra al sureste de la estación terrena $\text{Az real} = 180^\circ + \text{Azm}$
- Si el satélite se encuentra al suroeste de la estación terrena $\text{Az real} = 180^\circ - \text{Azm}$
- Si el satélite se encuentra al noroeste de la estación terrena $\text{Az real} = 360^\circ - \text{Azm}$
- Si el satélite se encuentra al noreste de la estación terrena $\text{Az real} = \text{Azm}$

2.3.5.3 Cálculo de la distancia desde el satélite geoestacionario hasta la estación terrena (D)

$$D = (R_o^2 + (R_o + H)^2 - 2R_o(R_o + H)\cos(\beta))^{1/2} \quad (\text{m}) \quad (\text{Ec 2.3.12})$$

$$\alpha = \sin^{-1}(0,15126 \cos(\theta))$$

$$\beta = 90^\circ - \alpha - \theta$$

R_o : Radio ecuatorial de la tierra (6378,14Km)

H : Altura de la órbita geoestacionaria desde la tierra (36000Km)

2.3.6 Pérdidas adicionales [10]

Aparte de las pérdidas básicas de espacio libre (Lo), la onda de radio está sujeta a los siguientes fenómenos atmosféricos: Absorción por gases atmosféricos (Lg), Absorción por lluvia (Lr), Atenuación por centelleo troposférico (Ls), Atenuación por las nubes y la niebla (Lc) y Atenuación por efectos de polarización cruzada debido a la rotación de Faraday.

Por otro lado, el backoff y el desalineamiento de la antena.

2.3.6.1 Atenuación por gases atmosféricos (Lg) [10], [11]

La atenuación debida a los gases atmosféricos que es enteramente causada principalmente de la frecuencia, del ángulo de elevación, de la altura sobre el nivel del mar y de la densidad de vapor de agua. A frecuencias por debajo de 10Ghz, normalmente puede ignorarse. Su importancia aumenta con la frecuencia por encima de 10Ghz, especialmente para ángulos de elevación bajos. En la figura 2.1 se puede observar que a frecuencias aproximadas a los 22,235Ghz, 53,5Ghz y 65,2 Ghz se generan una gran pérdida de potencia, por lo que se ha decidido desecharlas para efectos de comunicaciones satelitales.

A continuación se muestra como realizar el cálculo referente a las pérdidas producidas por los gases atmosféricos:

$$L_g = (\gamma_o + \gamma_w) * D_{atm} \quad (\text{dB}) \quad (\text{Ec 2.3.13})$$

Donde:

γ_o : Atenuación específica debida al aire seco (dB/Km)

γ_w : Atenuación específica debida al vapor de agua (dB/Km)

D_{atm}: Distancia de la trayectoria atmosférica

La distancia de la trayectoria atmosférica, depende del ángulo de elevación de la antena en la estación terrestre, así como de la altura de la atmósfera, tomando como referencia el nivel del mar; esta altura es de aproximadamente 10Km.

$$D_{atm} = \frac{10Km}{\text{Sen}(\Theta)} \quad (\text{Km}) \quad (\text{Ec 2.3.14})$$

Θ : Ángulo de elevación de la antena en la estación terrestre

Por su parte, los valores de γ_o y γ_w , se obtienen a partir de la figura 2.12.

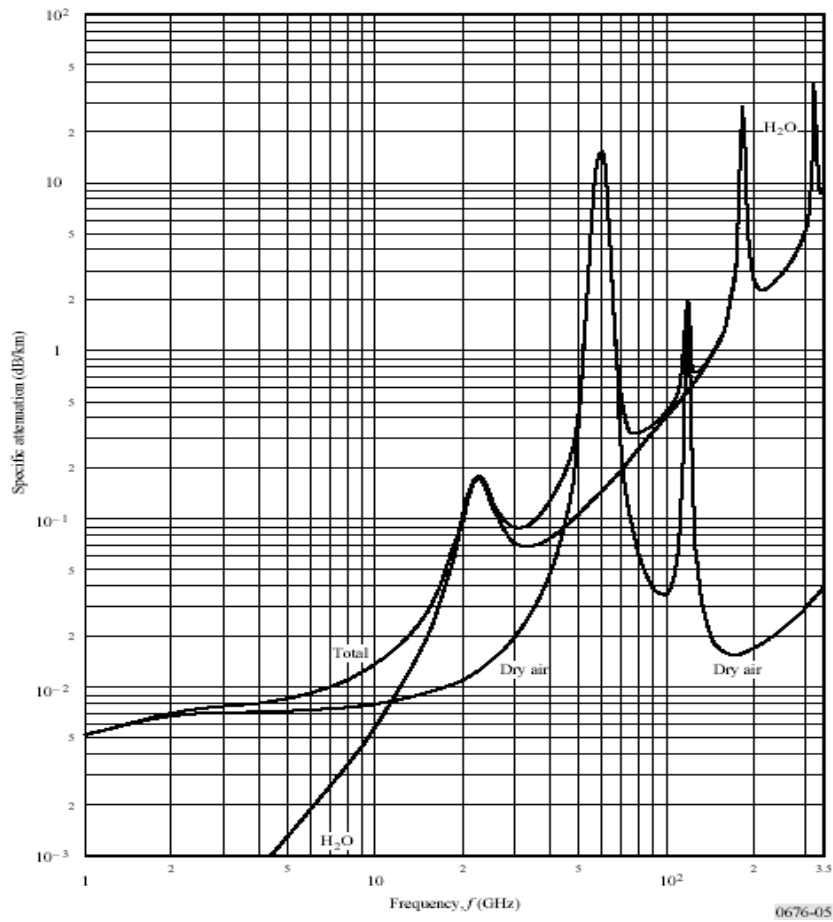


Figura 2.12 Atenuación específica debida a los gases atmosféricos. [11]

2.3.6.2 Atenuación producida por la lluvia (Lr) [10]

Este es el efecto atmosférico que más puede afectar a un enlace satelital, ya que la lluvia produce una atenuación en las radio ondas por esparcimiento y por absorción de energía de las mismas. La atenuación por lluvia aumenta con el incremento de la frecuencia, (específicamente por encima de los 3GHz) y es peor para banda Ku y Ka, que para banda C. Es necesario que se transmita suficiente cantidad de potencia para contrarrestar estos efectos antes mencionados y garantizar la disponibilidad de enlace.

Dependiendo de la región geográfica donde se encuentre la estación terrena, la atenuación por lluvia puede ser mayor o menor, esto basándose en las estadísticas de intensidad de lluvia, tamaño de gota y presión atmosférica.

Es importante mencionar que una gran parte de la atenuación debida a las nubes y de la atenuación producida por los gases ya está incluida en la predicción de la atenuación debida a la lluvia para porcentajes de tiempo inferiores al 1%.

Para realizar el cálculo referente a la atenuación por lluvia, la UIT proporciona estimaciones a largo plazo de las estadísticas que facilitan la atenuación debido a la lluvia sobre trayectos oblicuos en un determinado punto para frecuencias de hasta 55 Ghz.

Se requirieron los siguientes datos:

$R_{0,01}$: Intensidad de la lluvia en el punto de que se trate, para el 0,01% de un año medio (mm/h).

hs: Altura de la estación terrena sobre el nivel medio del mar (km)

θ : Ángulo de elevación ($^{\circ}$)

ϕ : Latitud de la estación terrena ($^{\circ}$)

f: Frecuencia (Ghz)

Re: Radio efectivo de la tierra (8500Km)

La configuración geométrica se muestra en la figura 2.13:

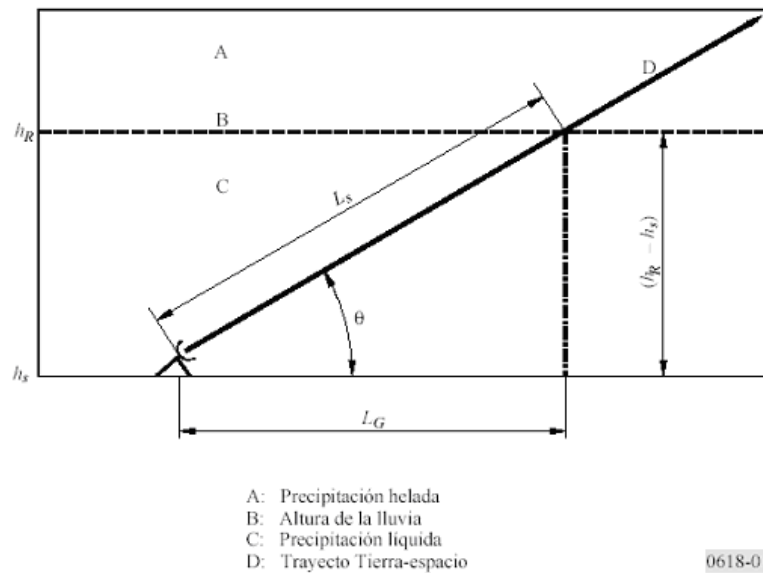


Figura 2.13 Representación esquemática de un trayecto Tierra-Espacio con indicación de los parámetros que se utilizarán en el proceso de predicción de atenuación. [10]

A continuación se listan los pasos detallados que se deben seguir para desarrollar el cálculo:

1. Se determina la altura de la lluvia, h_r . [15]

La altura media de la lluvia por encima del nivel del mar h_r puede calcularse a partir de la isoterma de 0°C como:

$$h_r = h_o + 0,36\text{Km. (Ec 2.3.15)}$$

A su vez h_o puede determinarse tomando como referencia la figura 2.14:

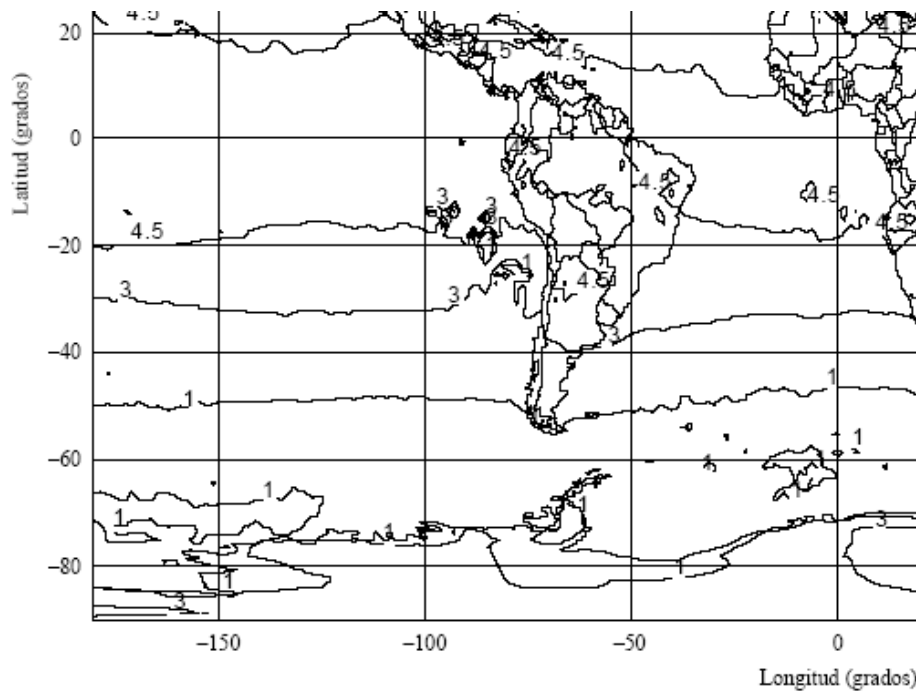


Figura 2.14 Altura media anual de la isoterma de 0°C por encima del nivel del mar (Km). [15]

2. Para $\theta \geq 5^\circ$, se calcula la trayectoria del trayecto oblicuo, L_s , en el espacio correspondiente a la altura de la lluvia mediante la ecuación 2.3.16:

$$L_s = \frac{(h_R - h_S)}{\sin(\theta)} \quad (\text{Km}) \quad (\text{Ec 2.3.16})$$

3. Se determina la proyección horizontal, L_G , de la longitud del trayecto oblicuo aplicando la ecuación 2.3.17:

$$L_g = L_s \cdot \cos(\theta) \quad (\text{Km}) \quad (\text{Ec 2.3.17})$$

4. Se obtiene la intensidad de la lluvia $R_{0,01}$ rebasada durante el 0,01% de un año medio utilizando los mapas de intensidad de lluvia. [13]

Se divide la tierra en 15 regiones hidrometeorológicas (desde la A hasta la Q), para obtener el valor de la intensidad de lluvia excedida por localidad. Esto se puede observar en la figura 2.15 en donde solo se tomó en cuenta el continente americano, ya que es el área de interés. De esta manera y basándose en el mapa se obtienen las diferentes regiones climáticas con la intensidad de lluvia excedida durante el 0,01% del tiempo. Venezuela pertenece a la región N y sus características se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Intensidad de lluvia excedida en mm/hr. [13]

Región de lluvia	Intensidad (R) en mm/hr	Porcentaje de 99,8% de disponibilidad
N	95	4,8

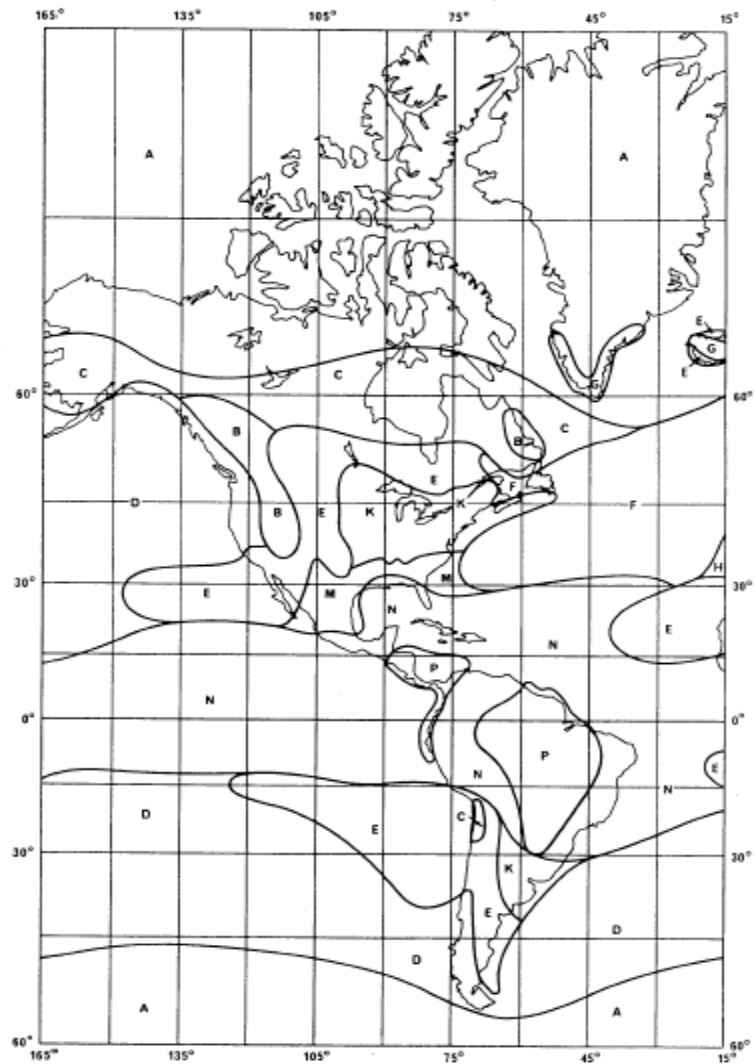


Figura 2.15 Zonas en América correspondientes a distintos valores de intensidad de lluvia excedida. [13]

5. Se halla la atenuación específica, γ_r , utilizando los coeficientes dependientes de la frecuencia que da la UIT [14] y el índice de intensidad de la lluvia,

$R_{0,01}$, determinado según el paso 4, aplicando la ecuación 2.3.18:

$$\gamma_R = k \cdot (R_{0,01})^\alpha \quad (\text{dB/km}) \quad (\text{Ec 2.3.18})$$

Para la polarización lineal y circular, y para cualquier geometría del trayecto, los coeficientes de la ecuación $\gamma_r = k \cdot R^\alpha$ pueden calcularse mediante las siguientes ecuaciones 2.3.19 y 2.3.20 y tomando como referencia los valores expuestos en la tabla 2.3. [14]

$$K = (K_h + K_v + (K_h - K_v) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos(2\tau)) / 2 \quad (\text{Ec 2.3.19})$$

$$\alpha = (K_h \cdot \alpha_h + K_v \cdot \alpha_v + (K_h \cdot \alpha_h - K_v \cdot \alpha_v) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos(2\tau)) / 2K \quad (\text{Ec 2.3.20})$$

Donde:

θ : Ángulo de elevación.

τ : Ángulo de inclinación de la polarización con respecto a la horizontal.

