

II. Descripción del Proyecto

2 Descripción Global

El proyecto lleva por título “Calculador Automático de Balances de Enlace en Comunicaciones por Satélite Geoestacionarias”. Consiste en el desarrollo de una herramienta en Matlab que permite el cálculo de balances de enlace haciendo uso de satélites de comunicaciones ubicados en órbitas geoestacionarias a partir de la parametrización y los datos introducidos por el usuario.

La aplicación desarrollada en el marco de este proyecto sirve para el cálculo preciso de balances de enlace con un elevado nivel de personalización proporcionando, además, mecanismos que ayudan al diseñador del enlace en el análisis de los diversos factores que intervienen en el balance.

El programa se ha desarrollado en el lenguaje de programación de Matlab. Se utiliza una estructura modular, en la que se desarrollan las funciones de forma independiente que pueden ser aprovechadas desde distintas partes del programa.

Para la creación de interfaces gráficas de usuario se ha utilizado la herramienta GUIDE incluida en Matlab, un entorno de programación visual para la generación de GUIs. Cada ventana lleva, además, programación adicional que gestiona del comportamiento dinámico de los elementos mostrados en las interfaces.

Los mapas utilizan algunas de las funciones de *Mapping Toolbox* para la representación geográfica de datos.

Un esquema general del programa se da en la Figura 2-1, en la que se muestran las distintas secciones en las que se divide el programa: administración de datos, balances de enlace, análisis del balance de enlace y utilidades.

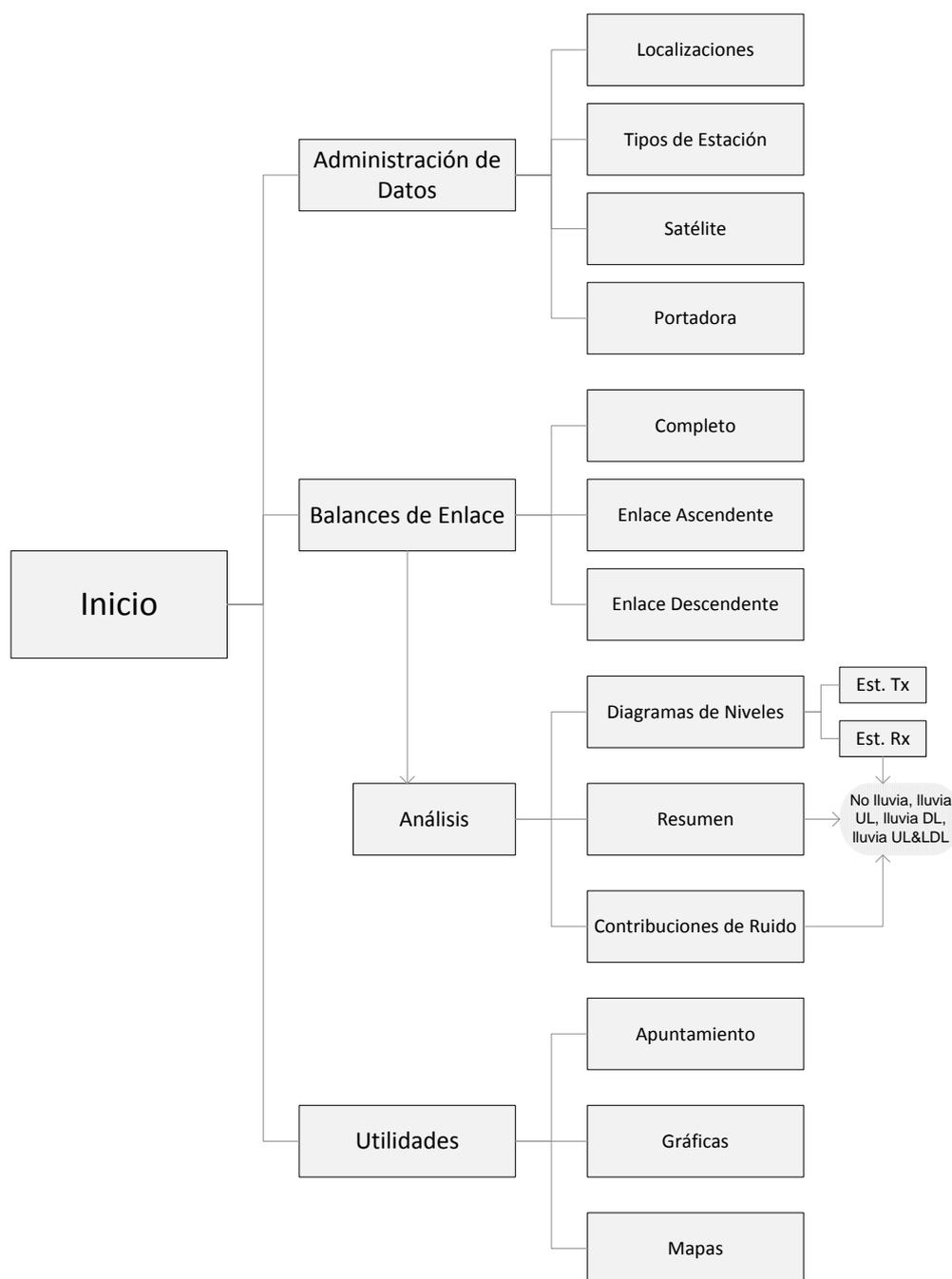


Figura 2-1: Esquema de la aplicación

En el apartado siguiente se abordan, de forma general, las funcionalidades y utilidades del Calculador Automático de Enlaces, así como una muy breve descripción de la forma de obtenerlas.

A continuación, en las secciones 3 y 4, se explica la caracterización que se realiza del medio y la secuencia de cálculos y elementos intervinientes en el enlace. En estos apartados se alcanza un alto nivel de detalle en la descripción de los métodos de cálculo y las consideraciones de diseño que se han tomado a la hora de programar la aplicación.

En los capítulos subsiguientes se anexa un completo manual de usuario en el que se explica el funcionamiento de la aplicación y las diferentes ventanas que se presentan al usuario. A continuación se aportan ejemplos de utilización que muestran algunas de las posibilidades de aplicación del Calculador Automático de Balances de Enlace.

Por último, se incluye un capítulo de conclusiones y líneas futuras de desarrollo que pueden abordarse para la ampliación o mejora de las capacidades de la herramienta desarrollada en el marco del proyecto.