Tabla 2.3 Coeficientes que dependen de la frecuencia para estimar la atenuación específica de la lluvia. [14]

Frecuencia (Ghz)	kh	ah	kv	av
4	0,0001071	1,6009	0,0002461	1,2476
6	0,0007056	1,5900	0,0004878	1,5728
12	0,02386	1,1825	0,02455	1,1216
15	0,04481	1,1233	0,05008	1,0440
19	0,08084	1,0691	0,08642	0,9930
29	0,2224	0,9580	0,2124	0,9203

6. Se calcula el factor de reducción horizontal, $r_{0,01\%}$, para el 0,01% del tiempo:

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + 0,78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f} - 0,38 \left(1 - e^{-2L_G}\right)}} \quad (\text{Ec 2.3.21})$$

7. Se calcula el factor de ajuste vertical, $v_{0,01\%}$, para el 0,01% del tiempo:

$$\zeta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{h_R - h_s}{L_G r_{0,01}} \right) \quad \text{grados} \quad (\text{Ec 2.3.22})$$

Para $\zeta > \theta$ se tiene que :

$$L_R = \frac{L_G * r_{0,01}}{\cos(\theta)} \quad (\text{km}) \quad (\text{Ec 2.3.23})$$

De otro modo:

$$L_R = \frac{(h_R - h_s)}{\sin(\theta)} \quad (\text{Km}) \quad (\text{Ec 2.3.24})$$

En este caso de estudio $|\varphi| < 36^\circ \rightarrow \chi = 36 - |\varphi| \quad (^\circ)$

$$v_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left(31 \left(1 - e^{-(\theta/(1+\chi))} \right) \sqrt{\frac{L_R \gamma_R}{f^2}} - 0,45 \right)} \quad (\text{Ec 2.3.25})$$

8. La longitud de trayecto efectiva es:

$$L_E = L_R * v_{0,01} \quad (\text{km}) \quad (\text{Ec 2.3.26})$$

9. La atenuación de rebasamiento prevista para el 0,01% de un año medio

$A_{0,01\%}$ se obtiene mediante:

$$A_{0,01} = \gamma_R * L_E \quad (\text{dB}) \quad (\text{Ec 2.3.27})$$

10. La atenuación de rebasamiento estimada para otros porcentajes de un año medio, en el margen del 0,001% al 5%, se determina a partir de la atenuación de rebasamiento para el 0,01% de un año medio:

Si $p \geq 1\%$ o $|\varphi| \geq 36^\circ \rightarrow \beta = 0$

Si $p < 1\%$ y $|\varphi| < 36^\circ \rightarrow \beta = -0,005 * (|\varphi| - 36)$

De otro modo: $\beta = -0,005 * (|\varphi| - 36) + 1,8 - 4,25 * \text{Sen}\theta$

$$A_p = A_{0,01} \left(\frac{p}{0,01} \right)^{-(0,655 + 0,033 \ln(p) - 0,045 \ln(A_{0,01}) - \beta(1 - p) \text{sen } \theta)} \quad \text{dB}$$

(Ec 2.3.28)

Donde A_p representa la atenuación causada por la lluvia (L_r) para un porcentaje específico de tiempo.

2.3.6.3 Atenuación por centelleo troposférico para ángulos de elevación (θ) superiores a 4° (Ls). [10], [17]

El método que se dispone para calcular el efecto del centelleo troposférico, es aplicable para frecuencias comprendidas entre 7 y 14 Ghz. Los parámetros necesarios para aplicar el método son los siguientes:

t: valor medio de la temperatura ambiente de la superficie ($^\circ\text{C}$) en el emplazamiento durante un periodo de un mes o más.

H: Valor medio de la humedad relativa de la superficie (%) en el emplazamiento durante un mes o más.

Nota: Los valores de t y H pueden hallarse en los mapas de Nhumedad que recomienda la UIT. [17]

f: Frecuencia (Ghz)

θ : Ángulo de elevación del trayecto siendo $\theta \geq 4^\circ$.

D: Diámetro físico de la antena de la estación terrena (m)

η : Eficiencia de la antena, si no se conoce $\eta=0,5$ es una estimación conservadora.

Paso 1: Se obtiene el valor de N_{humedad} directamente de la figura 2.16.

Paso 2: Se calcula la desviación típica de la amplitud de la señal σ_{ref} , que sirve de referencia, mediante la ecuación 2.3.29:

$$\sigma_{\text{ref}} = 3,6 \cdot 10^{-3} + 10^{-4} \cdot N_{\text{humedad}} \quad (\text{dB}) \quad (\text{Ec. 2.3.29})$$

Paso 3: Se calcula la longitud efectiva del trayecto, L , de acuerdo con la fórmula 2.3.30. h_L es la altura de la capa de turbulencia; el valor que debe utilizarse es $h_L = 1000\text{m}$.

$$L = \frac{2h_L}{\sqrt{\text{sen}^2 \theta + 2,35 \times 10^{-4}} + \text{sen } \theta} \quad \text{m} \quad (\text{Ec. 2.3.30})$$

Paso 4: Se calcula el diámetro efectivo de la antena D_{eff} , a partir del diámetro geométrico, D y de la eficiencia de la antena η (Ec 2.3.31):

$$D_{\text{eff}} = (\sqrt{\eta}) \cdot D \quad (\text{m}) \quad (\text{Ec. 2.3.31})$$

Paso 5: Se calcula el factor de promediación de la antena utilizando las ecuaciones 2.3.32 y 2.3.33:

$$g(x) = \sqrt{3,86 (x^2 + 1)^{11/12} \cdot \text{sen} \left[\frac{11}{6} \arctg \frac{1}{x} \right] - 7,08 x^{5/6}} \quad (\text{Ec. 2.3.32})$$

con:

$$x = 1,22 D_{\text{eff}}^2 (f / L) \quad (\text{Ec. 2.3.33})$$

Cuando el radicando es negativo ($x \geq 7.0$) la profundidad del desvanecimiento por centelleo prevista para cualquier porcentaje de tiempo es cero y no son necesarios los siguientes pasos.

Paso 6: Se calcula la desviación típica de la señal para el periodo y trayecto de propagación considerados como se muestra en la ec. 2.3.34:

$$\sigma = \sigma_{ref} f^{7/12} \frac{g(x)}{(\sin \theta)^{1,2}} \quad (\text{Ec. 2.3.34})$$

Paso 7: Se calcula el factor de porcentaje de tiempo, $a(p)$, para el porcentaje de tiempo, p , comprendido entre $0,001 < p \leq 50$ empleando la ecuación 2.3.35:

$$a(p) = -0,061 (\log_{10} p)^3 + 0,072 (\log_{10} p)^2 - 1,71 \log_{10} p + 3,0$$

(Ec. 2.3.35)

Paso 8: Se calcula la profundidad de desvanecimiento por centelleo para el porcentaje de tiempo, p , mediante la ecuación ec. 2.3.36:

$$As(p) = a(p) * \sigma \quad (\text{dB}) \quad (\text{Ec. 2.3.36})$$

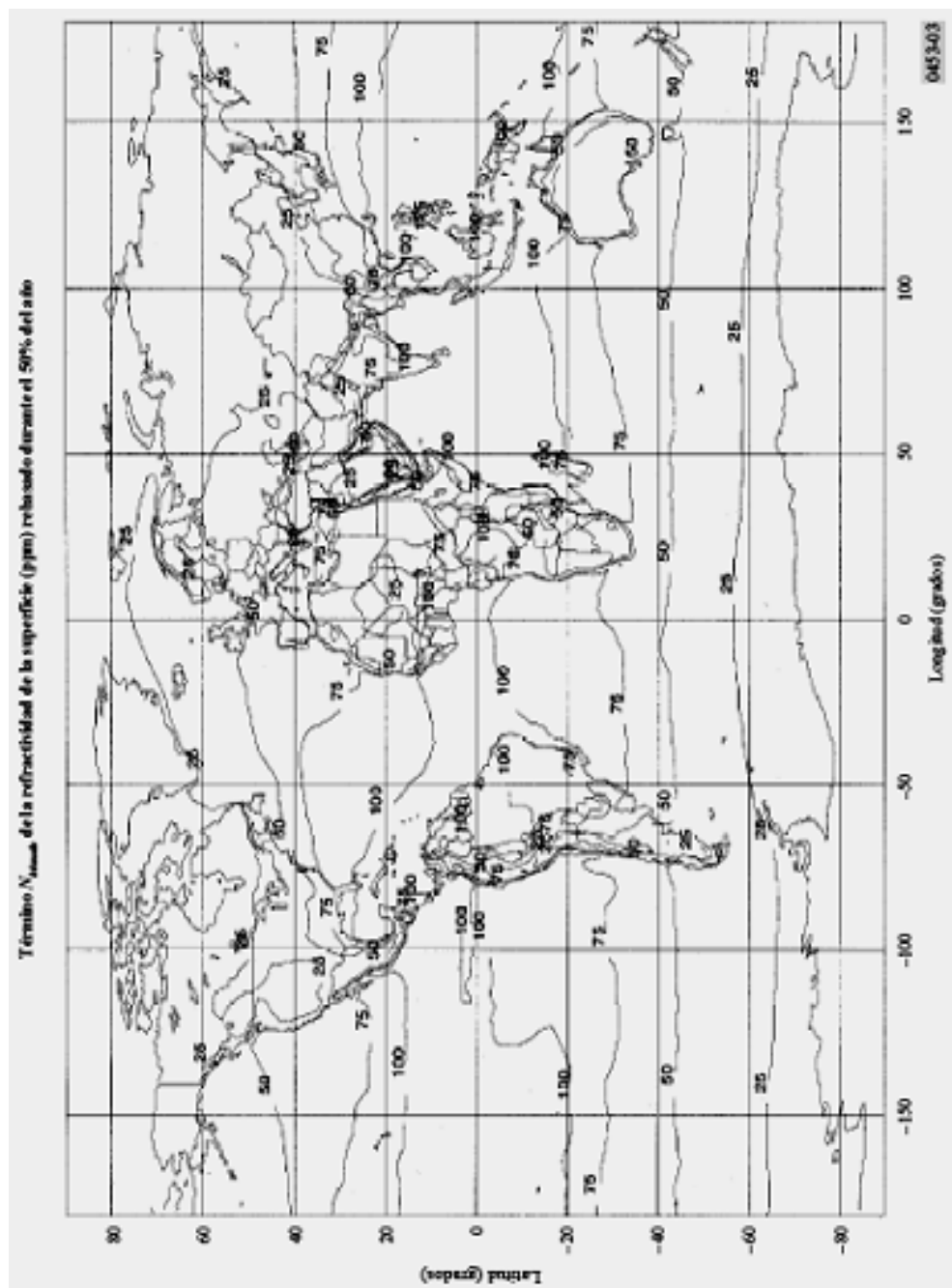


Figura 2.16 Término N_{humid} de la refractividad de la superficie (ppm) rebasado durante el 50% del año. [17]

2.3.6.4 Atenuación debida a las nubes y la niebla (Lc) [16]

Para sistemas que operen en frecuencias mayores a los 10 Ghz, la atenuación debida a las nubes, puede ser un factor importante. Para calcular esta atenuación, para un valor de probabilidad determinado, se debe aplicar la ecuación 2.3.37:

$$L_c = \frac{L * K_l}{\text{Sen}(\theta)} \quad (\text{dB}) \quad \text{para } 90^\circ \geq \theta \geq 5^\circ \quad (\text{Ec. 2.3.37})$$

Donde:

K_l : Coeficiente de la atenuación específica ((dB/Km)/(g/m³)). Se obtiene a partir de la figura 2.17.

L : estadísticas del contenido de la columna total de agua líquida (kg/m²). Se obtiene a partir de la figura 2.18.

θ : Ángulo de elevación (°).

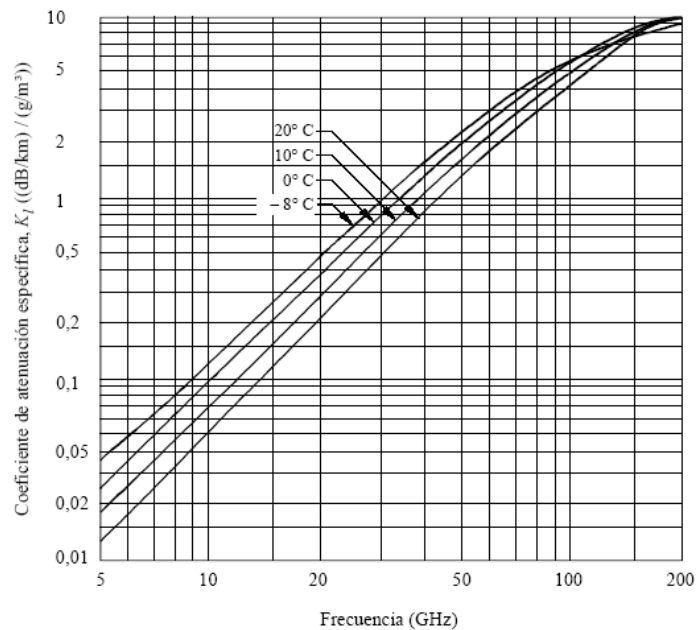


Figura 2.17 Atenuación específica de las pequeñas gotas de agua a diversas temperaturas en función de la frecuencia. [16]

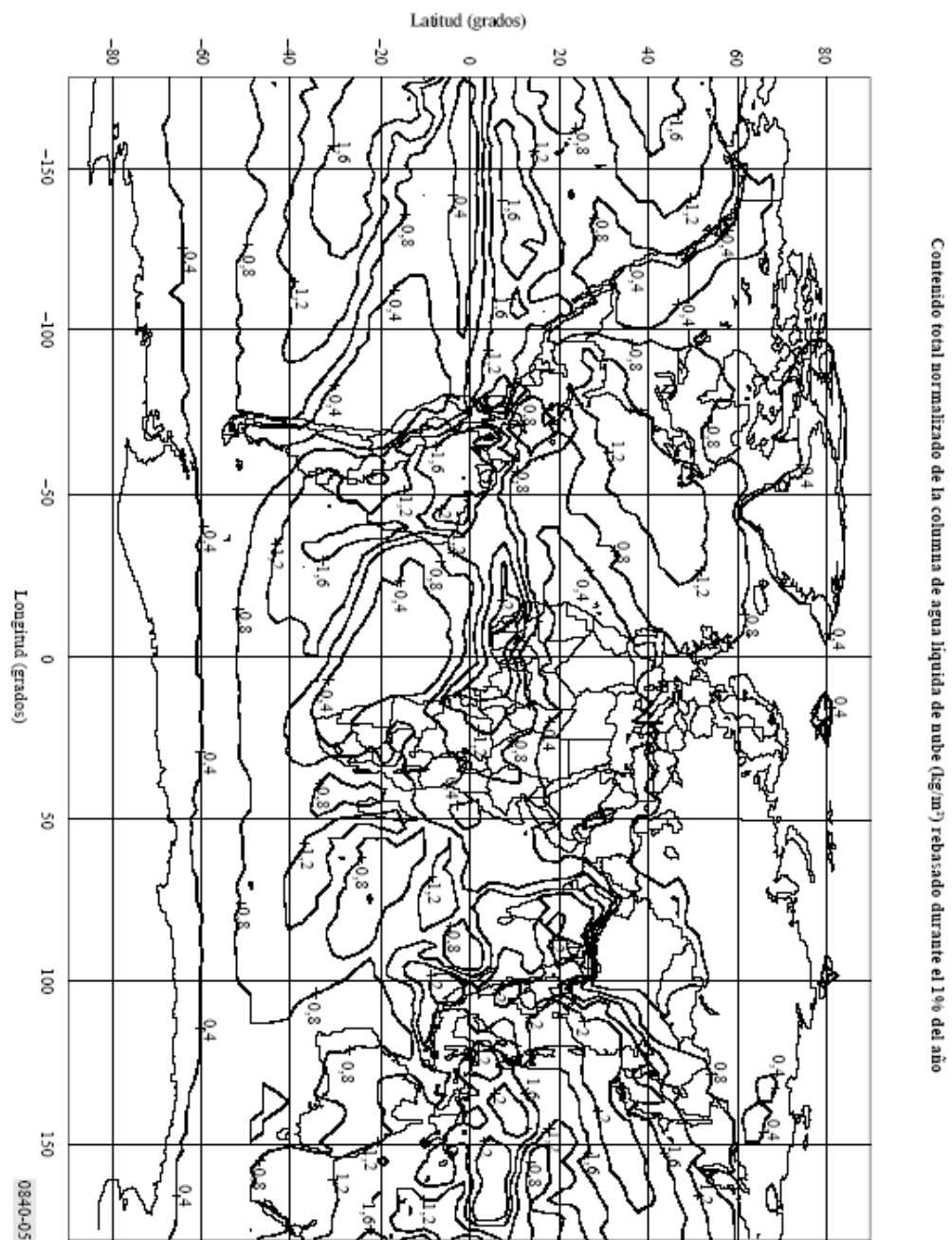


Figura 2.18 Contenido total normalizado de la columna de agua líquida de nube (kg/m^2) rebasado durante el 1% del año. [16]

2.3.6.5 Atenuación por reducción (Back Off)

Como se detalló anteriormente, los amplificadores de potencia que se utilizan tanto en las estaciones terrenas como en los satélites, son dispositivos no lineales. Para reducir los niveles de distorsión por intermodulación, la potencia de entrada se debe reducir para asegurar que el HPA estará trabajando en una región lo más lineal posible. Este proceso se muestra en la figura 2.19:

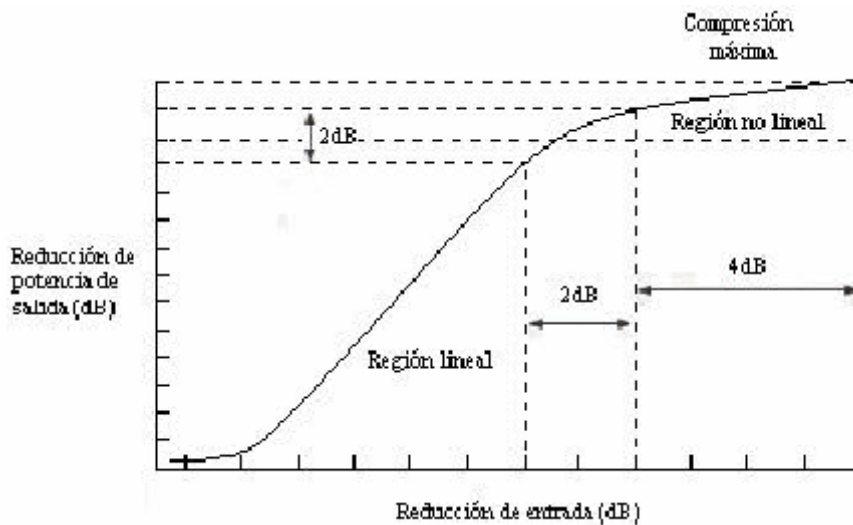


Figura 2.19 Potencia de salida de un HPA. [18]

2.3.6.6 Atenuación por efectos de polarización cruzada [10]

El método que se utiliza para determinar los efectos que producen la polarización cruzada en un enlace satelital, a causa de la rotación de Faraday, tienen valor para $8 \leq f \leq 35\text{GHz}$ y $\theta \leq 60^\circ$. Como en el presente trabajo el ángulo de inclinación mínimo es mayor a 66° , estos efectos no se tomarán en cuenta.

2.3.6.7 Atenuación por seguimiento y desalineamiento de la antena (Ld) [8]

Luego de que es establecido un enlace satelital, la situación ideal es tener la antena de la estación terrestre, alineada a su máxima ganancia con el satélite; pero en la práctica siempre ocurre un pequeño desalineamiento que produce cierta cantidad de pérdida de dBs. Esta reducción puede ser estimada mediante el tamaño de la

antena y debe ser considerada tanto para el enlace de transmisión como para el de recepción. Igualmente hay que considerar una pérdida que ocurre en las antenas que tienen sistemas de seguimiento móviles, para mantenerse alineadas con el satélite.

2.3.7 Ruido térmico [8]

La temperatura de ruido es la medida de la potencia de ruido térmico que un equipo activo o pasivo genera en el sistema receptor. Este tipo de ruido es aquel voltaje que viene desde el movimiento aleatorio de los electrones. A mayor temperatura, los electrones más rápido se mueven, provocando mayor temperatura de ruido. La potencia del ruido es proporcional a la temperatura absoluta y al ancho de banda de la siguiente manera:

$$N = K \cdot T_e \cdot AB \quad (\text{watts}) \quad (\text{Ec 2.3.38})$$

Donde:

N: Potencia de ruido

K: Constante de Boltzmann (1.374×10^{-23} Joules/Kelvin).

T_e : Temperatura equivalente de ruido ($^{\circ}\text{K}$).

AB: Ancho de banda del ruido (Hz).

Por lo tanto, una antena con una impedancia característica Z_a , proveerá al receptor una cantidad $K \cdot T \cdot AB$ watts de potencia de ruido. Pero el receptor por el mismo, siendo un componente activo del sistema, producirá su propio ruido en adición al antes mencionado; así el ruido total disponible en el receptor será:

$$N_t = (K \cdot T \cdot AB)G_{rx} + DN \quad (\text{Watts}) \quad (\text{Ec 2.3.39})$$

Donde:

G_{rx} : Ganancia de recepción medida en la salida del receptor (dBi)

DN: Ruido adicional generado por el receptor, definido como $DN = K \cdot T_e \cdot AB$ (Watts)

De la **ec 2.3.38** puede obtenerse la densidad espectral de ruido (N_o) de la multiplicación entre T_e y K .

$$N_o = T_e * K \quad (\text{Watts/Hz}) \quad (\text{Ec 2.3.40})$$

La **Ec 2.3.39** queda expresada entonces así:

$$N = N_o * A_B \quad (\text{Watts}) \quad (\text{Ec 2.3.41})$$

En los sistemas de comunicación satelital siempre se trabaja con señales muy débiles debido a las grandes distancias en el enlace, por lo tanto, se debe reducir el ruido en los receptores de la mejor forma posible para asegurar una máxima relación señal a ruido. Esto será explicado con detalle más adelante.

La temperatura equivalente de ruido (T_e) representa esencialmente al ruido presente en la entrada del dispositivo amplificador más el ruido interno producido por el mismo.

Para efectuar el cálculo de la temperatura equivalente de ruido se requiere de dos parámetros como lo son: la temperatura ambiente (T_o) y el factor de ruido (F); este último permitirá saber cuanto se deteriora la relación señal a ruido que se genera cuando una señal pasa a través de un circuito electrónico (Ec. 2.3.42)

$$N = K * T_e * A_B \quad (\text{Watts}) \quad (\text{Ec. 2.3.42})$$

N : potencia de ruido agregada por el amplificador (Watts).

N_e : Potencia de ruido en el amplificador de salida (Watts).

N_i : Potencia de ruido en el amplificador de entrada (Watts).

2.3.8 Figura de ruido [18]

La figura de ruido se usa para especificar el ruido generado por un dispositivo y se expresa como la relación señal-ruido a la entrada del dispositivo y la relación señal-ruido a la salida del mismo

$$F = \frac{(S/N)_{ent}}{(S/N)_{sal}} \quad (\text{dB}) \quad (\text{Ec 2.3.43})$$

(S/N)_{ent}: Relación señal-ruido en la entrada del dispositivo (dB)

(S/N)_{sal}: Relación señal-ruido en la salida del dispositivo (dB)

En sistemas de comunicación satelital es más útil trabajar con la temperatura de ruido que con la figura de ruido, ya que la primera representa un método más preciso para expresar la contribución de ruido de un dispositivo. Por lo tanto la **ec 2.3.43** se puede expresar de la siguiente manera:

$$F = \frac{(S/N)_{ent}}{(S/N)_{sal}} = \frac{S/N_i}{G \cdot S/N_o} = \frac{N_e}{G \cdot N_i} = \frac{G \cdot K \cdot B \cdot (T_o + T_e)}{G \cdot K \cdot T_o \cdot B} = 1 + \frac{T_e}{T_o} \quad (\text{dB}) \quad (\text{Ec. 2.3.44})$$

$$F = 1 + (T_e/T_o) \quad (\text{dB}) \quad (\text{Ec 2.3.45})$$

$$T_e = (F - 1) \cdot T_o \quad (^{\circ}\text{K}) \quad (\text{Ec 2.3.46})$$

T_e: Temperatura equivalente.

T_o: Temperatura ambiente (290°K).

La temperatura de ruido equivalente es un valor hipotético que puede ser calculado pero no medido y esencialmente es el ruido presente a la entrada del dispositivo amplificador sumado al ruido interno producido por el mismo.

2.3.9 Factor de mérito (G/T) [8]

En cualquier sistema de transmisión, el ruido es el factor con mayor influencia en la calidad total del enlace. G/T_{dBK} es conocida como la medida más aproximada para determinar la calidad del sistema de recepción o del satélite o la capacidad que tiene la estación terrena para recibir la señal.

2.3.9.1 Cálculo de G/T

$$G/T_{\text{est}} = G_{rx}(\text{dB}) - 10\text{Log}(T_s) \quad (\text{dB}/^{\circ}\text{K}) \quad (\text{Ec 2.3.47})$$

Donde:

G/T_{est} : Figura de mérito de la estación terrena (dB/°K).

$G_{rx}(\text{dB})$: Ganancia de la antena de Rx (dB).

T_s : Temperatura del sistema de recepción (°K)

Ya que en la estación terrena hay un límite para el ruido térmico, los cálculos referentes a ruido de recepción se mantienen en unidades de temperatura de ruido (°K) en lugar de dB. La mayoría de las estaciones terrenas estándar tienen ganancias de 60dB o más.

La figura de mérito en el satélite está denotada como G/T_s sat (dB/°K), es un dato prefijado.

2.3.10 Ruido en el sistema [18]

2.3.10.1 Temperatura de ruido en el receptor (Trx)

A partir de la figura 2.20 se determina el ruido total presente en el sistema de recepción.

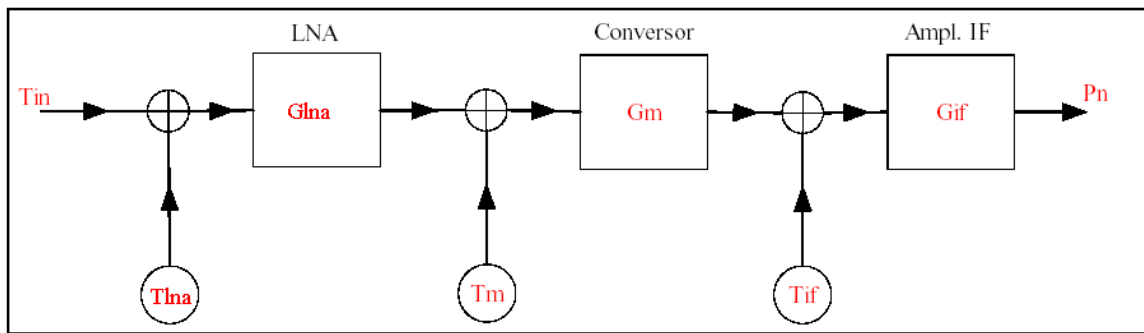


Figura 2.20 Generadores de ruido equivalentes en el modelo de bajada o receptor.

[18]

$$T_{rx} = T_o * (F_{rx} - 1) \text{ (°K)}$$

F_{rx} : Figura de ruido del sistema de recepción (dB)

$$P_n = G_{if} * K * T_{if} * W + G_m * G_{if} * K * T_m * W + G_{if} * G_m * G_{lna} * K * T_{lna} \text{ (Watts) (Ec 2.3.48)}$$

$$P_n = K * W * [G_{if} * T_{if} + G_m * G_{if} * T_m + G_{if} * G_m * G_{lna} * T_{lna}]$$

$$P_n = K * W * [G_{if} * (T_{if} + G_m * T_m + G_m * G_{lna} * T_{lna})]$$

$$P_n = K * W * G_{if} * [G_m * (T_{if}/G_m + T_m + G_{lna} * T_{lna})]$$

$$P_n = K * W * G_{if} * G_m * [G_{lna} * (T_{if}/(G_m * G_{lna}) + T_m/G_{lna} + T_{lna})]$$

$$P_n = K * W * G_{if} * G_m * G_{lna} * [T_{if}/(G_m * G_{lna}) + T_m/G_{lna} + T_{lna}]$$

Donde:

$$T_{rx} = T_{if}/(G_m * G_{lna}) + T_m/G_{lna} + T_{lna} \quad (^\circ K) \quad (\text{Ec 2.3.49})$$

T_{rx} : Ruido equivalente de recepción ($^\circ K$)

2.3.10.2 Pérdida introducida por el cable en el sistema de recepción

Aunque la conexión entre la antena y el sistema de recepción se hace a través de un elemento pasivo (cable, guía de onda), este tiene una temperatura de ruido la cual contribuye con la temperatura equivalente del sistema.

Un componente pasivo con una pérdida se muestra en la figura 2.21:



Figura 2.21 Componente pasivo con una pérdida ' l_a '. J.P. Silver [19]

Figura de ruido $F = l_a$ (dB)

$$T_c = T_o * (l_a - 1) = T_o * (F - 1) \quad (^\circ K) \quad (\text{Ec 2.3.50})$$

$$l_a = 10^{(l_a(\text{dB})/10)} \quad (\text{Ec 2.3.51})$$

2.3.10.3 Temperatura equivalente del sistema (T_s)

$$T_s = T_{in} + T_{rx} \quad (^\circ K) \quad (\text{Ec 2.3.52})$$

$$\text{Donde } T_{in} = (T_{ant} + T_{sky} + T_c)/L_a \quad (^\circ K) \quad (\text{Ec 2.3.53})$$

$$T_s = (T_{ant} + T_{sky} + T_c)/L_a + T_{rx} \quad (^\circ K)$$

$$T_s = (T_{ant} + T_{sky})/L_a + T_o * (L_a - 1)/L_a + T_{if}/(G_m * G_{lna}) + T_m/G_{lna} + T_{lna} \quad (^\circ K) \quad (\text{Ec 2.3.54})$$

Donde:

T_s: Temperatura equivalente de ruido, es la suma de todos los componentes del ruido en el sistema de recepción (°K).

Estos componentes se listan a continuación

1. **T_{sky}** (Ruido de cielo): Depende del ángulo de elevación de la antena y de la frecuencia de trabajo. Se determina por la norma del CCIR Rep 720-2 y se muestra en la figura 2.22. (°K)

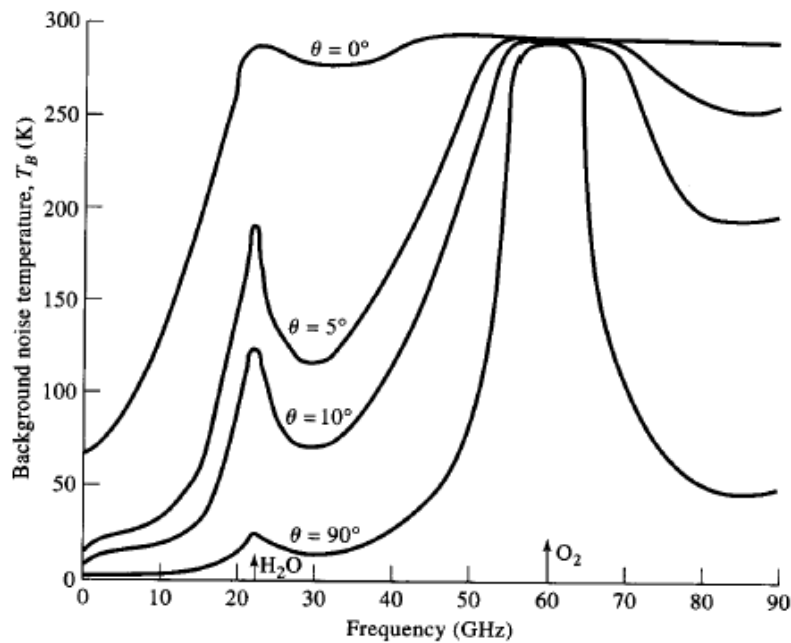


Figura 2.22 Temperatura de ruido en función de la frecuencia y el ángulo de elevación de la antena. [20]

2. **T_{ant}** (Ruido de antena): Incluye el ruido de desbordamiento en la antena, el ruido cósmico y el ruido atmosférico. Depende del ángulo de elevación de la antena y el peor caso que se puede tomar es para 5° . Los fabricantes

generalmente aportan los valores de T_{ant} en función de los ángulos de elevación.

3. **T_{at}** : Es el ruido que se produce en los alimentadores del sistema.

Donde ' $l_a(\text{dB})$ ' representa la pérdida en los alimentadores en dB y debe ser llevado a un valor numérico: $l_a = 10^{(l_a(\text{dB})/10)}$ **(Ec 2.3.55)**

Luego se obtiene la temperatura de ruido en los alimentadores mediante lo siguiente: $T_{at} = (l_a - 1) \cdot T_o$ (°K) **(Ec 2.3.56)**

4. **T_{LNA}** : Temperatura de ruido en el LNA; el fabricante proporciona este dato directamente en °K y la ganancia en dB.

5. **T_m** : Es el ruido producido en el Down Converter (D/C). Los datos proporcionados por el fabricante son el tipo de demodulación y la figura de ruido del D/C en dB; este último valor debe llevarse a su temperatura equivalente de T_{RX} mediante:

$$F_{RX} = 1 + (T_{RX}/T_o) \rightarrow T_{RX} = (F_{RX} - 1) \cdot T_o \quad (\text{°K}) \quad \textbf{(Ec 2.3.57)}$$

Teniendo en cuenta que $F_{RX} = 10^{(F_{rx}(\text{dB})/10)}$

6. **T_{if}** : es el ruido producido en los demoduladores y etapas If. (°K)
7. **T_{LNB}** : Temperatura de ruido que se produce en el bloque de bajo ruido. Los fabricantes proporcionan el valor de la figura de ruido (F_{LNB}) del LNB en dB
 $T_{LNB} = (F_{LNB} - 1) \cdot T_o$ (°K) **(Ec 2.3.58)**
Recordando que $LNB = LNA + D/C$. **(Ec 2.3.59)**

2.3.11 Relación Portadora a Ruido (C/N) [8]

Es la relación entre la potencia de la portadora recibida y la densidad espectral de ruido. Para determinar la eficiencia del receptor se debe hallar el ruido térmico total (T_{total}). La temperatura de ruido equivalente a T_{total} está localizada usualmente a la entrada del receptor.

El C/N está relacionado con la cantidad de información que puede ser recibida en un cierto ancho de banda y uno de los objetivos principales en el diseño de sistemas receptores, es mantener la temperatura de ruido lo más baja posible, para así poder lograr una relación portadora a ruido lo más grande posible.

$$C/N = PIRE - L_o - L_r - L_g - L_d + G/T_s - 10\log(K) - 10\log(AB) \text{ (dB)}$$

(Ec 2.3.60)

Donde:

$K \cdot T_s$: Potencia de ruido (Watts/Hz).

T_s : Ruido térmico total localizado a la entrada del receptor ($^{\circ}K$).

AB : Ancho de banda (Hz).

2.3.12 Relación Energía de bit a densidad de ruido (E_b/N_o) [8], [18]

Este parámetro es muy útil a la hora de evaluar el desempeño de enlaces digitales, ya que su resultado depende tanto del tipo de modulación, como de la velocidad de transmisión. Se puede calcular como muestra la ecuación 2.3.61.