2.1 Análisis del Enlace

Para entrar en materia, se va a considerar un enlace satélite unidireccional, como el que se muestra en la Figura 2-2.

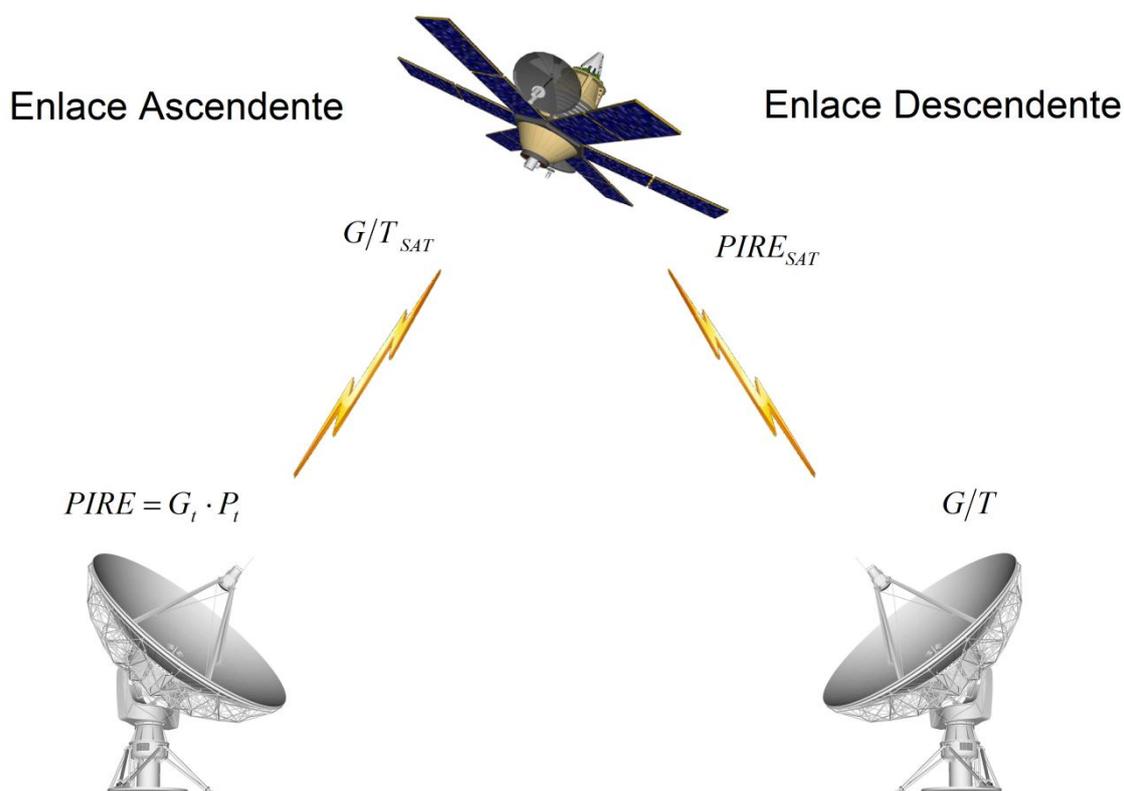


Figura 2-2: Enlace satélite básico

La estación terrestre transmisora emite una portadora cuya Potencia Isótropa Radiada Equivalente, PIRE, viene dada por la potencia suministrada por el equipo amplificador a la salida del alimentador de la antena P_{TX} y por la ganancia proporcionada por ésta en transmisión G_{TX} .

El satélite tiene unas capacidades de recepción dadas por elementos como el tamaño de la antena del haz empleado, la eficiencia de la misma o las características técnicas de los componentes de su cadena de recepción. Estos elementos tienen como

resultado una figura de mérito G/T del satélite, marcada por el diseño del terminal y que determina sus prestaciones en recepción.

Se realiza la exposición con el enlace ascendente, que se refiere en el resto de este capítulo como el enlace. Las consideraciones para el enlace descendente son similares, y los factores explicados tendrán un tratamiento idéntico en cualquiera de los dos casos.

En una aproximación muy básica e idealizada al balance de enlace, puede considerarse que la transmisión se produce bajo condiciones de cielo claro y que las únicas atenuaciones que sufre la señal son las pérdidas de propagación en el espacio libre. Se emplea la fórmula de Friis en el espacio libre para calcular la potencia de la portadora que se recibe en el satélite, que expresada en decibelios:

$$P_R (dBm) = PIRE(dBm) + G_{RX}^{SAT} - L_{FSL} \quad (2-1)$$

Las pérdidas de propagación en el espacio libre L_{FSL} son directamente proporcionales al cuadrado de la distancia recorrida e inversamente proporcionales al cuadrado de la longitud de onda de la señal transmitida, es decir, se incrementan de acuerdo a como lo hacen la distancia y la frecuencia. La PIRE vendrá dada por las características de la estación transmisora y la ganancia de la antena satelital en recepción

Cuando se considera el sistema en el mundo real, aparecen una serie de factores adicionales que modifican necesariamente el comportamiento de la señal de comunicaciones. El estudio y evaluación de estos factores son una de los objetos principales de este proyecto.

Los factores asociados a la propagación de la señal que se consideran en el Calculador de Balances de Enlace son los siguientes:

- Atenuación debida a los gases atmosféricos debida a la absorción por parte de las moléculas de oxígeno y vapor de agua. En la aplicación se calculan automáticamente según el modelo de estimación aproximado dado en el anexo 2 de la recomendación UIT-R P.676-7 [8]. En el proceso se obtienen las atenuaciones

específicas para el aire seco y vapor de agua y las pérdidas totales que sufre la señal en función del ángulo de incidencia en la atmósfera. Los efectos de la atenuación por gases atmosféricos toman relevancia a partir de frecuencias de 10GHz.