La energía de bit (E_b) es la potencia recibida en la antena P_{rx} dividida por el recíproco de la frecuencia de transmisión (F_b).

$$E_b = P_{rx}/F_b \quad (\text{Watts/Hz}) \quad \textbf{(Ec 2.3.61)}$$

La densidad de ruido (N_o) se puede expresar como la potencia de ruido (N) dividida por el ancho de banda (AB), esto tomado de la **Ec 2.3.41**

$$N_o = N/AB \quad (\text{Watts/Hz}) \quad \textbf{(Ec 2.3.62)}$$

Ahora el cociente E_b/N_o expresado en dB quedaría de la siguiente forma:

$$E_b/N_o = C/N \text{ (dB)} - 10 \cdot \log(AB/F_b) \quad (\text{dB}) \quad \textbf{(Ec 2.3.63)}$$

Esta ecuación muestra que la relación energía de bit a densidad de ruido queda en función de la relación portadora a ruido y en función de la relación ancho de banda a frecuencia de transmisión. Si se dan una potencia de portadora, una tasa de bits y una temperatura de ruido; la E_b/N_o permanecerá constante e independiente del tipo de codificación, modulación o ancho de banda usado.

Ya que el ancho de banda recibido (AB), depende de la forma de modulación, se aíslan los parámetros de potencia del enlace normalizando la

dependencia del ancho de banda, por lo que la nueva relación portadora a ruido se muestra en las ecuaciones 2.3.64 y 2.3.65:

Tomando las ecuaciones 2.3.61 y 2.3.63 se tiene que:

$$\mathbf{C/No\ up = PIREest - Lo - Lr - Lg - Ld + Gsat/Ts - 10Log(K) \ (dBHz) \ (Ec.\ 2.3.64)}$$

Donde:

PIREest: Potencia disponible de la estación terrena en Tx (dBw).

$$\mathbf{C/No\ down = PIREfun - Lo - Lr - Lg - Ld + Gest/Ts - 10Log(K) \ (dBHz) \ (Ec.\ 2.3.65)}$$

Donde:

PIREfun: Potencia disponible del transpondedor en Tx. (dBw)

Una expresión más sencilla puede ser encontrada determinando la relación entre la portadora y la temperatura de ruido del sistema, esto se muestra en las ecuaciones 2.3.66 y 2.3.67.

$$\mathbf{C/Tup = PIREest - Lo - Lr - Lg - Ld + Gsat/Ts \ (dB/^{\circ}K) \ (Ec.\ 2.3.66)}$$

$$\mathbf{C/Tdown = PIREfun - Lo - Lr - Lg - Ld + Gest/Ts \ (dB/^{\circ}K) \ (Ec.\ 2.3.6)}$$

Siendo la relación entre C/No y C/T la que muestra la ecuación 2.3.68.

$$\mathbf{C/No = C/T - 10Log(K) \ (dBHz) \ (Ec.\ 2.3.68)}$$

Recordando que K es la constante de Boltzmann.

El cociente C/No permite además calcular directamente la relación entre la energía de bit recibida y la densidad de ruido como se muestra en las ecuaciones 2.3.69 y 2.3.70:

$$\mathbf{Eb/No\ up = C/No\ up - 10Log(Vel.\ Tx.) \ (dB) \ (Ec.\ 2.3.69)}$$

$$\mathbf{Eb/No\ down = C/No\ down - 10Log(Vel.\ Tx.) \ (dB) \ (Ec.\ 2.3.70)}$$

Donde:

Vel. Tx: Velocidad de transmisión (Bps)

Como se ha mencionado antes, para que un HPA trabaje adecuadamente tiene que estar al borde de la saturación. En la actualidad los satélites modernos utilizan los siguientes tipos de modulación: por conmutación de fase (PSK) y por amplitud cuadrática (QAM). Estos tipo de modulación pueden codificar varios bits en un solo elemento de señalización, por lo tanto este puede ser un parámetro más indicativo de la potencia de la portadora

2.3.13 Relación Potadora a ruido total en el sistema (C/N)total [8]

El cálculo de la (C/T)total se determina como se muestra en la ecuación 2.3.71:

$$1/(C/T)_{total} = \frac{1}{\frac{1}{(C/T)_{up}} + \frac{1}{(C/T)_{down}} + \frac{1}{(C/T)_I}} \quad (\text{Ec 2.3.71})$$

Donde:

(C/T)_{up}: Relación portadora a temperatura de ruido en el enlace de subida.

(C/T)_{down}: Relación portadora a temperatura de ruido en el enlace de bajada.

(C/T)_I: Relación portadora a temperatura de ruido de intermodulación.

Nota: Estas cantidades deben emplearse en la ecuación 2.3.71 como valores numéricos.

2.3.13.1 Ruido de interferencia por señales polarizadas ortogonalmente

$$(C/T)_I = C/I_{3M}(\text{dB}) + 10\text{Log}(AB_{\text{sig}}) - 228.6\text{dB} \quad (\text{dB}) \quad (\text{ec. 2.3.72})$$

Donde el AB ocupado por la portadora se refiere a la portadora para la cual el cálculo se está realizando.

C/I_{3M}: es la relación entre la portadora y la interferencia proveniente de otros sistemas, se obtiene en las especificaciones del satélite Simón Bolívar.(dB)

$$(C/N)_{\text{total}} = (C/N_0)_{\text{total}} - 10 \cdot \log(BW_{\text{asig}}) \text{ (dB)} \quad (\text{ec. 2.3.73})$$

C/N_0 : se determina usando la relación expuesta en la ecuación 2.3.68 y usando el resultado obtenido en 2.3.71

2.3.14 Modulación Digital

La modulación tiene como objeto adaptar la información digital al medio radioeléctrico por el cual esta se va a transmitir. El modulador es un circuito de producto o multiplicador realizado generalmente mediante un puente de diodos (modulador balanceado) que trabaja a una frecuencia intermedia (35, 70, 140 Mhz, etc...) entre la banda base y la radiofrecuencia.

Ventajas de la modulación digital:

1. Inmunidad frente al ruido
2. Fácil de multiplicar
3. Codificado, encriptación
4. Modulación / Demodulación con DSP (Digital Signal Processing)

2.3.14.1 BER (Bit Error Rate)

Es una medida que permite cuantificar la confiabilidad de un sistema de comunicación, mediante el conteo de bits errados en cierta cantidad de bits enviados. Si se tiene una señal fuerte con una trayectoria sin perturbaciones, el BER representa una cantidad casi insignificante. El momento en que este valor adquiere mayor relevancia, es cuando se quiere mantener una relación Señal a Ruido (C/N) a través de un sistema que presente múltiples dispositivos electrónicos y un medio de propagación más hostil.

2.3.14.1.1 BER y Ruido:

El ruido es un proceso aleatorio que se representa como una función de densidad de probabilidad Gaussiana; este se origina por los distintos dispositivos presentes en la trayectoria que sigue una señal.

2.3.14.1.2 Factores que afectan al BER:

Una forma de disminuir la densidad espectral de ruido, es reduciendo el ancho de banda; pero este está limitado por los requerimientos necesarios para transmitir la tasa de bits deseada (Criterio de Nyquist). Se puede incrementar la energía por Bit, usando mayor potencia de transmisión; pero la interferencia que se generaría con otros sistemas satelitales aledaños sería una limitante. Por otro lado, disminuyendo la tasa de Bits aumentaría la energía por Bit, pero esto haría que se perdiera capacidad de transmisión. La mejor opción sería optimizar la relación E_b/N_0 , donde E_b se determina dividiendo la potencia de la portadora entre la tasa de bits y N_0 es el ruido en Joules/Hz.

La figura 2.23 muestra una gráfica de la relación entre la probabilidad de error esperada (BER) y la relación portadora a ruido mínima requerida para cumplir con esa probabilidad de error; esto para las modulaciones: BPSK, QPSK, 8PSK y 16PSK. La relación portadora a ruido especificada es para el ancho de banda mínimo doble según Nyquist.

La figura 2.24 muestra la relación gráfica entre la probabilidad de error esperada o BER y la relación energía de bit a densidad de ruido mínima para cumplir con esa probabilidad de error.

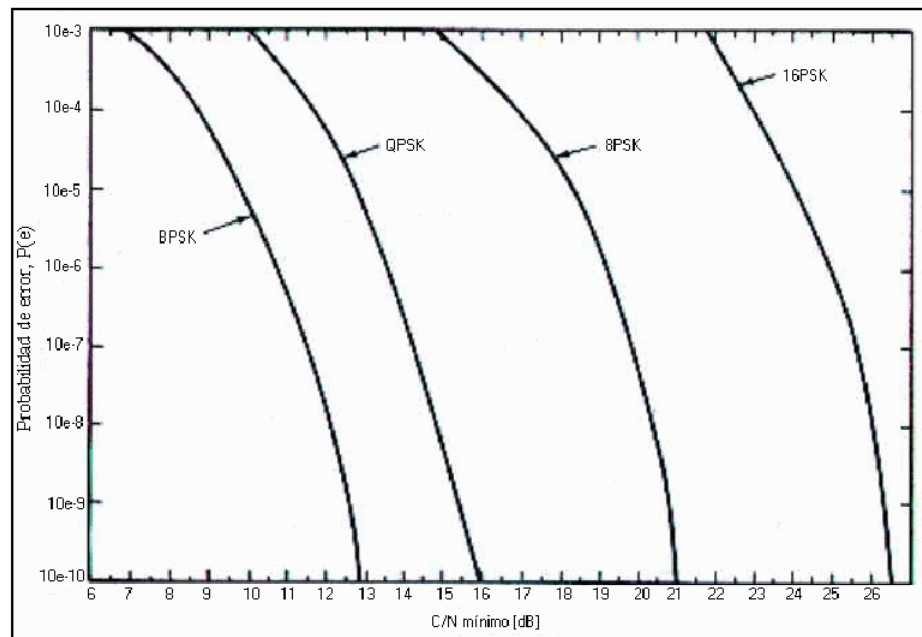


Figura 2.23 Relación entre BER y C/N. [18]

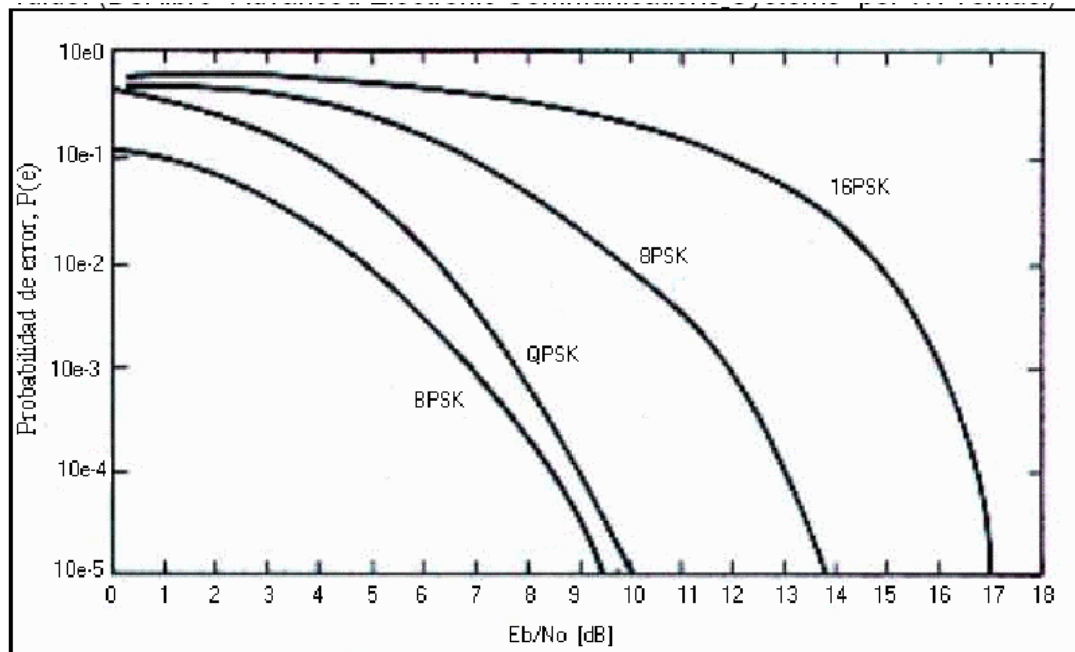


Figura 2.24 Relación entre BER y E_b/N_0 . [18]

2.3.14.2 Modulación PSK (Phase Shift Keyed)

Es una forma de modulación angular que consiste en hacer variar la fase de la portadora entre un número de valores discretos, donde la señal moduladora es una señal digital la cual tiene un número de estados limitado. PSK recibe diferentes denominaciones dependiendo del número de fases que se tomen; este numero es potencia de dos y se obtiene mediante lo siguiente: $M=2^n$ (Ec 2.3.74)

M: Número de fases.

n: varía de 2 a 16.

Las modulaciones BPSK y QPSK son óptimas desde el punto de vista de protección frente a errores; pero para el caso de 8-PSK y 16-PSK o superiores existen otras modulaciones más eficientes.

La gran ventaja de las modulaciones PSK es que la potencia de todos los símbolos es la misma, por lo que se simplifica el diseño de los amplificadores y etapas receptoras, dado que la potencia de la fuente es constante.

La figura 2.25 presenta un diagrama de constelación donde se muestra la relación de amplitud y fase de una portadora modulada digitalmente en BPSK:

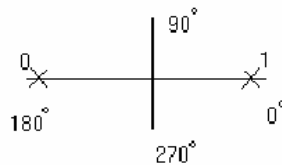


Figura 2.25 Modulación BPSK

2.3.14.3 Ancho de banda ocupado en modulación digital:

El ancho de banda real en hz que ocupa una portadora determinada, depende tanto de la velocidad de transmisión como del tipo de modulación que se esté aplicando. La ecuación 2.3.75 permite realizar el cálculo de este ancho de banda como se muestra a continuación:

$$AB_{\text{mod. dig.}} = \frac{\text{Vel. Tx}}{2 * \log_2(M)} \quad (\text{Hz}) \quad (\text{Ec. 2.3.75})$$

Donde:

Vel. Tx: Es la velocidad de transmisión en Bps.

M: Número de fases (obtenido de la Ec. 2.3.74)

2.3.15 Velocidades de transmisión y ancho de banda de ruido [21]

El ancho de banda asignado para una portadora, es dependiente tanto de la velocidad de transmisión, como del tipo de modulación. Para minimizar la interferencia entre portadoras adyacentes, es necesario controlar la energía espectral alcanzada dentro del ancho de banda asignado para una portadora adyacente. Un ancho de banda asignado es definido por una portadora cuya energía total alcanzada fuera de este, no cause una excesiva interferencia de portadora adyacente. Este ancho de banda se determina agregando al ancho de banda original ocupado, lo que se conoce como margen de ruido, garantizando un mínimo de interferencia entre portadoras adyacentes. Para modulaciones QPSK se asume la siguiente relación entre el ancho de banda original ocupado por la portadora y el ancho de banda asignado total incluyendo el margen de ruido.

$$AB_{\text{asig}} = AB_{\text{ocup}} * 1,35 \quad (\text{Ec. 2.3.76})$$

Donde:

AB_{asig}: Ancho de banda total considerando el margen de ruido.

AB_{ocup}: Ancho de banda original, dependiente de la velocidad de transmisión y del tipo de modulación.

2.3.16 El transpondedor en el satélite [8], [18]

Los transpondedores satelitales tienen la función de recibir señales desde la tierra y retransmitirlas nuevamente al suelo terrestre, similar a un repetidor, luego de amplificarlas y trasladarlas en frecuencia. Igualmente pueden desempeñar funciones más complejas en las que se incluyen: detección de la señal, demodulación, demultiplexación, remodulación y ruteo de los mensajes.

Los recursos del satélite están compartidos entre varias estaciones terrenas, cada una con diferentes estándares y por lo tanto, con distintos requerimientos.

Los canales en los satélites de comunicación son llamados transpondedores, ya que cada uno de estos por separado es un transmisor / receptor y repetidor. Con la compresión de data en la transmisión de video digital y la multiplexación, una gran cantidad de canales de audio y video pueden viajar a través de un solo transpondedor en una sola portadora en banda ancha.

Adicionalmente al ancho de banda, los parámetros a ser tomados en cuenta para un transpondedor dado son:

1. Densidad de flujo de saturación (dBW/m^2): Es la densidad de flujo de la potencia total que llega al satélite desde la tierra, lo cual producirá la saturación de PIRE del satélite.
2. G/T recibido (dB/K): es la relación entre la ganancia y la temperatura de ruido en el satélite. (Dato proporcionado por el fabricante)
3. PIRE de saturación (dBw): Potencia de saturación de transmisión del transpondedor.

2.3.16.1 Punto de operación del transpondedor [8]

El amplificador de potencia (HPA) en la salida del transpondedor es un dispositivo no lineal, su ganancia es dependiente del nivel de señal de entrada. Debe ser operado por debajo del punto de saturación, para evitar distorsiones por intermodulación; esto se logra haciendo un back-off de entrada. Esto es un desperdicio de potencia disponible en un TWTA típico. Para minimizar esta pérdida de potencia ocasionada por el Back-Off, se usan dos métodos: Uno consiste en usar SSPAs como amplificadores de potencia en la salida.; el otro consiste en el uso de TWTAs pero con linealizadores (LTWTA), para las aplicaciones que requieren altos niveles de potencia. Ambos métodos mejoran la característica en cuanto a Productos de Intermodulación (IM) del transpondedor.

Pero para operar de la manera más eficiente, el amplificador debe ser colocado lo más cerca posible del punto de saturación, tomando en consideración la potencia de saturación de salida del amplificador (PIREsat (dBw)).