- Atenuación producida por precipitaciones. Cuando en el trayecto de la señal electromagnética a través de la atmósfera aparecen zonas con hidrometeoros, se producirá una atenuación adicional de la misma debida a la absorción y la refracción de la señal al atravesarlas. La naturaleza aleatoria de estos fenómenos y la dificultad de la obtención de datos fiables implica que la aproximación a su evaluación tiene que ser estadística. En este proyecto se ha tomado el modelo de datos de propagación y métodos de predicción dado en la recomendación UIT-R 618.9 [7]. Para el cálculo de las estadísticas de atenuación se obtiene la altura efectiva de la lluvia mediante un método de estimación dado en la recomendación UIT-R 839 [11] que se basa en el cálculo a partir de la altura de la isoterma de 0°C por encima del nivel del mar y se sustenta en una base de datos de la UIT que es consultable desde mapas generados por el programa. Se determina también el trayecto oblicuo que se recorre.

Por otro lado, se obtiene la intensidad de lluvia rebasada durante el 0.01% del tiempo en la localización para la que se considera el enlace. Se estima utilizando los mapas y datos de la recomendación UIT-R P.837 [9], que también son consultables en forma de mapa desde la aplicación desarrollada.

Con estos datos, acompañados de la atenuación específica de la lluvia se obtiene la atenuación de rebasamiento resultante para el 0.01% del año medio. A partir de ella, se saca la atenuación resultante para el porcentaje de tiempo de indisponibilidad del enlace.

- Atenuación debida a nubes y niebla. Si en lugar de hidrometeoros la señal encuentra en su camino de propagación zonas de especial densidad gaseosa, aparece la atenuación debida a nubes y niebla. En la aplicación se calculan estas pérdidas mediante la recomendación UIT-R P.840-5 [12], en la que se obtiene el cálculo a través del contenido total de la columna de agua líquida de nube. Este dato es también estadístico y dependiente por tanto del grado de indisponibilidad

admitido en el enlace que se desee calcular. Es accesible en modo mapa desde las utilidades del programa. Junto con él, las atenuaciones y coeficientes específicos, se determina el valor para la atenuación debida a nubes en el enlace dado.

Un factor adicional no relacionado con la propagación pero que es importante tener en cuenta es el del desapuntamiento de las antenas. Las antenas transmisora y receptora no se encuentran perfectamente alineadas, lo que provoca una pérdida de señal respecto al valor teórico. Este factor se tiene en cuenta en el programa.

Actualizando la fórmula de Friis con estos datos, se tendría una expresión como la siguiente:

$$P_R(dBm) = PIRE(dBm) + G_{RX}^{SAT} - L_{FSL} - L_{ATM} - L_{LLUVIA} - L_{NUBES} - L_{DESAPUNT} \quad (2-2)$$

Esta ecuación arroja la potencia de la señal que sale de la antena de recepción del satélite. Pero esa antena, que apunta hacia la Tierra, además de recoger la señal de interés también es un colector de ruido e interferencias que están en el aire. La calidad con la que se recibe la señal está directamente relacionada con la relación entre el nivel de la señal y el de ruido e interferencias.

Los tipos de interferencia que se han considerado en la programación del Calculador de Balances de Enlace son los siguientes:

- Interferencia del canal adyacente.
- Interferencia del satélite adyacente.
- Interferencia de polarización cruzada.

Además de las interferencias, se ha considerado un término de intermodulación asociado a las no linealidades en la operación de amplificadores reales.

Como se ha comentado previamente, el ruido es otro de los factores clave para evaluar los enlaces. La aplicación calcula para la estación receptora el ruido recogido por la antena y los componentes del sistema receptor.

Por último, se compara el nivel de la señal recibida con el de ruido e interferencias, llegando a obtenerse la relación E_b/N_0 y el margen conseguido en el enlace.

3 Caracterización del Canal Satélite

3.1 Propagación en el espacio libre

El primer aspecto a tratar es la propagación de ondas en el espacio libre, definiendo el mismo como un medio dieléctrico, homogéneo e isótropo, en el que además la onda no encontrará obstáculos.

En este medio ideal se encuentra un transmisor ideal, transmitiendo una potencia P_T a través de una antena isotrópica, también ideal. Si no existen pérdidas, es decir, el espacio libre no absorbe potencia en absoluto, la señal se propagará en ondas esféricas a la velocidad de la luz. La potencia que atraviesa cualquier superficie esférica con centro en la antena será constante. La densidad de potencia por unidad de superficie:

$$\Phi(w/m^2) = \frac{P_T}{4\pi d^2} \quad (3-1)$$

Evidentemente, las antenas usadas en enlaces satelitales no son isotrópicas. Como interfaces que son entre puntos muy distantes entre sí, concentran su energía en determinadas direcciones según el diagrama de radiación de las antenas empleadas.

3.2 Atenuación en el Espacio Libre

Un enlace puede verse como dos antenas contrapuestas, apuntadas la una contra la otra de modo que los patrones de radiación se maximizan en la dirección que las une.

Las pérdidas de propagación en el espacio libre son directamente proporcionales al cuadrado de la distancia recorrida e inversamente proporcionales al cuadrado de la longitud de onda de la señal transmitida. Se calcula según la siguiente expresión:

$$L_{FSL} = \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi f R}{c} \right)^2 \quad (3-2)$$

Donde L_{FSL} son las pérdidas en el espacio libre, R es la distancia, f la frecuencia y λ la longitud de onda de la señal del trayecto ascendente.

La potencia recibida por una antena se calcula como la densidad de potencia por el área efectiva de la antena receptora. Dada la explicación previa, la expresión resultante sería la siguiente:

$$P_R = \phi \cdot A_{Ref} = \frac{PIRE}{4\pi R^2} \cdot \frac{G_R \cdot \lambda^2}{4\pi} = \frac{PIRE \cdot G_R}{\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2} \quad (3-3)$$

En la que la atenuación debida a la propagación de la señal en espacio libre viene dada por el término $\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2$. Usando como unidad el decibelio puede transformarse la expresión anterior en esta otra:

$$P_R(dBm) = PIRE(dBm) + G_R(dB) - L_{FSL}(dB) \quad (3-4)$$

Para realizar el cálculo de la atenuación producida en el espacio libre es preciso conocer la distancia que separa las antenas, en nuestro caso la distancia existente entre la estación terrena y el satélite. Para un satélite geoestacionario esta distancia puede aproximarse de esta forma:

$$R = R_0 \cdot \sqrt{1 + 0.42 \cdot (1 - \cos l \cdot \cos L)} \quad (3-5)$$

Donde:

- R_0 es la altura a la que se encuentra el satélite, típicamente 35786km para un satélite geoestacionario
- l es la latitud de la estación en tierra
- L es la diferencia entre la longitud de la estación terrestre y la longitud orbital del satélite.

3.3 Factores Atmosféricos

La propagación en el espacio libre tratada en el apartado anterior presupone la existencia de un medio ideal, que de hecho se da en el espacio vacío. Sin embargo, en un enlace real en el que parte del trayecto recorrido por la señal electromagnética atraviesa la atmósfera terrestre, aparecen una serie de factores que es importante tener en cuenta a la hora de estudiar y calcular la propagación de la misma.

A partir de los 30Mhz, las capas de la atmósfera no están suficientemente ionizadas para reflejar las ondas electromagnéticas, por lo que las frecuencias por encima de ésta pueden aprovecharse para las comunicaciones vía satélite. Será, por tanto, importante para el cálculo del balance de enlace analizar la influencia de las capas de la atmósfera sobre la propagación radioeléctrica.

La troposfera es un medio no homogéneo que debido a los gases y el vapor de agua que contiene y las variaciones de presión y temperatura según la altura, está caracterizado por una constante dieléctrica y, por tanto, un índice de refracción variable con las condiciones climatológicas y la altura. Este gradiente implica que, a su paso por el medio, la trayectoria de la señal electromagnética sufre una curvatura, especialmente importante cuando el ángulo de incidencia en la atmósfera es bajo.

Los principales mecanismos de pérdida de energía electromagnética son debidos a la presencia de moléculas de oxígeno o vapor de agua en la atmósfera, así como de la aparición de precipitaciones de agua en diferentes formas. Estos mecanismos propician atenuaciones en la señal, que pueden llegar a ser muy importantes.

Los efectos producidos por la atmósfera que mayor impacto tienen sobre la propagación son los siguientes:

- Absorción por gases atmosféricos.
- Absorción, dispersión y despolarización por hidrometeoros.
- Ruido de emisión.

Estos efectos empiezan a tener un peso específico importante en el balance de enlace para señales a frecuencias a partir de 6GHz, y merecen una atención especial a frecuencias por encima de los 10GHz.

3.3.1 Atenuación debida a los Gases de la Atmósfera

Parte de la energía que viaja en la señal electromagnética es absorbida por el oxígeno y el vapor de agua presentes en la atmósfera. Sus moléculas entran en resonancia a ciertas frecuencias, lo que provoca ese trasvase de energía.

La absorción es muy pequeña para frecuencias inferiores a 10GHz, pero a frecuencias mayores esta atenuación crece hasta niveles a tener en cuenta. Además, en las frecuencias de resonancia se producen picos muy grandes de atenuación. Entre estos picos de resonancia hay bandas de frecuencia en las que la atenuación disminuye y que es posible aprovechar para la comunicación radioeléctrica en estas condiciones. Son denominadas ventanas de transmisión.

3.3.1.1 Cálculo de la atenuación atmosférica debida a gases

La Unión Internacional de Telecomunicaciones dispone de una recomendación en la que se exponen diferentes métodos para evaluar la atenuación causada por los gases atmosféricos en trayectos terrenales y oblicuos, mediante dos estimaciones:

- Una estimación de la atenuación causada por los gases, cuyo cálculo se efectúa sumando las rayas de absorción individuales, que es válida para la gama de frecuencias 1-1000GHz,
- Un método aproximado simplificado para evaluar la atenuación debida a los gases aplicable en la gama de frecuencias 1-350GHz.

Dado el alcance del proyecto y la buena precisión de los resultados obtenidos en el método aproximado, se desarrollará una función de cálculo en Matlab para la obtención de los resultados arrojados por este método, dado en el Anexo 2 de la recomendación, y que se describe a continuación.

3.3.1.1.1 Estimación Aproximada de la Atenuación causada por los gases en la gama de Frecuencias 1-350GHz

La presente estimación contiene algoritmos simplificados para una estimación rápida y aproximada de la atenuación causada por los gases para un número limitado de condiciones meteorológicas y una variedad limitada de configuraciones geométricas.

3.3.1.1.1.1 Atenuación Específica

Las atenuaciones específicas debidas al aire seco y al vapor de agua, y consideradas a partir del nivel del mar hasta una altura de 10 km, pueden estimarse utilizando los siguientes algoritmos simplificados, que se basan en la adaptación de curvas al cálculo de raya por raya, y permiten los cálculos más exactos dentro de una media del $\pm 10\%$ para frecuencias desplazadas de los centros con más rayas de absorción. La diferencia absoluta entre los resultados obtenidos con estos algoritmos y con el cálculo raya por raya es generalmente menor de 0,1 dB/km y alcanza un máximo de 0,7 dB/km cerca de los 60 GHz. Para alturas superiores a 10 km, y en los casos en que se necesita una mayor precisión, se deberá utilizar el cálculo raya por raya. En el caso de aire seco, la atenuación γ_0 (dB/km) viene dada por las siguientes ecuaciones:

Para $f \leq 54GHz$:

$$\gamma_0 = \left[\frac{7.2 \cdot r_t^{2.8}}{f^2 + 0.34 \cdot r_p^2 \cdot r_t^{1.6}} + \frac{0.62 \cdot \xi_3}{(54 - f)^{1.16 \xi_1} + 0.83 \cdot \xi_2} \right] \cdot f^2 \cdot r_p^2 \cdot 10^{-3} \quad (3-6)$$

Para $54GHz \leq f \leq 60GHz$:

$$\gamma_0 = \exp \left[\frac{\ln \gamma_{54}}{24} (f - 58)(f - 60) - \frac{\ln \gamma_{58}}{8} (f - 54)(f - 60) + \frac{\ln \gamma_{60}}{12} (f - 54)(f - 58) \right] \quad (3-7)$$

Para $60GHz \leq f \leq 62GHz$:

$$\gamma_0 = \gamma_{60} + (\gamma_{62} - \gamma_{60}) \frac{f - 60}{2} \quad (3-8)$$

Para $62GHz \leq f \leq 66GHz$:

$$\gamma_0 = \exp \left[\frac{\ln \gamma_{62}}{8} (f - 64)(f - 66) - \frac{\ln \gamma_{64}}{4} (f - 62)(f - 66) + \frac{\ln \gamma_{66}}{8} (f - 62)(f - 64) \right] \quad (3-9)$$