1. **IBO (Input Back-Off):** Es la reducción de potencia en la entrada del transpondedor. (Dato proporcionado por el fabricante)
2. **OBO (Output Back-Off):** Es la reducción de potencia en la salida del transpondedor. Este valor se puede determinar a partir de la ec. 2.3.77. y es característico para los transpondedores usados en el satélite Simón Bolívar.
$$OBO = (4 \cdot IBO)^{0,5} \text{ (dB)} \quad \text{(Ec. 2.3.77)}$$

Para efectos de diseño en el enlace descendente, se debe calcular la potencia de transmisión del transpondedor según la ecuación 2.3.78:

$$PIRE_{fun} = PIRE_{sat} - OBO - 10\log(AB_{trans}/AB_{sig}) \text{ (dBw)} \quad \text{(Ec. 2.3.78)}$$

Donde:

PIRE_{fun}: Potencia disponible de transmisión del transpondedor (dBw).

PIRE_{sat}: Potencia de saturación de transmisión del transpondedor. Como se puede observar en los anexos 7, 8, 9 y 10, el PIRE_{sat} varía dependiendo de la posición geográfica donde se encuentre la estación terrestre (dBw).

OBO: Reducción de potencia de salida (dB).

AB_{sig}: Ancho de banda asignado (Hz).

AB_{trans}: Ancho de banda del transpondedor (Hz).

Para el enlace ascendente, se calcula la densidad de flujo nominal a la entrada del satélite a través de la ecuación 2.3.79:

$$SDF_{nom} = SDF_{sat} - IBO - 10\log(AB_{trans}/AB_{sig}) \text{ (dBw/m}^2\text{)} \quad \text{(Ec. 2.3.79)}$$

Donde:

SDF_{nom}: Densidad de Flujo de Saturación nominal del satélite (dBw/m^2).

SDF_{sat}: Densidad de Flujo de Saturación del satélite. Dato proporcionado por el fabricante. (dBw/m^2).

2.3.16.2 Consideraciones a tomar en cuenta en el uso del transpondedor

El satélite Simón Bolívar posee varios haces de cobertura, correspondientes a cada una de las bandas de frecuencia en las cuales se va a trabajar. Para realizar los cálculos se usará el PIRE en el borde más alejado de cada uno de los haces, esto para trabajar con los casos donde la PIRE sea menor y así asegurar el mejor desempeño en la totalidad de la cobertura.

El ancho de banda en los transpondedores será distribuido entre los distintos servicios que se prestarán. En los cálculos es necesario determinar este ancho de banda requerido para un enlace en particular (ya sea para telefonía, internet, video, televisión, servicios privados, etc.); así como también tener en cuenta el tipo de portadora que se utilizará. En este satélite se usarán solo portadoras digitales. En la estación terrena, una misma antena puede ser utilizada para transmitir y recibir más de una portadora a la vez, pero se debe tener en cuenta que cada portadora usa un ancho de banda especialmente asignado para ella dentro del transpondedor. El ancho de banda total del transpondedor puede ser utilizado por diferentes portadoras, pero cada una tiene su ancho de banda asignado sin posibilidad de traslado; además cada transpondedor tiene su propio amplificador de potencia.

2.3.17 Cálculo del HPA en la estación terrena en Tx [8]

El valor del HPA que se va a usar en la estación terrena es de suma importancia, ya que se debe garantizar que la potencia transmitida desde las estaciones terrenas, sea suficientemente alta para poder ser recibida por el satélite. El cálculo de este parámetro para una velocidad de transmisión y una portadora dada, se muestra en la ec. 2.3.80.

$$P_{HPA} (\text{Una portadora}) = SDF_{nom} + L_o + L_r + L_g + L_a + L_d - G_{1m} - G_{tx} \text{ (dBw)}$$

(Ec. 2.3.80)

Donde:

SDF_{nom} : Densidad de Flujo de Saturación nominal del Satélite, en (dBw/m²)

L_o : Pérdidas por espacio libre (dB).

L_r : Pérdidas por lluvia (dB).

L_g : Pérdidas por gases atmosféricos (dB).

L_a : Pérdidas en los alimentadores (dB).

G_{1m^2} : Ganancia para una antena de 1m² con una eficiencia del 100% (dBi).

G_{tx} : Ganancia de la antena transmisora (dBi).

Para obtener el valor del HPA en watts, para una portadora, se debe aplicar la ecuación 2.3.81:

$$P_{HPA} = 10^{P_{HPA}(\text{dBw})/10} \text{ (Watts)} \text{ (Ec. 2.3.81)}$$

Ahora, para determinar la P_{HPA} total en Watts, que se deberá utilizar en la estación terrena, para transmitir todo el tráfico requerido, se deben tomar en cuenta el número de portadoras utilizadas por cada velocidad de transmisión. Esto se muestra en la ecuación 2.3.82.

$$P_{HPA} \text{ total} = P_{HPA(V_{tx1})} * N^{\circ} \text{ portadoras}_{(V_{tx1})} + P_{HPA(V_{tx2})} * N^{\circ} \text{ portadoras}_{(V_{tx2})} + P_{HPA(V_{tx3})} * N^{\circ} \text{ portadoras}_{(V_{tx4})} + \dots + P_{HPA(V_{txn})} * N^{\circ} \text{ portadoras}_{(V_{txn})} \text{ (Watts)}$$

(Ec. 2.3.82)

2.3.18 Datos del Satélite Simón Bolívar

Los datos presentados en la tabla 2.4 fueron proporcionados, en su totalidad por CANTV y representan valores teóricos. Las huellas del satélite en las tres bandas, pueden consultarse en los anexos 3, 4, 5 y 6.

Posición orbital: 78° longitud Oeste

Tabla 2.4 Datos de la carga útil del satélite Simón Bolívar. [22]

	Banda C	Banda Ku	Banda Ka
No. de Transpondedores	14	12	2
No. De Haces	1	2	1
Up Link (MHz)	6050~6425	14090~14480	28800~29100
Down Link (MHz)	3825~4200	11290~11680	19000~19300
G/T (dB/K)	-5	6	3.8
SDF(dBw/m2)	$-(76+G/T) \sim -(96+G/T)$	$-(75+G/T) \sim -(95+G/T)$	$-(63+G/T) \sim -(83+G/T)$
PIREsat (dBw)	40,7	53,2	48.8
IBO (dB)	6	6	6
OBO(dB)	4,89	4,89	4,89
C/I 3M (dB)	16	10	N/A

2.3.19 Bandas de frecuencia

En la tabla 2.5 se muestra una comparación detallada entre las 3 bandas de frecuencia (C, Ku y Ka):

Tabla 2.5 Comparación entre las bandas de frecuencia C, Ku y Ka

	Banda C	Banda Ku	Banda Ka
Rango de frecuencias	- Bajada: 3.7-4.2 Ghz - Subida 5.9-6.4Ghz	- Bajada: 11.7-12.7 GHz - Subida: 14-17.8 Ghz	- Bajada: 18.3–18.8 Ghz - Subida: 19.7–20.2 GHz
Ventajas	- Confiable bajo condiciones adversas. - Disponibilidad mundial. - Tecnología más barata	-Longitudes de onda medianas que traspasan la mayoría de los obstáculos. - Transportan gran cantidad de datos - estaciones pequeñas entre 0.45 y 1.5m	- Amplio espectro de ubicaciones disponible - Las longitudes de onda transportan grandes cantidades de datos. - Estaciones más pequeñas (0.6 a 1.8m) - Mejor uso de la capacidad del satélite (técnicas más eficientes FDMA y TDMA frente a CDMA).
Desventajas	- Grandes interferencias de satélites adyacentes y microondas terrestres. - Grandes estaciones (1.3m)	- La mayoría de las ubicaciones están adjudicadas. - Susceptible a la lluvia. - Tecnología costosa.	- Son necesarios transmisores muy potentes - Sensible a interferencias ambientales.
Servicios	- Comunicaciones satelitales abiertas - Redes de TV pos satélite - SCPC	- Internet satelital - Edición y radiodifusión de televisión por satélite. - Redes educativas - Redes de negocios - Telemedicina	- Servicios de banda ancha - DTH - HDTV

2.3.19.1 Acerca de la banda Ka

El espectro de frecuencia de esta banda ha ganado atención recientemente gracias a los lanzamientos exitosos de varios servios satélites, los cuales utilizan las ventajas de la transmisión en frecuencias elevadas. Una señal de 19Ghz transmitida desde un satélite hacia la tierra, tiene la ventaja de formar un ancho de haz pequeño, lo cual permite disponer de huellas más pequeñas, poder reusar un mayor número de frecuencias y obtener potencias más elevadas.

Todas las antenas parabólicas tienen características similares y es generalmente cierto que el ancho del haz será más estrecho por dos razones: mientras más grande sea la antena y mientras mayor sea la frecuencia. Trabajar con un haz tan estrecho, requiere considerar de forma particular los siguientes elementos: regularidad en la superficie de la antena, alta exactitud en la alineación con el satélite, cálculos de la atenuación por lluvia, etc... Con la banda Ka se pretende ofrecer servicios de banda ancha, video DTH (Direct To Home) y HDTV entre otros. Según estudios publicados por la Comisión Federal de Telecomunicaciones Mexicana, se espera que para el año 2010 en los Estados Unidos la mitad del mercado esté dominada por sistemas operados en banda Ka. mientras que la otra mitad será manejada por las bandas C y Ku en conjunto.

DTH (direct-to-home): son transmisiones directas al público desde satélites geoestacionarios, logrando la convergencia de medios a partir de un único soporte. Así, en la actualidad, los sistemas DTH son capaces de distribuir, además de TV, Internet y los nuevos servicios de TV de Alta Definición (HDTV), DTH puede cubrir grandes áreas, como aquellas donde la infraestructura de los operadores de TV por cable es débil y la televisión tradicional no está presente, un claro ejemplo de las zonas montañosas ó rurales.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Datos geográficos de las estaciones remotas (clientes)

El cálculo del enlace se realizó en base a la ubicación predeterminada de la estación de respaldo (San Tomé, Estado Anzoátegui) y del satélite Simón Bolívar; además de la ubicación tentativa de algún cliente dentro del territorio nacional. En principio se consideraron tres puntos de referencia donde se podrían colocar estaciones terrenas para clientes, tomando el punto más alejado de los haces del satélite dentro del territorio Venezolano, en cada una de las bandas de frecuencia; esto para estimar un buen desempeño del enlace al momento de realizar los cálculos. Debido a la ubicación orbital del satélite (78°O), estas tres ubicaciones se fijaron en los siguientes estados; cuyas características geográficas se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Ubicación estaciones terrenas clientes

Ubicación	Amazonas	Delta Amacuro	Zulia
Latitud ($^{\circ}$)	1° N	8° N	9° N
Longitud ($^{\circ}$)	66° O	60° O	73° O
Ángulo elevación θ ($^{\circ}$)	$75,88^{\circ}$	$67,01^{\circ}$	$77,94^{\circ}$
Azimut real($^{\circ}$)	$94,69^{\circ}$	$113,16^{\circ}$	$150,77^{\circ}$
Distancia (Km)	36163,3091	36431,68	36119,2

Luego de analizar las características de estas tres zonas, se eligió trabajar con aquella que representara el peor caso: Delta Amacuro. La elección se hizo tomando en cuenta dos factores: menor ángulo de elevación y mayor distancia hasta el satélite. Es importante mencionar, que según la Rec UIT–R P.837 la intensidad de lluvia R es 95mm/hr , para todo el territorio venezolano. Además, mientras el ángulo de elevación (θ) sea menor, mayor será la atenuación producida por los efectos ambientales.

3.2 Datos geográficos de las estación terrena de respaldo (Hub)

La estación de respaldo de servicios estará ubicada en la población de San Tomé, Estado Anzoátegui y será construida en instalaciones pertenecientes a PDVSA.

Coordenadas geográficas:

Longitud: 64° 08' O

Latitud: 8° 57' N

Azimut: 57,81° Como el satélite está ubicado al suroeste de esta estación terrena, el azimut real es: $\text{Azimut real} = 180^\circ - 57,81^\circ = 122,19^\circ$ (Ver sección 2.3.5.2)

Tabla 3.2 Datos de la estación terrena de respaldo servicios (Hub)

Ubicación	San Tomé Edo. Anzoátegui
Latitud	8° 57'N
Longitud	64° 08'O
Ángulo elevación θ	70,72°
Azimut real	122,19°
Distancia (Km)	36304,2055Km

Tabla 3.3 Parámetros estación terrena de respaldo (Hub) en Tx banda C, Ku y Ka

San Tomé	Banda C	Banda Ku	Banda Ka
Frecuencia de trabajo(Ghz)	6	15	29
Diámetro de la antena Tx (m)	13	13	9
Ganancia de Tx (dBi)	57,37	65,32	71,05
Eficiencia de la antena	0,65	0,7	0,7
Lo up (dB)	199,16	207,12	212,84

El enlace se dividió en dos secciones: Subida (Hub → Satélite) y Bajada (Satélite → Cliente). En la banda C y Ku, los servicios que se prestarán serán bidireccionales y los cálculos implicarán al enlace completo de ida (Hub → Satélite → Cliente) y de vuelta (Cliente → Satélite → Hub). Para la banda Ka, como no se tienen especificados los servicios que se van a prestar, el cálculo se realizó solo para el trayecto de ida.

Hasta los momentos los datos de la carga útil del satélite son teóricos, ya que las pruebas prácticas solo se podrán realizar cuando este dispositivo esté en órbita.

3.3 Lineamientos a seguir por parte de CANTV

Cada una de las bandas de frecuencia con las cuales trabajará el satélite, tendrá una función específica y canalizará ciertos servicios en particular. Es importante mencionar que en las tres bandas, la modulación que se utilizará será QPSK mientras que la polarización será de tipo lineal (vertical u horizontal); en ningún caso se utilizará polarización circular. Además todas las portadoras serán digitales, no se trabajará con portadoras analógicas. La mayoría de servicios que se prestarán serán fijos y en muy pocos casos, móviles; para estos últimos, se debe considerar la pérdida por alineamiento y seguimiento de la antena (L_d) (Sección 2.3.7.7).

En los cálculos se tomó en cuenta esta pérdida, para cumplir en todo momento el lineamiento de trabajar con el peor caso. Todos los terminales para los clientes serán de tipo VSAT. En cuanto a las atenuaciones causadas por efectos atmosféricos consideradas en los cálculos del enlace, se tomó un porcentaje de 0,1% del tiempo. Igualmente se realizó un estudio para otros porcentajes de tiempo, buscando tener una idea más clara de estos efectos.

Las huellas de variación de la PIREsat y del G/T_{sat} con respecto a la posición geográfica de las estaciones terrenas, se usó para las bandas C Y Ku. En el caso de la banda Ka, no se contó con esta información. por lo que se trabajó con el valor de PIREsat máximo (48,8 dBw) y G/T_{sat} máximo (3,8 dB/°K).

3.3.1 Banda C

Se prestará únicamente el servicio bidireccional SCPC, mediante el cual los clientes tendrán la posibilidad de alquilar un cierto ancho de banda de forma exclusiva, sin necesidad de compartirlo con otros usuarios; estableciendo con esto, enlaces dedicados entre las sedes del cliente. Esto se traduce en un servicio más seguro; pero a la vez más costoso. La estimación de clientes que se tiene tanto para

los años 2009 como 2011 se presenta en la tabla 3.4 y los cálculos correspondientes se presentan en los anexos 12 y 13.

Tabla 3.4 Demanda Satelital CANTV Banda C SCPC. [23]

Vel. Tx. (Kbps)	Clientes Año 2009	Clientes Año 2011
64	2	2
128	8	18
256	11	34
512	38	99
1024	24	250
1536	2	7
2048	15	125
4096	2	2
Total Clientes		537

El número de clientes coincide con el número de portadoras que se utilizarán en el transpondedor, recordando que este será un servicio dedicado. Además hay que señalar que para prestar este servicio, a cada cliente se le debe asignar un módem SCPC particular, es decir que se necesitarían 537 módems.

Habrán 12 transpondedores en total teniendo cada uno, una capacidad de 36Mhz. En la figura 3.1 se puede observar un diagrama básico de como se manejará el servicio SCPC.