Para $66GHz \leq f \leq 120GHz$:

$$\gamma_0 = \left\{ \begin{array}{l} 3.02 \cdot 10^{-4} r_t^{3.5} + \frac{0.283 r_t^{3.8}}{(f - 118.75)^2 + 2.91 r_p^2 r_t^{1.6}} + \\ \frac{0.502 \xi_6 [1 - 0.0163 \xi_7 (f - 66)]}{(f - 66)^{1.434 \xi_4} + 1.15 \xi_5} \end{array} \right\} f^2 r_p^2 \cdot 10^{-3} \quad (3-10)$$

Para $120GHz \leq f \leq 350GHz$:

$$\gamma_0 = \left[\frac{3.02 \cdot 10^{-4}}{1 + 1.9 \cdot 10^{-5} f^{1.5}} + \frac{0.283 r_t^{0.3}}{(f - 118.75)^2 + 2.91 r_p^2 r_t^{1.6}} \right] f^2 r_p^2 r_t^{3.5} \cdot 10^{-3} + \delta \quad (3-11)$$

Siendo:

$$\xi_1 = \varphi(r_p, r_t, 0.0717, -1.8132, 0.0156, -1.6515) \quad (3-12a)$$

$$\xi_2 = \varphi(r_p, r_t, 0.5146, -4.6368, -0.1921, -5.7416) \quad (3-12b)$$

$$\xi_3 = \varphi(r_p, r_t, 0.3414, -6.5851, 0.2130, -8.5854) \quad (3-12c)$$

$$\xi_4 = \varphi(r_p, r_t, -0.0112, 0.0092, -0.1033, -0.0009) \quad (3-12d)$$

$$\xi_5 = \varphi(r_p, r_t, 0.2705, -2.7192, -0.3016, -4.1033) \quad (3-12e)$$

$$\xi_6 = \varphi(r_p, r_t, 0.2445, -5.9191, 0.0422, -8.0719) \quad (3-12f)$$

$$\xi_7 = \varphi(r_p, r_t, -0.1833, 6.5589, -0.4051, -2.8509) \quad (3-12g)$$

$$\gamma_{54} = 2.192 \varphi(r_p, r_t, 1.8286, -1.9487, 0.4051, -2.8509) \quad (3-12h)$$

$$\gamma_{58} = 12.59 \varphi(r_p, r_t, 1.0054, 3.5610, 0.1588, 1.2834) \quad (3-12i)$$

$$\gamma_{60} = 15.0 \varphi(r_p, r_t, 0.9003, 4.1335, 0.0427, 1.6088) \quad (3-12j)$$

$$\gamma_{62} = 14.28\varphi(r_p, r_t, 0.9886, 3.4176, 0.1827, 1.3429) \quad (3-12k)$$

$$\gamma_{64} = 6.819\varphi(r_p, r_t, 1.4320, 0.6258, 0.3177, -0.5914) \quad (3-12l)$$

$$\gamma_{66} = 1.908\varphi(r_p, r_t, 2.0717, -4.1404, 0.4910, -4.8718) \quad (3-12m)$$

$$\delta = -0.00306\varphi(r_p, r_t, 3.211, -14.94, 1.583, -16.37) \quad (3-12n)$$

$$\varphi(r_p, r_t, a, b, c, d) = r_p^a r_t^b \exp[c(1-r_p) + d(1-r_t)] \quad (3-12o)$$

Donde:

- f es la frecuencia, en GHz
- $r_p = p/1013$
- $r_t = 288/(273+t)$
- p es la presión, en hPa
- t es la temperatura, en grados centígrados. Los valores medios de la temperatura pueden extraerse de los mapas que aparecen en las recomendaciones UIT-R P.1510, cuando no se disponga de datos adecuados sobre temperatura.

En caso de vapor de agua, la atenuación γ_w (dB/km) viene dada por:

$$\gamma_w = \left[\begin{aligned} & \frac{3.98\eta_1 \exp[2.23(1-r_t)]}{(f-22.235)^2 + 9.42\eta_1^2} g(f, 22) + \frac{11.96\eta_1 \exp[0.7(1-r_t)]}{(f-183.31)^2 + 11.14\eta_1^2} \\ & + \frac{0.081\eta_1 \exp[6.44(1-r_t)]}{(f-321.226)^2 + 6.29\eta_1^2} + \frac{3.66\eta_1 \exp[1.6(1-r_t)]}{(f-325.153)^2 + 9.22\eta_1^2} \\ & + \frac{25.37\eta_1 \exp[1.09(1-r_t)]}{(f-380)^2} + \frac{17.4\eta_1 \exp[1.46(1-r_t)]}{(f-448)^2} \\ & + \frac{844.6\eta_1 \exp[0.17(1-r_t)]}{(f-557)^2} g(f, 557) + \\ & \frac{290\eta_1 \exp[0.41(1-r_t)]}{(f-752)^2} g(f, 752) \\ & + \frac{8.3328 \cdot 10^{-4} \eta_2 \exp[0.99(1-r_t)]}{(f-1780)^2} g(f, 1780) \end{aligned} \right] f^2 r_t^{2.5} \rho \cdot 10^{-4} \quad (3-13)$$

Siendo:

$$\eta_1 = 0.955r_p r_t^{0.68} + 0.006\rho \quad (3-14)$$

$$\eta_1 = 0.735r_p r_t^{0.5} + 0.0353r_t^4 \rho \quad (3-15)$$

$$g(f, f_i) = 1 + \left(\frac{f - f_i}{f + f_i} \right) \quad (3-16)$$

Donde ρ es la densidad de vapor de agua, medida en g/m^3 .

3.3.1.1.1.2 Atenuación en el trayecto

3.3.1.1.1.2.1 En trayectos terrenales

En un trayecto horizontal o ligeramente inclinado y próximo al suelo, la atenuación en el trayecto A , puede describirse como sigue:

$$A = \gamma \cdot r_0 = (\gamma_0 + \gamma_w) \cdot r_0 \quad dB \quad (3-17)$$

Donde r_0 es la longitud del trayecto, en km.

3.3.1.1.1.2.2 En trayectos oblicuos

Este punto contiene algoritmos sencillos para estimar la atenuación gaseosa a lo largo de trayectos inclinados que atraviesan la atmósfera de la Tierra, definiendo una altura equivalente que puede multiplicarse por la atenuación específica calculada en el apartado anterior para obtener la atenuación cenital. Las alturas equivalentes dependen de la presión y, por tanto, pueden emplearse para determinar la atenuación cenital desde el nivel del mar hasta unos 10 km de altitud. Las atenuaciones cenitales resultantes tienen una precisión de $\pm 10\%$ desde el nivel del mar hasta altitudes de aproximadamente 10 km, utilizando la presión, temperatura y densidad de vapor de agua adecuadas a la altitud de interés. Para altitudes superiores a 10 km, y, en particular, para frecuencias que se encuentran a menos de 0.5 GHz de los centros de las rayas de resonancia a cualquier altitud, debe utilizarse otro procedimiento. Obsérvese que la función Gaussiana que describe la altura equivalente para el oxígeno en la banda de 60 GHz puede dar lugar a errores superiores al 10% a ciertas frecuencias. Las siguientes ecuaciones se han obtenido de las atenuaciones cenitales calculadas con el procedimiento descrito en la recomendación, e integran las atenuaciones numéricas en una anchura de banda de 500 MHz; por consiguiente, las atenuaciones resultantes representan efectivamente los valores mínimos aproximados en la banda 50-70 GHz. Luego puede determinarse la atenuación del trayecto para ángulos de elevación distintos del cénit utilizando los procedimientos descritos más adelante en este punto.

Para el aire seco, la altura equivalente viene dada por:

$$h_0 = \frac{6.1}{1 + 0.17r_p^{-1.1}} (1 + t_1 + t_2 + t_3) \quad (3-18)$$

Siendo:

$$t_1 = \frac{4.64}{1 + 0.066r_p^{-2.3}} \exp \left[- \left(\frac{f - 59.7}{2.87 + 12.4 \exp(-7.9r_p)} \right)^2 \right] \quad (3-19)$$

$$t_2 = \frac{0.14 \exp(2.12r_p)}{(f - 118.75)^2 + 0.031 \exp(2.2r_p)} \quad (3-20)$$

$$t_3 = \frac{0.0114}{1 + 0.14r_p^{-2.6}} f \frac{-0.0247 + 0.0001f + 1.61 \cdot 10^{-6} f^2}{1 - 0.0169f + 4.1 \cdot 10^{-5} f^2 + 3.2 \cdot 10^{-7} f^3} \quad (3-21)$$

Con la restricción de que:

$$h_0 \leq 10.7r_p^{0.3} \text{ cuando } f < 70\text{GHz}$$

Y para el vapor de agua, la altura equivalente es:

$$h_w = 1.66 \left(\frac{1 + \frac{1.39\sigma_w}{(f - 22.235)^2 + 2.56\sigma_w} + \frac{3.37\sigma_w}{(f - 183.31)^2 + 4.69\sigma_w}}{\frac{1.58\sigma_w}{(f - 325.1)^2 + 2.89\sigma_w}} \right) \quad (3-22)$$

Para $f \leq 350\text{GHz}$

$$\sigma = \frac{1.103}{1 + \exp[-8.6(r_p) - 0.57]} \quad (3-23)$$

La atenuación cenital entre 50 y 70 GHz es una función complicada de la frecuencia, y los anteriores algoritmos para la altura equivalente sólo proporcionan una estimación aproximada de los niveles mínimos de atenuación que aparecen en este rango de frecuencias.

El concepto de altura equivalente se basa en la hipótesis de una atmósfera exponencial especificada mediante una altura de escala que describe la disminución de densidad con la altitud. Nótese que estas alturas de escala para el aire seco y el vapor de agua pueden variar con la latitud, la estación y/o el clima y que las distribuciones del vapor de agua en la atmósfera real pueden diferir considerablemente de la exponencial, con los cambios correspondientes de las alturas equivalentes. Los valores indicados más arriba se aplican hasta altitudes de aproximadamente 10 km. La atenuación cenital total entonces será:

$$A(\text{dB}) = \gamma_0 h_0 + \gamma_w h_w \quad (3-24)$$

Trajectos Tierra-Espacio

Para un ángulo φ de elevación comprendida entre 5° y 90°, la atenuación en el trayecto se obtiene, mediante la ley de la cosecante como sigue:

- Para la atenuación en el trayecto basado en los datos meteorológicos en la superficie:

$$A(\text{dB}) = \frac{\gamma_0 h_0 + \gamma_w h_w}{\text{sen} \varphi} \quad (3-25)$$

- Para la atenuación en el trayecto basado en el contenido integrado de vapor de agua:

$$A(\text{dB}) = \frac{\gamma_0 h_0 + A_w(p)}{\text{sen} \varphi} \quad (3-26)$$

El método de cálculo de la atenuación en trayectos oblicuos causada por el vapor de agua, antes citado, se basa en el conocimiento de las características de la presión (o densidad) del vapor de agua a lo largo del trayecto. En los casos en que se conozca el contenido integrado del vapor de agua a lo largo del trayecto, V_i , puede utilizarse un método sustitutivo.

La atenuación total causada por el vapor de agua puede calcularse del siguiente modo:

$$A_w(f, \theta, P) = \frac{0.0173V_t(P)}{\text{sen}\theta} \frac{\gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})} \text{ dB} \quad (3-27)$$

Siendo:

- f : frecuencia en GHz
- θ : ángulo de elevación, en grados. Debe ser mayor de 5° .
- $f_{ref} = 20.6\text{GHz}$
- $p_{ref} = 780\text{hPa}$
- $\rho_{v,ref} = \frac{V(P)}{4} \text{ g / m}^3$
- $t_{ref} = 14 \ln\left(\frac{0.22V_t(P)}{4}\right) + 3 \text{ }^\circ\text{C}$
- $V_t(P)$: Contenido de vapor de agua integrado en el porcentaje de tiempo necesario (kg/m^2 o mm) que puede obtenerse de mediciones radiométricas o de la Recomendación UIT-R P.836 (kg/m^2 o mm).
- $\gamma_w(f, p, \rho, t)$: Atenuación específica en función de la frecuencia, la presión, la densidad de vapor de agua y la temperatura, calculada en dB/km.