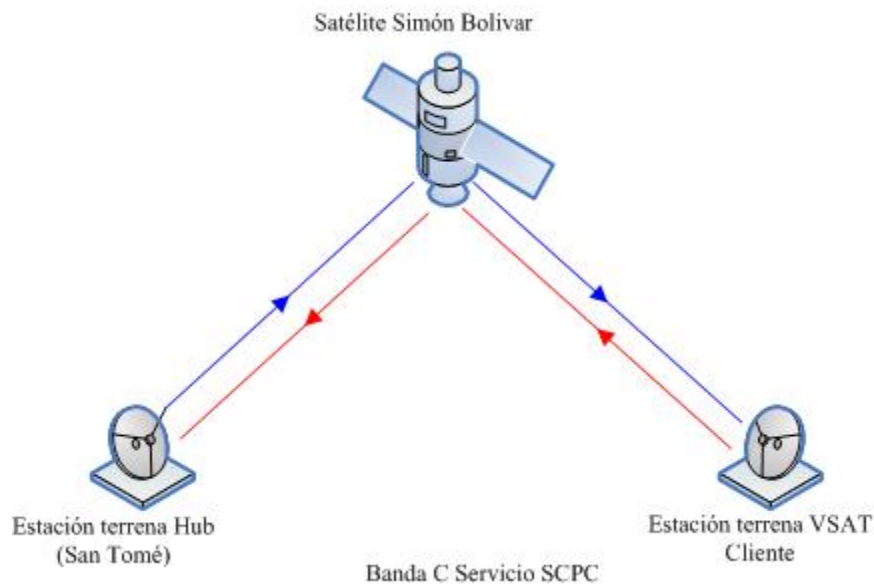


Figura 3.1 Diagrama del sistema en Banda C mediante el cual se prestará el servicio SCPC

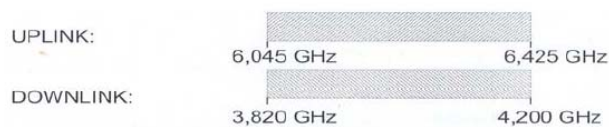


Figura 3.2 Asignación de frecuencias banda C. [22]

3.3.2 Banda Ku

Dentro de esta banda, se canalizarán principalmente los servicios de Internet VSAT los cuales permitirán un mayor ahorro de ancho de banda, ya que este será compartido entre varios clientes a la vez. En este caso una sola portadora será capaz de transportar a varios usuarios al mismo tiempo, mediante técnicas de agregación y consideraciones del porcentaje de uso simultaneo de las estaciones de los clientes. El servicio de internet será de tipo asimétrico; esto quiere decir que las velocidades de bajada y de subida serán distintas. La transmisión de información se dividirá en dos secciones, Outbound (Hub→Sat→Cliente) e Inbound (Cliente→Sat→Hub). El

Outbound está formado por una portadora de gran tamaño, la cual distribuye la información desde el hub hacia las estaciones de los clientes. El inbound está constituido por la información transmitida desde los clientes hacia el hub; siempre pasando por el satélite, en ambos casos.

Las ráfagas de información producidas en el inbound, no se dan continuamente y además tienen un ancho de banda relativamente pequeño; por lo que se busca aprovechar al máximo las capacidades del sistema, mediante el uso de técnicas de agregación a través de TDMA. Esto consiste en poder canalizar y distribuir la información de varios clientes, a través de una sola portadora. Hay varios grados de agregación, por ejemplo 1/8 quiere decir que en una portadora pueden ser llevados 8 clientes y así sucesivamente. En cuanto al porcentaje de uso de las estaciones, este será de 20%; esto quiere decir que se estima que 20% de las estaciones VSAT de los clientes estén en uso al mismo tiempo. El protocolo usado para los servicios de internet satelital será IP.

Al igual que para los cálculos hechos en banda C, en este caso las estimaciones de usuarios se hicieron para los años 2009 y 2011 (tabla 3.5). Para esta banda se tendrán disponibles 12 transpondedores de 54 Mhz cada uno. Para conocer los cálculos detallados, se deben consultar los anexos 14 y 15.

Tabla 3.5 Demanda Satelital CANTV Banda Ku. [23]

Vel. Tx. (Kbps)	Clientes Año 2009	Clientes Año 2011
128	268	446
256	136	227
512	2546	3065
1024	0	2
Total clientes		3740

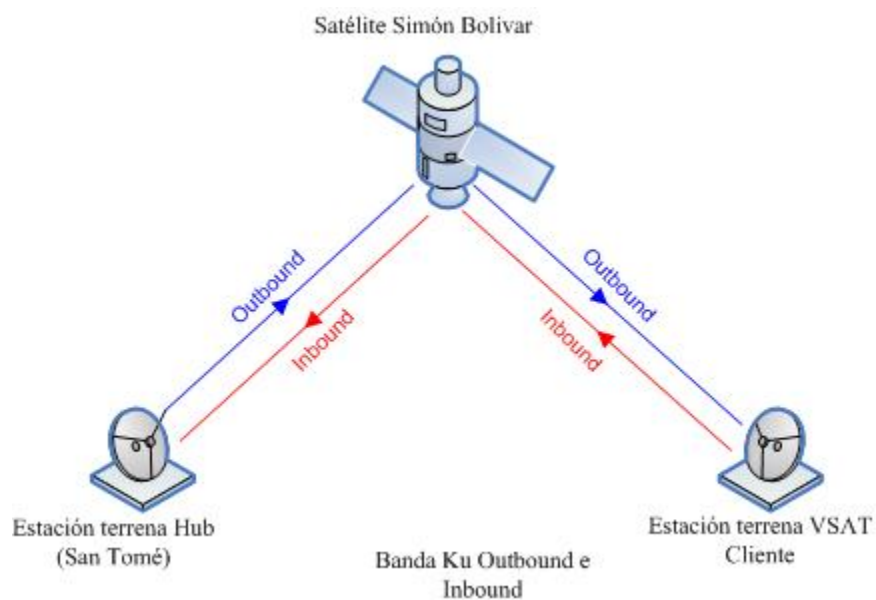


Figura 3.3 Diagrama del sistema en Banda Ku con las direcciones de transmisión del Outbound y el Inbound

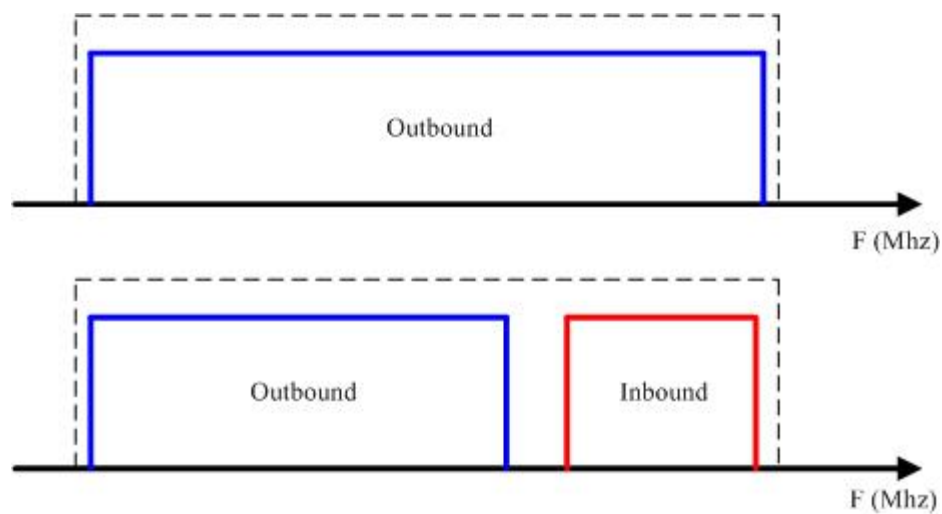


Figura 3.4 Posibles distribuciones del ancho de banda en los transpondedores de Banda Ku

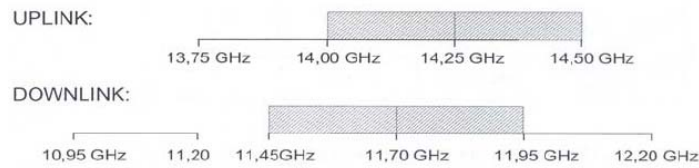


Figura 3.5 Asignación de frecuencias banda Ku. [22]

3.3.3 Banda Ka:

CANTV hasta los momentos no ha definido exactamente, que servicios serán distribuidos a través de esta banda. Esto se debe a que a estas frecuencias tan elevadas, las atenuaciones por lluvia y por gases atmosféricos son muy importantes; por lo tanto se debe determinar claramente si las condiciones climáticas de Venezuela, permitirán la utilización de la banda Ka en forma viable. Para este caso se dispondrá de 2 transpondedores con capacidad de 120 Mhz cada uno. Hubo valores necesarios para culminar los cálculos con los que no se pudo contar, debido a las razones antes expuestas. Por lo tanto los cálculos que se pudieron realizar, son presentados y explicados más adelante.

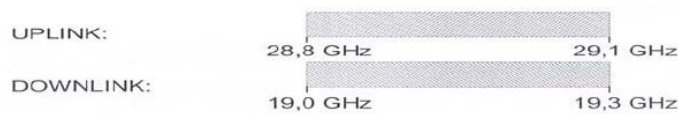


Figura 3.6 Asignación de frecuencias banda Ka. [22]

3.4 Resumen de cálculos para las bandas C, Ku y Ka:

A continuación se presenta un resumen de los cálculos realizados en las tres bandas de trabajo, únicamente para una sola velocidad de transmisión 512 Kbps. El satélite operará tanto en polarización vertical como en horizontal, pero se trabajó con la segunda, ya que solo se contó con las curvas de variación de PIREsat y G/Tsat en esta polarización. (Anexos 8, 9, 10 y 11)

Para conocer los resultados obtenidos en las demás velocidades de transmisión y otros detalles se pueden consultar los anexos 12, 13, 14, 15 y 16. En

los cálculos presentados se muestran los datos utilizados y el número de ecuación correspondiente para ir obteniendo cada uno de los parámetros buscados.

En las bandas C y Ku, se contó con dos estimaciones de clientes tanto para el año 2009 como para el 2011. En este resumen solo se mostrará el procedimiento seguido para la estimación correspondiente al año 2011, ya que para el 2009 el cálculo es similar. En estos cálculos específicos destacan para cada una de las bandas, lo siguiente: el valor del HPA total requerido en el hub, el ancho de banda total que se ocupará en el satélite, el número total de transpondedores necesarios para canalizar a todos los clientes estimados en la demanda y el C/N total.

En la banda Ku, se consideró tanto el tráfico ocupado por el outbound como por el inbound, ya que estos deberán compartir el ancho de banda limitado en los transpondedores satelitales. Con el ancho de banda total requerido, se procedió a hacer una distribución tentativa del Outbound y del Inbound en los transpondedores del satélite; para así poder escoger la capacidad y cantidad de moduladores y demoduladores DVB-RCS que se utilizarán.

Los cálculos referentes a Ángulo de elevación, Azimut y Distancia entre el satélite y la estación terrena, se muestran para la ubicación específica del hub. El procedimiento para obtener esta información en las estaciones de los clientes, es exactamente el mismo.

3.4.1 Ángulo de elevación (θ)

Datos: Lat. est., Long. est., Long. sat.

Usando la ec. 2.3.10

$$\theta = 70,72^\circ$$

3.4.2 Azimut (Azm)

Datos: Lat. est., Long. est., Long. sat.

Usando la ec. 2.3.11:

$$\text{Azm.} = 57,81^\circ$$

Como el satélite se encuentra al suroeste de la estación terrena $Az. \text{ real} = 180^\circ - Azm.$

$$Az. \text{ real} = 180^\circ - 57,81^\circ = 122,19^\circ$$

3.4.3 Distancia entre el satélite y la estación terrena (Dist.)

Datos: $\theta(^{\circ})$

Con la ec. 2.3.12:

$$Dist. = 36.304,2055 \text{ Km}$$

3.4.4 Enlace Subida Hub-Satélite

3.4.4.1 Pérdida por espacio libre (Lo)

Datos: Dist (Km) y Frec. (Ghz)

Utilizando la ec. 2.3.6:

$$Lo = 199,16 \text{ dB (Banda C)}$$

$$Lo = 207,12 \text{ dB (Banda Ku)}$$

$$Lo = 212,84 \text{ dB (Banda Ka)}$$

3.4.4.2 Ganancia de la antena transmisora (Gtx)

Datos: Efic. Ant. Tx, Diám. Ant. Tx(m) y Frec.(Ghz).

Usando la ec. 2.3.2:

$$Gtx = 57,37 \text{ dBi (Banda C)}$$

$$Gtx = 65,32 \text{ dBi (Banda Ku)}$$

$$Gtx = 67,86 \text{ dBi (Banda Ka)}$$

3.4.4.3 Ancho de banda ocupado en modulación digital (AB ocup)

Datos: Vel. Tx (Kbps), Núm. niveles Mod. y FEC.

Utilizando la ec. 2.3.75:

$$AB \text{ ocup} = 0,1706 \text{ Mhz (Banda C, Ku y Ka)}$$

3.4.4.4 Ancho de banda asignado (ABasig)

Dato: AB ocup.

Con la ec. 2.3.76:

$$AB_{sig} = 0,2304 \text{ Mhz (Banda C, Ku y Ka)}$$

3.4.4.5 Densidad de Flujo de Saturación del Satélite (SDFnom)

Datos: SDFsat (dBw/m²), IBO (dB), AB transp. (Mhz)

Por medio de la ec. 2.3.79:

$$SDF_{nom} = -118,94 \text{ dBw/m}^2 \text{ (Banda C)}$$

$$SDF_{nom} = -112,69 \text{ dBw/m}^2 \text{ (Banda Ku)}$$

$$SDF_{nom} = -102,37 \text{ dBw/m}^2 \text{ (Banda Ka)}$$

3.4.4.6 Ganancia de una antena de 1m² con eficiencia de 100% (G1m²)

Datos: Frec. (Ghz)

Utilizando la ec. 2.3.4

$$G_{1m^2} = 36,96 \text{ dBi (Banda C)}$$

$$G_{1m^2} = 44,92 \text{ dBi (Banda Ku)}$$

$$G_{1m^2} = 50,65 \text{ dBi (Banda Ka)}$$

3.4.4.7 Potencia Isotrópica Radiada Equivalente estación terrena (PIREest)

Datos: SDFnom(dBw/m²), Lo(dB), Lr(dB), Lg(dB), Ld(dB) y G1m(dBi).

Con la ec. 2.3.8:

$$PIRE_{est} = 45,26 \text{ dBw (Banda C)}$$

$$PIRE_{est} = 61,24 \text{ dBw (Banda Ku)}$$

$$PIRE_{est} = 99,89 \text{ dBw (Banda Ka)}$$

3.4.4.8 Potencia en el HPA para una portadora (P_{HPA} Una portadora)

Datos: PIREest(dBw), Gtx(dBi) y La(dB)

Con la ec. 2.3.80:

$$P_{HPA} \text{ (Una portadora)} = -8,51 \text{ dBw} \rightarrow 0,14 \text{ Watts (Banda C)}$$

$$P_{HPA} \text{ (Una portadora)} = -0,48 \text{ dBw} \rightarrow 0,89 \text{ Watts (Banda Ku)}$$

$$P_{HPA} \text{ (Una portadora)} = 35,03 \text{ dBw} \rightarrow 3184,08 \text{ Watts (Banda Ka)}$$

3.4.4.9 Relación Portadora a Temperatura de Ruido (C/T up)

Datos: PIREest(dBw), Lo(dB), Lr(dB), Lg(dB) y G/T sat. (dB/K).

Con la ec. 2.3.66:

$$C/T \text{ up} = -158,9 \text{ dBK-1 (Banda C)}$$

$$C/T \text{ up} = -154,6 \text{ dBK-1 (Banda Ku)}$$

$$C/T \text{ up} = -149,21 \text{ dBK-1 (Banda Ka)}$$

Se consideró la variación de G/Tsat (Aexos 8 y 10) solo para las bandas C y Ku:

$$G/T_{sat} \text{ (Banda C)} = -3 -2 = -5\text{dB} \text{ y } G/T_{sat} \text{ (Banda Ku)} = 6 -2 = -4\text{dB}$$

3.4.4.10 Relación Portadora a Densidad de Ruido (C/No up)

Datos: PIREest(dBw), Lo(dB), Lr(dB), Lg(dB), Ld(dB) y G/T Sat. (dB/K).

Con la ec. 2.3.64:

$$C/No \text{ up} = 69,69 \text{ dB Hz (Banda C)}$$

$$C/No \text{ up} = 73,97 \text{ dB Hz (Banda Ku)}$$

$$C/No \text{ up} = 81,38 \text{ dB Hz (Banda Ka)}$$

Nota: Para obtener C/Noup a partir de C/Tup se aplica: $C/Noup = C/Tup + 228,6$

3.4.4.11 Relación Energía Bit a Densidad de Ruido (E_b/No up)

Datos: C/No up (dB Hz) y Vel Tx. (Kbps)

Con la ec. 2.3.69:

$$E_b/No \text{ up} = 12,60 \text{ dB (Banda C)}$$

$$E_b/No \text{ up} = 16,88 \text{ dB (Banda Ku)}$$

$$E_b/No \text{ up} = 24,29 \text{ dB (Banda Ka)}$$

3.4.5 Estimación para el año 2011 (Banda C):

3.4.5.1 Potencia requerida en el HPA para cada velocidad de transmisión

($P_{\text{HPA Total/Vel.Tx}}$)

Datos: N° portadoras o clientes para esa Vel. Tx. y P_{HPA} para una portadora (Watts)

$$P_{\text{HPA Total/Vel.Tx}} = P_{\text{HPA (512Kbps)}} * N^{\circ} \text{ portadoras}_{(512\text{Kbps})}$$

$$P_{\text{HPA Total/Vel.Tx}} = 0,14093\text{Watts} * 99 = 13,95 \text{ Watts}$$

Nota: Es importante mencionar que el número de clientes coincide con el número de portadoras, ya que en la banda C, solo se va a prestar el servicio SCPC, en el cual los enlaces son dedicados y no se comparte el ancho de banda entre los clientes.

3.4.5.2 Potencia total requerida en el HPA para todas las velocidades de transmisión ($P_{\text{HPA Total}}$)

Datos: $P_{\text{HPA Total/Vel.Tx}}$ y N° portadoras. Las velocidades de transmisión usadas son: 64, 128, 256, 512, 1.024, 1.536, 2.048 y 4.096 Kbps.

Usando la ec. 2.3.82

$$P_{\text{HPA Total}} = 163,157 \text{ Watts}$$

$$P_{\text{HPA Total (Valor comercial)}} = \mathbf{400 \text{ Watts}}$$

Se eligió un HPA de 400W para prever el crecimiento que pudiera tener el tráfico en esta banda, luego del año 2011.

3.4.5.3 Ancho de Banda total (AB total)

Datos: AB_{sig} (Mhz) por Vtx y N° portadoras por Vtx.

Este parámetro se obtiene multiplicando el AB_{sig} y el N° portadoras de cada Vtx. y luego sumándolo

$$AB_{\text{total}} = AB_{\text{sig}} (\text{Mhz})/V_{\text{tx1}} * N^{\circ} \text{ portadoras}/V_{\text{tx1}} + AB_{\text{sig}} (\text{Mhz})/V_{\text{tx2}} * N^{\circ} \text{ portadoras}/V_{\text{tx2}} \dots + \dots AB_{\text{sig}} (\text{Mhz})/V_{\text{txn}} * N^{\circ} \text{ portadoras}/V_{\text{txn}}$$

$$AB_{\text{total}} = 0,0288\text{Mhz} * 2 + 0,0576\text{Mhz} * 18 + 0,1152\text{Mhz} * 34 + 0,2304\text{Mhz} * 99 + 0,4608\text{Mhz} * 250 + 0,6912\text{Mhz} * 7 + 0,9216 * 125 + 1,84\text{Mhz} * 2 = \mathbf{266,746 \text{ Mhz}}$$

3.4.5.4 Número total de transpondedores requeridos (Total Transp)

Datos: AB total (Mhz) y AB transp.(Mhz)

Ahora, para obtener la cantidad total de transpondedores necesarios se divide ABtotal por el número de transpondedores disponibles:

$$\text{Total Transp} = \frac{\text{AB total}}{\text{AB transp}} = \frac{266,746 \text{ Mhz}}{36 \text{ Mhz}} = 7,409 \approx 8 \text{ Transpondedores}$$

3.4.6 Estimación para el año 2011 (Banda Ku):

En este caso el número de clientes no coincide con el número de portadoras, ya que en la banda Ku se van a prestar servicios de internet, donde el ancho de banda es compartido. El número de clientes que se puede canalizar por portadora viene dado por dos factores que responden a estudios de tráfico previos hechos por CANTV: Agregación y porcentaje de uso de las estaciones.

3.4.6.1 Outbound e Inbound en la banda Ku:

Outbound:

Es la información que se genera desde el hub y es enviada hacia las estaciones VSAT de los clientes a través del satélite, en este caso solo se aplica el concepto de porcentaje de uso estas estaciones VSAT.

Inbound:

Es la información que va desde la estación terrena del cliente hacia el hub a través del satélite, en este caso se utilizan tanto la técnica de agregación como la consideración de porcentaje de uso. Las ráfagas de bits que se generan del lado del cliente son considerablemente pequeñas, ya que se usan por ejemplo, para buscar páginas web, enviar comandos de petición de servicios en video digital, etc... Para darle el mayor provecho posible al ancho de banda, se establece un número específico de clientes que puedan ser canalizados por una sola portadora y esto es lo que se conoce como agregación. La agregación utilizada es 1/8, es decir que en una portadora se pueden tener 8 clientes a la vez.

Además se toma en cuenta el hecho de que estos clientes no van a estar enviando información todo el tiempo y por lo tanto se estima un porcentaje de actividad de los mismos. Este porcentaje varía dependiendo de la velocidad de transmisión y se presenta detalladamente en la tabla 3.6, junto con la agregación correspondiente:

Tabla 3.6. Cantidad de agregación por portadora y porcentaje de uso de las estaciones terrenas para cada velocidad de transmisión en banda Ku. [23]

Vel Tx. (Kbps)	Agregación	Porcentaje de uso
128	1/8	20%
256	1/8	20%
512	1/8	20%
1.024	1/8	20%

Para determinar el número total de portadoras tanto en el outbound, como en el inbound se procede como sigue:

$N^{\circ} \text{ portadoras}_{(512\text{Kbps})} = N^{\circ} \text{ clientes}_{(512\text{Kbps})} * 20\% = 3065 * 0,20 = 613 \text{ portadoras}$
(Outbound)

$N^{\circ} \text{ portadoras}_{(512\text{Kbps})} = N^{\circ} \text{ clientes}_{(512\text{Kbps})} * 20\% * 1/8 = 3065 * 0,20 * 1/8 \approx 77$
portadoras (Inbound)

3.4.6.2 Potencia requerida en el HPA para cada velocidad de transmisión (P_{HPA} Total/Vel.Tx)

Datos: N° portadoras para esa Vel. Tx. y P_{HPA} para una portadora (Watts)

Aplicando la siguiente fórmula:

$P_{\text{HPA Total}}_{(512\text{Kbps})} = P_{\text{HPA}}_{(512\text{Kbps})} * N^{\circ} \text{ portadoras}_{(512\text{Kbps})} = 0,89 \text{ Watts} * 613$

$P_{\text{HPA Total}}_{(512\text{Kbps})} = 547,84 \text{ Watts}$

El cálculo del HPA total se realizó solo para el outbound, ya que como se mencionó anteriormente, este representa el tráfico de información que se genera desde el hub.

3.4.6.3 Potencia total requerida en el HPA para todas las velocidades de transmisión (P_{HPA} Total)

Datos: P_{HPA} Total/Vel.Tx y N° portadoras. Las velocidades de transmisión usadas son: 128, 256, 512 y 1.024 Kbps.

Usando la ec. 2.3.82

P_{HPA} Total = 589,62 Watts

P_{HPA} Total (Valor comercial) = **750 Watts**

3.4.6.4 Ancho de banda total requerido por el outbound (AB total)

Datos: ABasig (Mhz) por Vtx y N° portadoras por Vtx.

Este parámetro se obtiene multiplicando el ABasig y el N° portadoras de cada Vtx. y luego sumándolo

$AB\ total = ABasig\ (Mhz)/Vtx1 * N^{\circ}\ portadoras/Vtx1 + ABasig\ (Mhz)/Vtx2 * N^{\circ}\ portadoras/Vtx2 \dots + \dots ABasig\ (Mhz)/Vtxn * N^{\circ}\ portadoras/Vtxn$

$AB\ total = 0,0576Mhz*89 + 0,1152Mhz*45 + 0,2304Mhz*3175 + 0,4608Mhz*1$

$AB\ total =$ **152 Mhz**

3.4.6.5 Número total de transpondedores requeridos por el outbound (Total Transp. Outbound)

Datos: AB total (Mhz) y AB transp.(Mhz)

Ahora, para obtener la cantidad total de transpondedores necesarios se divide ABtotal por el número de transpondedores disponibles:

$Total\ Transp = \frac{AB\ total}{AB\ transp} = \frac{152\ Mhz}{54\ Mhz} = 2,81 \approx 3$

3.4.6.6 Moduladores DVB-S (Outbound)

El tipo de moduladores usados para canalizar el outbound son DVB-S y la cantidad de estos elementos fue determinada como se muestra a continuación:

Datos: AB total (Mhz) y AB por mod. DBV-S (Mhz)

$N^{\circ}\ Moduladores\ DVB-S = \frac{AB\ total\ (Mhz)}{AB\ por\ mod.\ DBV-S\ (Mhz)} = \frac{152\ Mhz}{54\ Mhz} \approx 3$

54 Mhz en este caso, representa la capacidad de cada modulador DVB-RCS.

3.4.6.7 Ancho de banda total requerido por el inbound (AB total Inbound)

Datos: ABasig (Mhz) por Vtx y N° portadoras por Vtx.

$AB\ total = ABasig\ (Mhz)/Vtx1 * N^{\circ}\ portadoras/Vtx1 + ABasig\ (Mhz)/Vtx2 * N^{\circ}\ portadoras/Vtx2 \dots + \dots ABasig\ (Mhz)/Vtxn * N^{\circ}\ portadoras/Vtxn$

$AB\ total = 0,0576Mhz * 11 + 0,1152Mhz * 6 + 0,2304Mhz * 79 + 0,4608Mhz * 1$

$AB\ total = 19,52\ Mhz$

3.4.6.8 Número total de transpondedores requeridos por el inbound (Total Transp. Inbound)

Datos: AB total (Mhz) y AB transp.(Mhz)

$Total\ Transp = \frac{AB\ total}{AB\ transp} = \frac{19,52\ Mhz}{54\ Mhz} = 0,36$

3.4.6.9 Demoduladores DVB-RCS (Inbound)

El tipo de demoduladores usados para canalizar el inbound son DVB-RCS y la cantidad de estos dispositivos se determinó como sigue:

Datos: AB total (Mhz) y AB por mod. DBV-RCS (Mhz)

$N^{\circ}\ Demd.\ DBV-RCS = \frac{AB\ total\ (Mhz)}{AB\ por\ mod.\ DBV-RCS\ (Mhz)} = \frac{19,52\ Mhz}{12\ Mhz} = 1,62 \approx 2$

12 Mhz es la capacidad de los demoduladores DVB-RCS.

3.4.7 Enlace Bajada Satélite-Cliente

Tanto el ABocup, como el ABasig se determinan de la misma manera que para el enlace de bajada.

3.4.7.1 Potencia Isotrópica Equivalente Radiada funcional del satélite (PIRE fun)

Datos: PIREsat(dBw), OBO(dB), Abtrans(Mhz) y ABasig(Mhz)

Con la ec. 2.3.78:

$$\text{PIREfun} = 11,86 \text{ dBw (Banda C)}$$

$$\text{PIREfun} = 22,60 \text{ dBw (Banda Ku)}$$

$$\text{PIREfun} = 15,48 \text{ dBw (Banda Ka)}$$

Para el cálculo de PIREfun se tomó en cuenta la variación de PIREsat (Anexos 8 y 10) solo para la banda C y Ku; como se mencionó anteriormente no se contó con esta información para la banda Ka. Por lo tanto PIREsat varió de la siguiente manera antes de ser introducida en la ec. 2.3.78.

$$\text{PIREsat (Banda C)} = 40,7 - 2 = 38,7 \text{ dBw}$$

$$\text{PIREsat (Banda Ku)} = 53,2 - 2 = 51,2 \text{ dBw}$$

3.4.7.2 Relación Portadora a Temperatura de Ruido (C/T down)

Datos: PIREfun(dBw), Lo(dB), Lr(dB), Lg(dB), G/Test(dBk-1)

Usando la ec. 2.3.67:

$$\text{C/T down} = -160,81 \text{ dBk-1 (Banda C)}$$

$$\text{C/T down} = -161,94 \text{ dBk-1 (Banda Ku)}$$

$$\text{C/T down} = -183,69 \text{ dBk-1 (Banda Ka)}$$

3.4.7.3 Relación Portadora a Densidad de Ruido (C/No down)

Datos: PIREfun (dBw), Lo(dB), Lr(dB), Lg(dB), G/Test(dBk-1)

Con la ec. 2.3.65:

$$\text{C/No down} = 67,79 \text{ dBHz (Banda C)}$$

$$\text{C/No down} = 66,66 \text{ dBHz (Banda Ku)}$$

$$\text{C/No down} = 44,91 \text{ dBHz (Banda Ka)}$$

Nota: Para obtener C/No down a partir de C/T down se puede aplicar la ec. 2.3.68

$$\text{C/No down} = \text{C/T down} + 228,6$$

3.4.7.4 Relación Energía de bit a Densidad de Ruido (Eb/No down)

Datos: C/No down(dBHz), Vel. Tx

Usando la ec. 2.3.70:

$E_b/N_o \text{ down} = 10,69 \text{ dB (Banda C)}$

$E_b/N_o \text{ down} = 9,57 \text{ dB (Banda Ku)}$

$E_b/N_o \text{ down} = -12,18 \text{ dB (Banda Ka)}$

Este parámetro tiene un valor negativo en banda Ka debido a las altas pérdidas causadas por la lluvia.

3.4.8 Figura de mérito en la estación de respaldo (Hub)

3.4.8.1 Ganancia de la antena receptora (Gan. Ant. Rx.)

Datos: Efic. Ant., Frec.(Ghz) y Diam. Ant. Rx.(m)

Usando la ec. 2.3.2:

$G_{\text{an. Ant. Rx}} = 53,84 \text{ dBi (Banda C)}$

$G_{\text{an. Ant. Rx}} = 63,39 \text{ dBi (Banda Ku)}$

3.4.8.2 Temperatura de ruido del sistema de recepción (Ts)

Datos: $T_o(^{\circ}\text{K})$, $T_{\text{sky}}(^{\circ}\text{K})$, $T_{\text{antena}}(^{\circ}\text{K})$, $L_a(\text{dB})$, $T_{\text{lna}}(^{\circ}\text{K})$, $G_{\text{lna}}(\text{dB})$, $F_m(\text{dB})$, $G_m(\text{dB})$ y $F_{\text{if}}(\text{dB})$. Con la ec. 2.3.54.

$T_s = 109,05 \text{ }^{\circ}\text{K (Banda C)}$

$T_s = 231,12 \text{ }^{\circ}\text{K (Banda Ku)}$

Para obtener T_s expresado en dB se debe aplicar la siguiente ecuación:

3.4.8.3 Figura de mérito (G/Ts)

Datos: $G_{\text{an. Ant. Rx}}(\text{dBi})$ y $T_s(^{\circ}\text{K})$

Aplicando la ec. 2.3.47:

$G/T_s = 33,47 \text{ dBK}^{-1} \text{ (Banda C)}$

$G/T_s = 39,75 \text{ dBK}^{-1} \text{ (Banda Ku)}$

3.4.9 Desempeño total del sistema (Bandas C y Ku):

3.4.9.1 Relación Portadora a Temperatura de Ruido de Intermodulación (C/T)I

Datos: AB asig(Mhz) y C/I 3M (dB)

Aplicando la ec.2.3.72:

(C/T) I = -158,98 dBk-1 (Banda C)

(C/T) I = -164,98 dBk-1 (Banda Ku Outbound)

(C/T) I = -162,98 dBk-1 (Banda Ku Inbound)

3.4.9.2 Relación Portadora a Temperatura de Ruido total (C/T total)

Datos: C/T up (dBk-1), C/T down (dBk-1) y C/T I (dBk-1)

Aplicando la ec. 2.3.71:

C/T total = -160,91 dBk-1 (Banda C)

C/T total = -165 dBk-1 (Banda Ku Outbound)

C/T total = -163 dBk-1 (Banda Ku Inbound)

3.4.9.3 Relación Portadora a Densidad de Ruido total (C/No total)

Dato: C/T total.

Con la ec. 2.3.68:

C/No total = 67,69 (Banda C)

C/No total = 63,62 (Banda Ku Outbound)

C/No total = 65,62 (Banda Ku Inbound)

3.4.9.4 Relación Portadora a Ruido total (C/N total)

Datos: AB asig (Mhz) y C/No total.

Aplicando la ec. 2.3.73:

C/N total = 14,06 dB (Banda C)

C/N total = 9,99 dB (Banda Ku Outbound)

C/N total = 12 dB (Banda Ku Inbound)

Ahora , con estos valores de C/N obtenidos se puede determinar el BER correspondiente a cada banda mediante la figura 2.24; estos se presentan a continuación:

$BER \approx 10e^{-7}$ (Banda C)

$BER \approx 10e^{-4}$ (Banda Ku Outbound)

$BER \approx 10e^{-5}$ (Banda C Inbound)

3.4.9.5 Desempeño total del sistema para la Banda Ka:

En este caso faltó un dato necesario para calcular el C/N total del sistema: C/I 3M (dB). Si en un futuro se cuenta con este valor y se desea calcular el C/N total en esta banda, se debe seguir el mismo procedimiento que el mostrado para las bandas C y Ku.

3.5 Equipos seleccionados para el dimensionamiento del hub:

Luego de haber realizado los cálculos y análisis necesarios, se presenta una propuesta de equipamiento para el hub en banda C y banda Ku; siempre respetando los lineamientos sugeridos por el personal de CANTV. Además se incluyen los costos estimados de cada equipo, para luego poder tener un total aproximado. Esto se detalla en las tablas 3.7, 3.8 y 3.9.

3.5.1 Banda C

Tabla 3.7 Equipos recomendados para el hub operando en banda C

Elemento	Características	Modelo comercial	Costos aprox. \$	Cant.
Antena	Diam: 13m Gtx: 57,4 dBi Grx: 53,8 dBi Tant: 52 °K Ef(Γ): 0,65	Vertex RSI Cassegrain	270.000	1
HPA	Potencia: 250 Watts	Advantech SSPA Standard AWSA Series	19.300	1
Up/Converter 70-140 Mhz/Banda L a Banda C	Fig. Ruido: 15 dB Ganancia: 30dB	Advantech 70Mhz to C band Converter	6.600	1
LNA	Temp. Ruido: 35 °K Gan: 45dB	Comtech CLNA Series	1.600	1
Down/Converter Banda C a 70-140 Mhz/Banda L	Fig. Ruido: 10dB Ganancia: 40dB	Advantech C band to 70Mhz Converter	6.600	1
Módems tráfico	Manejo de voz video y datos Frec:70-140 Mhz/ Banda L	Comtech CDM- 570	3.950	537
Módems redundancia	Manejo de voz video y datos Frec:70-140 Mhz/ Banda L	Comtech CDM-570	3.950	54
Switche	Capacidad: 10 módems tráfico 1 módem redundancia	Comtech CRS-280	1.990	54
Splitters 1 a 16	Interconexión de switchs de cada recinto de rack	Cross technologies 116 Series	1.075	8
Splitters 1 a 4	Interconexión de los splitters 1 a 16 para conectar con los up y down converters	Cross technologies 14 Series	800	2
Recinto para los racks	Capacidad: 12 espacios	Middle Atratlantic	472	1
Miscelaneos	Guías de onda, cables coaxiales, conectores, etc...	Andrew	3.000	N/A
Total aproximado			3.231.210 \$	

Para el servicio SCPC se requieren 537 módems de tráfico (correspondientes a los 537 clientes), los cuales deben estar distribuidos en recintos de racks de 10 módems cada uno; esto siguiendo lineamientos de CANTV. Pero además debe tenerse en cada recinto, un módem adicional que garantice la continuidad del servicio (módem de redundancia) en caso de que fallase alguno de los otros 10

módems de tráfico; por último, un switch que interconecte estos 11 módems. En total se tendrían 54 switchs, interconectados a través de splitters 1 a 16 y 1 a 4 para distribuir el tráfico hacia y desde la antena. Esto se muestra más detalladamente en los anexos 1 y 2.