3.3.2 Atenuación Producida por Precipitaciones y Nubes

Si las ondas electromagnéticas intervinientes en la comunicación vía satélite encuentran en su camino a través de la atmósfera zonas de especial densidad gaseosa o incluso hidrometeoros, se producirá cierta atenuación, debida no sólo a la absorción de energía de las molécula de agua, sino también a la dispersión producida por la refracción al atravesar la superficie de las gotas de lluvia. Estos efectos son especialmente significativos a frecuencias superiores a 10GHz. En enlaces realizados a frecuencias por debajo de este valor no suelen tomarse en cuenta.

El problema asociado al cálculo de las atenuaciones debidas a este tipo de fenómenos es la naturaleza aleatoria de los mismos. Existe una gran variación en el reparto anual de las precipitaciones, por lo que la obtención de datos fiables es complicada. Sería necesario medir la distribución y las cantidades de precipitación en la zona en la que se desea colocar la estación durante varios años para tener unos datos precisos.

Existen distintos modelos de predicción de atenuación por lluvia. En este proyecto, nos centraremos en uno de los modelos dados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones en su recomendación UIT-R P618-9 [7].

Para el caso de la atenuación debida a las nubes, la recomendación a tener en cuenta será la UIT-R 840-5 [12], en la que se da un método para la obtención de la atenuación debida a las nubes y a la niebla.

En cualquier caso, si se dispone de datos estadísticos fiables sobre la atenuación a largo plazo medidos para un ángulo de elevación y una banda de frecuencias (o frecuencia concreta) diferentes a las requeridas en nuestros cálculos, suele ser recomendable tener en cuenta estas variaciones en ángulo de elevación y frecuencia.

3.3.2.1 Cálculo de las estadísticas de atenuación a largo plazo debido a la lluvia a partir de la intensidad de lluvia caída en un punto

El método que se detalla a continuación proporciona estimaciones a largo plazo de las estadísticas que facilitan la atenuación debida a la lluvia considerando trayectos oblicuos en un determinado punto para frecuencias de hasta 55GHz.

En la figura pueden verse los parámetros que es necesario conocer para efectuar los cálculos:

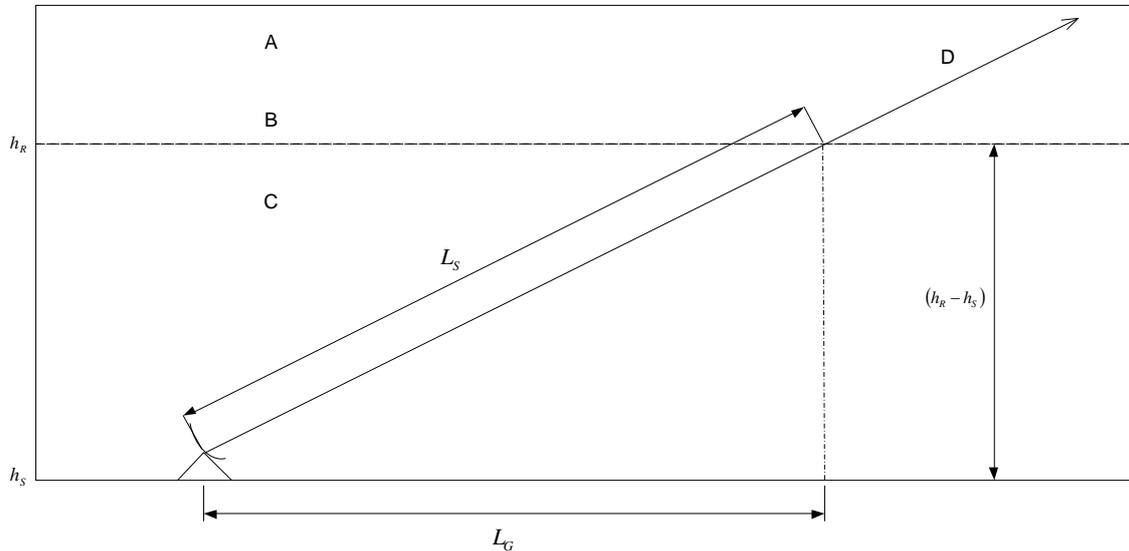


Figura 3-1: Trayecto Tierra-Espacio

Siendo:

- $R_{0.01}$: Intensidad de la lluvia en el punto local en el que se encuentra la estación terrena para el 0.01% de un año medio. Se mide en mm/h.
- h_s : Altura de la estación terrena sobre el nivel del mar, en km.
- θ : Ángulo de elevación, en grados.
- φ : Latitud de la estación terrena, en grados.
- f : Frecuencia, en GHz.

A continuación, se detalla paso por paso el procedimiento de cálculo según los pasos dados en la recomendación, y que se ha automatizado para la disposición de la herramienta de cálculo de balances de enlace.

Determinación de la altura efectiva de la lluvia

La altura efectiva de la lluvia no tiene un cálculo sencillo, y precisa de una fuerte carga de datos estadísticos difícil de recabar por el usuario. Se utiliza, por tanto otra recomendación de la UIT-R P839 [11] en la que se da un modelo de estimación de la altura de la lluvia para su uso en los métodos de predicción.

Dice la recomendación que cuando no se disponga de información específica sobre la altura de la lluvia, puede obtenerse a partir del valor medio de la altura de la isoterma de 0°C por encima del nivel del mar. Este valor puede calcularse utilizando el fichero de datos esa0height.txt, que puede obtenerse en la Oficina de Radiocomunicaciones de la UIT. Adicionalmente, para hacer uso de la base de datos es necesario apoyarse en los ficheros de datos esalat.txt y esalon.txt, que contienen respectivamente las latitudes y longitudes de los puntos de la cuadrícula dados por el fichero esa0height.txt.

La resolución alcanzada por el fichero de datos es de 1.5° de latitud y longitud. Si el punto del que se quiere obtener el valor de altura de lluvia no es exactamente uno de la cuadrícula, se realiza una interpolación entre los cuatro valores más cercanos para conseguir el valor más aproximado.