En resumen, para prestar el servicio SCPC en banda C a 537 clientes, se necesitarían 54 recintos de racks para albergar 12 elementos cada uno (11 módems + 1 switch), un total de 591 módems (537 de tráfico y 54 de redundancia) y 54 switchs.

3.5.2 Banda Ku

Tanto los moduladores DVB-S como los demoduladores DVB-RCS, van interconectados dentro de un módulo conocido como Hub DVB-RCS, el cual contiene además, sistemas de gestión, dispositivos de conexión a red, elementos de alimentación y refrigeración, sistemas de manejo de fallas, etc... Estos módulos se adquieren ya de forma completa y fueron escogidos en base a las necesidades requeridas para manejar el ancho de banda calculado en las secciones 3.4.6.4 y 3.4.6.7.

En 3.4.6.6 y 3.4.6.9 se determinó que se necesitarían 3 moduladores DVB-S de 54 Mhz de capacidad cada uno y 2 demoduladores DVB-RCS de 12 Mhz. Las capacidades de 54 y 12 Mhz fueron tomadas siguiendo instrucciones del personal de CANTV.

Según lo investigado, se determinó que el Hub DVB-RCS que se adaptaría a estas necesidades descritas, sería el “Max DVB-RCS HUB” de Advantech. Cada uno de estos, puede tener instalados dos moduladores DVB-S de 54 Mhz y un demodulador DVB-RCS de 12 Mhz. Es por lo tanto que se necesitarían dos Hubs DVB-RCS en total, donde el segundo estaría trabajando a la mitad de su capacidad.

Tabla 3.8 Equipos recomendados para el hub operando en banda Ku

Elemento	Características	Modelo comercial	Costos aprox. \$	Cant.
Antena	Diam: 13m Gtx: 65,3 dBi Grx: 63,4 dBi Tant: 60 °K Ef(Γ): 0,65 Conector: WR-75 Flat (Rx) WR-75 Flat (Tx)	Vertex RSI Cassegrain	270.000	1
HPA	Potencia: 750 Watts Input: TypeN Output: WR-75 Flat	MCL MT4400	44.500	1
Up/Converter 70-140/Banda L Mhz a Banda Ku	Fig. Ruido: 15 dB Ganancia: 30 dB Input: BNC 75 ohms Output: Type N	Advantech 70Mhz to Ku band Converter	7500	1
LNA	Temp. Ruido: 80 °K Gan: 55 dB	Comtech KLNA Series	1.700	1
Down/Converter Banda Ku a 70- 140 Mhz/Banda L	Fig. Ruido: 15 dB Ganancia: 40 dB Input: Type N Output: BNC 75 ohms	Advantech	7500	1
Hub DVB-RCS	2 Mod. DVB-S 54 Mhz c/u 1 Demod. DVB-RCS 12 Mhz	Advantech DVB- RCS Max Hub	700.000	2
Miscelaneos	Guías de onda, cables coaxiales, conectores, etc...	Andrew	3000	N/A
Total aproximado			1.734.200 \$	

Para visualizar la forma tentativa como pueden ser conectados estos equipos propuestos, se pueden consultar los anexos 1, 2 y 3.

Tabla 3.9 Costos totales para los hubs en banda C y Ku

	Costos aproximados (\$)
Total Hub Banda C	3.231.210
Total Hub Banda Ku	1.734.200
Total	4.965.410

3.6 Aspectos a ser tomados en cuenta para la banda C:

3.6.1 Atenuación por lluvia, centelleo troposférico, gases atmosféricos y nubes

A estas frecuencias de trabajo, estos efectos no representaron un mayor problema para el buen desempeño del enlace. Se pudo observar, que para las atenuaciones causadas por centelleos troposféricos, nubes y niebla; la UIT ni siquiera considera que se realicen los cálculos, sino por encima de los 10Ghz. En cuanto a los gases atmosféricos, las atenuaciones para 4 y 6 Ghz no llegaron a los 0,1dB. Lo que se pudo determinar es que en todo caso, la atenuación “predominante” es la originada por la lluvia, aunque en 0,1% del tiempo su máximo valor llegó a casi 1 dB en 6Ghz.

3.7 Aspectos a ser tomados en cuenta para la banda Ku:

3.7.1 Atenuación por lluvia, centelleo troposférico, gases atmosféricos y nubes

En esta banda, se observó que las atenuaciones predominantes fueron las causadas por la lluvia. Tomando en cuenta el porcentaje de tiempo establecido de 0,1%, se pudo determinar que las perdidas en 12Ghz eran de casi 6dB, mientras que en 15Ghz eran de aproximadamente 9dB. Se pudo establecer que la diferencia en comparación con la banda C, son importantes y por lo tanto en el cálculo del enlace, se consideró este factor para lograr el desempeño requerido.

3.8 Aspectos a ser tomados en cuenta para la banda Ka:

Como se mencionó anteriormente hubo datos específicos del satélite, con los que no se pudo contar y por ende no se pudieron completar los cálculos en su totalidad, como se hizo para las bandas C y Ku. Sin embargo se hizo un estudio sobre los distintos efectos ambientales, que pudieran intervenir y afectar a un enlace satelital en banda Ka en nuestro país. Estos efectos fueron los siguientes: Atenuación por lluvia, atenuación por centelleo troposférico, atenuación por gases atmosféricos y atenuación por nubes.

Estos cálculos se realizaron tanto para el hub de servicios como para la estación de cliente, en frecuencias de Rx y Tx.

3.8.1 Atenuación por lluvia

Se realizaron los cálculos para porcentajes estadísticos de 0,01%, 0,1% y 1% del tiempo, para frecuencias de 19 y 29Ghz. Se pudo determinar que la atenuación producida para 0,01% del tiempo es muy elevada, llegando en 19Ghz hasta 33dB y en 29 Ghz hasta los 68 dB; Para un porcentaje del 0,1%, de igual manera se obtuvieron atenuaciones bastante elevadas; 17dB en 19Ghz y 37dB en 29Ghz.

Con estos resultados, se puede afirmar que el enlace sería altamente inestable y muy dependiente de estos efectos en particular.

3.8.2 Atenuación por centelleo troposférico, gases atmosféricos y nubes

Se pudo observar que estos tipos de atenuaciones, no afectan de forma importante el enlace satelital a estas frecuencias, debido a la posición geográfica de Venezuela con respecto al satélite Simón Bolívar, lo que permite trabajar con ángulos de inclinación de las antenas por encima de los 66°. Esto representa una gran ventaja ya que mientras menor sea el ángulo de inclinación, mayor será la atenuación que producirán estos efectos en el enlace.

Por lo tanto, se puede asegurar que el factor determinante en la atenuación producida en el enlace para la banda Ka, es la lluvia. Al producirse una lluvia el enlace quedaría completamente indispuerto.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A lo largo de los capítulos desarrollados anteriormente, se analizaron diversos aspectos de la estación terrena de respaldo, de los enlaces que se establecerían con clientes, de los servicios que se podrían prestar y de los equipos que se necesitarían para lograr los objetivos planteados por CANTV.

En este cuerpo del trabajo, se presentan conclusiones a las que se pudo llegar a raíz de dichos análisis y recomendaciones respecto al desarrollo de este proyecto. Se hizo una división en las tres bandas con las cuales se trabajó, para luego finalizar con conclusiones y recomendaciones generales.

Banda C

Con los resultados obtenidos, hay varios aspectos importantes que mencionar para esta banda. Las atenuaciones producidas por lluvia, centelleo, gases atmosféricos y nubes son realmente despreciables, por lo que se garantiza un enlace muy confiable. Esto es esencial, ya que los clientes que se piensan canalizar a través del servicio SCPC, tienen requerimientos muy altos de seguridad y continuidad del enlace. Por otra parte, la asignación individual de un módem por cliente implica un gasto muy elevado en equipos, en espacio físico, en personal, etc.... Se debería pensar en ofrecer un servicio alternativo, mediante el cual se le pudiese garantizar una seguridad similar al cliente, pero pudiendo manejar de una manera más eficiente el ancho de banda. Esto disminuiría los costos notablemente para la empresa y en consecuencia para el cliente.

Hasta el año 2011 la capacidad ocupada en el satélite, sería de aproximadamente 8 traspondedores de un total de 14 . Esto se traduce en la posibilidad de disponer de suficiente espectro satelital, para tener una oferta amplia e ir captando una mayor cantidad clientes no solo en Venezuela, sino en América Latina.

Banda Ku

En esta banda se pudo determinar que las atenuaciones producidas en el enlace, tuvieron un papel más importante, debido al aumento de la frecuencia de trabajo; siendo las causadas por la lluvia, las más relevantes. Sin embargo esta situación en principio es manejable, debido específicamente al servicio que se piensa prestar. Mediante el internet VSAT, se le pudiera ofrecer al cliente una relación calidad/costos que estimara este tipo de contratiempos. Por ejemplo, en la actualidad se prestan servicios de difusión de T.V. a través de la banda Ku, en los cuales ocurren decaimientos de la señal en situaciones de lluvia; pero el cliente adquiere el servicio bajo estos términos previamente conocidos.

En el año 2011 se tendrían ocupados casi 3 transpondedores de un total de 12, por lo que esta sería la banda en la cual habría más disponibilidad de espectro satelital.

A parte del Internet VSAT, se podrían prestar otro tipo de servicios como lo son: difusión de T.V. e incluso SCPC más económico con ancho de banda compartido.

Banda Ka

El desarrollo de servicios satelitales en Venezuela a través de esta banda, representa un gran reto. Con los resultados obtenidos, se pudo observar que la vulnerabilidad de las transmisiones a estas frecuencias ante fenómenos atmosféricos, es muy importante.

Lo primero que se debería definir con exactitud, es el tipo de servicios que se pudieran canalizar, teniendo en cuenta las altas pérdidas. Por ejemplo, no se podría garantizar una continuidad absoluta en el enlace para servicios que así lo requiriesen. Se recomienda a CANTV ejecutar un plan piloto que pudiera ir definiendo los lineamientos a seguir para esta banda y determinar realmente si puede ser de provecho en nuestro país.

Aspectos generales

En general se puede concluir que el lanzamiento del satélite Simón Bolívar es un acontecimiento que marca un antes y un después en el desarrollo que las telecomunicaciones han venido teniendo en nuestro país. Es importante que se esté pensando en tener sistemas de respaldo de gran envergadura, que permitan a Venezuela presentarse en un futuro cercano, como un proveedor serio y competitivo en el área satelital.

En este trabajo se le dio una particular importancia a las pérdidas del enlace, para intentar acercarse lo más posible a un escenario real y tener información que pudiera ser utilizada en un futuro, por quién así lo necesitara.

Debido a la posición orbital en la que estará ubicado el satélite, las antenas terrestres en Venezuela, tendrán ángulos de elevación bastante elevados; lo que permitirá minimizar gran parte de las atenuaciones presentes en el trayecto. Esto habría que aprovecharlo, ya que se traduce en menores requerimientos de potencia y en consecuencia menores costos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Wikipedia, *Satélites de Comunicaciones*(2008).--[En línea].
<<http://es.wikipedia.org>>
- [2] Pered, A., Sergio *Software para análisis presupuesto enlace comunicaciones vía satélite* (2004).--[En línea].<<http://catarina.udlap.mx>> (Universidad de las Américas Puebla).
- [3] Rodríguez, A. y Moumtadi, F. *Metodología para la obtención del patrón de radiación y prueba de aislamiento en sistemas de comunicaciones vía satélite*. --[En línea]. <<http://www.unam.mx>> Universidad Nacional Autónoma de México
- [4] W. Bostian, Charles *Review Assessment of Satellite Communications Technologies*(1993). --[En línea]. <<http://www.wtec.org>> (WTEC Hyper Librarian).
- [5] Everett, John *Very Small Aperture Terminals* – Londres: Reino Unido,ed. Peter Peregrinus, 1992
- [6] Johnston, Eric. *Low Noise Block Downconverter* (2006). [En línea].
<<http://www.satsig.net>>
- [7] Wittenberg, Peter. “*Radar problems*” (1997), [En línea].
<<http://www.radarproblems.com>>
- [8] INTELSAT *Digital Satellite Communications Technology*. Washington, U.S.A. 1995. A2-2, A2-4, A2-6, A2-9, A2-10, A2-13, A2-14, A2-16, A2-18, A2-23,
- [9] Recomendación UIT-R P525
- [10] Recomendación UIT-R P618
- [11] Recomendación UIT-R P.676
- [13] Recomendación UIT-R P.837
- [14] Recomendación UIT-R P.838
- [15] Recomendación UIT-R P.839
- [16] Recomendación UIT-R P.840
- [17] Recomendación UIT-R P.453

- [18] Valle Barra, Mauricio A. *Consideraciones de diseño y técnicas de modulación-multiplexación en enlaces satelitales para telecomunicaciones*-- Chile: Universidad Católica de Valparaíso (2001). Págs. 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20.
- [19] Silver, J. P. *Satellite Communications Tutorial*, www.rfic.co.uk
- [20] CCIR Rep. 720-2
- [21] INTELSAT. *Intelsat Earth Station Standards.(IESS).IESS.503e*
- [22] CANTV, *Carga útil del Satélite Simón Bolívar (2008)*
- [23] CANTV, *Demanda del satélite Simón Bolívar (2007)*
- [24] Bruzual, Zeldivar. *Apuntes de la cátedra Sistemas de Telecomunicaciones 3*. Universidad Central de Venezuela, 2007.
- [25] Rodríguez Arandia, Maximiliano de Jesús. *Diseño del plan de reestructuración de la planta satelital de CANTV años 2006-2009*—Venezuela: Universidad Simón Bolívar (2008). Págs. 2, 5, 6.

BIBLIOGRAFÍAS

Everett, John. *Very Small Aperture Terminals*. Editorial Peter Peregrinus. Londres, Reino Unido, 1992.

Bruzual, Zeldivar. *Apuntes de la cátedra Sistemas de Telecomunicaciones 3*. Universidad Central de Venezuela, 2007.

Martínez, Franklin. *Apuntes de la cátedra Propagación y Antenas*. Universidad Central de Venezuela, 2007.

Brito, Freddy. *Apuntes de la cátedra Ondas Guiadas*. Universidad Central de Venezuela, 2007.

Pratt, Timothy & BOSTIAN, Charles. *Satellite Communications*. U.S.A 1986

Tomasi, Wayne, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, Editorial Prentice Hall 2da Edición, Mexico, 1996.

Freeman, Roger. *Ingeniería de Sistemas de Telecomunicaciones*. Editorial Limusa. Primera Edición, México 1996.

INTELSAT. *Digital Satellite Communications Technology*. Washington, U.S.A. 1995

Orozco C., Belkis. *Cálculo del Enlace por Satélite*. 1986

Haykin, Simon. *Sistemas de Comunicación*. Editorial Limusa Wiley. México 2005.

Ebert, Bruce. *The Satellite Communication Ground Segment and Earth Station Handbook*. 2da Edición, U.S.A. 2001.

UIT *Recomendaciones de UIT-R*. P.453, P.525, P.618, P.676, P.837, P.838, P839, P.840 y CCIR Rep. 720-2.

INTELSAT. *Intelsat Earth Station Standards(IESS)*. IESS-207, IESS-310, IESS-315, IESS-402, IESS-410, IESS-503.

Centro Espacial Venezolano [En línea]. <<http://www.cev.gob.ve>> [Consulta:2007/2008]

Satcom Satellite Networking Specialists [En línea].
<<http://www.satcomresources.com>> [Consulta:2007/2008]

INTELSAT [En línea]. <<http://www.intelsat.com>> [Consulta:2007/2008].

Satnews Publishers [En línea]. <<http://www.satnews.com>> [Consulta:2007/2008].

World Technology Evaluation Center [En línea].<<http://www.wtec.org>>
[Consulta:2007/2008]

TELESAT [En línea]. <<http://www.telesat.com>> [Consulta:2007/2008]

ANDREW [En línea]. <<http://aw.commscope.com>> [Consulta:2007/2008]

Van Fleteren, Stephan. *Traveling Wave Tube vs. Solid State Amplifiers*. [En línea].
<<http://www.djmelectronics.com/articles/twt-vs-solid-state.html>>
[Consulta:2007/2008]

Pered, A., Sergio *Software para análisis presupuesto enlace comunicaciones vía satélite* [En línea]. <<http://catarina.udlap.mx>> [Consulta:2007/2008]

Silver, J. P. *Satellite Communications Tutorial*. [En línea]. <<http://www.rfic.co.uk>>
[Consulta:2007/2008]

Wittenberg, Peter. *Radar problems*. [En línea]. <<http://www.radarproblems.com>>
[Consulta:2007/2008]

Johnston, Eric. *Low Noise Block Downconverter*. [En línea].
<<http://www.satsig.com>> [Consulta:2007/2008]