El Calculador de Balances de Enlace extrae de la base de datos de esta forma el valor correspondiente a la latitud y longitud deseadas, obteniéndose posteriormente la altura media de la lluvia por encima del nivel del mar, h_R , a partir de la isoterma del siguiente modo:

$$h_R = h_0 + 0.36km \quad (3-28)$$

Cálculo de la longitud del trayecto oblicuo

Existen dos métodos para calcular la longitud del trayecto oblicuo, y se optará por uno u otro en función del ángulo de elevación:

- Para $\theta \geq 5^\circ$ se calcula la longitud del trayecto oblicuo, L_S , en el espacio correspondiente a la altura de la lluvia mediante la expresión siguiente:

$$L_S = \frac{(h_R - h_S)}{\text{sen}\theta} \text{ km} \quad (3-29)$$

- Para $\theta < 5^\circ$ se utiliza esta otra fórmula:

$$L_S = \frac{2(h_R - h_S)}{\left(\text{sen}^2\theta + \frac{2(h_R - h_S)}{R_e} \right)^{1/2} + \text{sen}\theta} \text{ km} \quad (3-30)$$

En todo caso, si $h_R - h_S$ es menor o igual que cero, la atenuación debida a la lluvia prevista para cualquier porcentaje de tiempo es cero, y los pasos siguientes no son necesarios.

Determinación de la proyección horizontal del trayecto oblicuo

Se calcula con la fórmula:

$$L_G = L_S \cos \theta \text{ km} \quad (3-31)$$

Obtención de la intensidad de lluvia rebasada durante el 0.01% del tiempo de un año medio

Si no es posible obtener los datos estadísticos a largo plazo, puede realizarse una estimación utilizando los mapas de intensidad de lluvia que aparecen en la recomendación UIT-R P837 [9].

Del mismo modo que en apartados anteriores, en el presente proyecto se implementa la funcionalidad Matlab que da lugar a la obtención de estos valores. En concreto, la funcionalidad *rainrate* calcula la intensidad de lluvia excedida en una probabilidad

dada del año medio para una localización determinada, según los pasos explicados en el anexo I de la recomendación de la UIT citada.

Como en los casos anteriores, se precisa del apoyo de los ficheros de datos proporcionados por la UIT. En concreto, los ficheros contendrán valores numéricos obtenidos de 40 años de recogida de datos provenientes del Centro Europeo de Predicción Meteorológica.

Los ficheros en los que se apoyan los cálculos son los siguientes:

- Esarainlat_v5.txt y esarainlon_v5.txt contienen la latitud y longitud de cada uno de los datos reflejados en el resto de ficheros.
- P_{r6} , fichero esarain_pr6_v5.txt.
- M_t , fichero esarain_mt_v5.txt.
- β , esarain_btea_v5.txt.

Los pasos que sigue el programa para la obtención de los valores objetivo son exactamente los dados en la recomendación:

1. Extracción e las variables P_{r6} , M_t y β de los ficheros de datos. La precisión de la cuadrícula es de 1.125° , tanto parta latitud como para longitud.
2. Con los 4 valores extraídos para las variables P_{r6} , M_t y β , realizar la interpolación bilineal para ajustarlos exactamente a las coordenadas que se estén tratando.
3. Convertir M_t y β en M_C y M_S de acuerdo a las expresiones siguientes:

a.
$$M_C = \beta \cdot M_t \quad (3-32)$$

b.
$$M_S = (1 - \beta) \cdot M_t \quad (3-33)$$

4. Calcular el porcentaje de probabilidad de lluvia en un año medio, P_0

$$P_0(lat, lon) = P_{r6}(lat, lon) \cdot \left(1 - e^{-0.0079(M_S(lat, lon) / P_{r6}(lat, lon))}\right) \quad (3-34)$$

Si P_{r6} es igual a cero, la probabilidad en un año medio y la tasa de precipitaciones excedida en cualquier porcentaje de un año medio son iguales a cero, por lo que los siguientes pasos serían innecesarios.

Se obtiene la tasa de lluvia, R_p , excedida con una probabilidad $p\%$ de un año medio, donde $p \leq P_0$:

$$R_p(lat, lon) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \text{ mm/h} \quad (3-35)$$

Donde:

- $A = a \cdot b$
- $B = a + c \cdot \ln(p/P_0(lat, lon))$
- $C = \ln(p/P_0(lat, lon))$

Y:

- $a = 1.09$
- $b = \frac{(M_c(lat, lon) + M_s(lat, lon))}{2179P_0}$
- $c = 26.02b$

La aplicación permite realizar los cálculos matriciales necesarios para el cálculo de la tasa de lluvia R_p excedida en un año medio para una cuadrícula completa de pares (latitud, longitud), de modo que pueden obtenerse mapas de las zonas deseadas.

Hallar la atenuación específica

La atenuación específica debida a la lluvia, γ_R , viene dada por la siguiente expresión:

$$\gamma_R = k(R_{0,01})^\alpha \quad (3-36)$$

Para las polarizaciones de tipo circular y lineal, los coeficientes k y α vienen dados por las siguientes expresiones:

$$k = [k_H + k_V + (k_H + k_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2 \quad (3-37)$$

$$\alpha = [k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H + k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2k \quad (3-38)$$

Donde θ es el ángulo de elevación del trayecto y τ es el ángulo de inclinación de la polarización respecto a la horizontal (45° para polarización circular)

Calcular el factor de reducción horizontal

Se calcula el factor de reducción horizontal, $r_{0.01}$, para el 0.01% del tiempo, según la siguiente expresión:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38(1 - e^{-2L_G})} \quad (3-39)$$

Calcular el factor de ajuste vertical

Se calcula el factor de reducción vertical, $v_{0.01}$, para el 0.01% del tiempo, según la siguiente fórmula:

$$\zeta = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{h_R - h_S}{L_G r_{0.01}} \right) \text{ grados} \quad (3-40)$$

- Para $\zeta > \theta$,

$$L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} \text{ km} \quad (3-41)$$

- De otro modo,

$$L_R = \frac{(h_R - h_S)}{\operatorname{sen} \theta} \text{ km} \quad (3-42)$$

Por otro lado,

- Si $|\varphi| < 36^\circ$,

$$\chi = 36 - |\varphi| \text{ grados} \quad (3-43)$$

- De otro modo,

$$\chi = 0 \text{ grados} \quad (3-44)$$

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\text{sen}\theta} \left(31(1 - e^{-(\theta/(1+\chi))}) \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0.45 \right)} \quad (3-45)$$

Cálculo de la longitud efectiva del trayecto

De acuerdo a la expresión:

$$L_E = L_R v_{0.01} \quad (3-46)$$

Atenuación de rebasamiento resultante para el 0.01% del año medio

De todos los pasos anteriores se puede obtener la atenuación resultante con sólo multiplicar la atenuación específica por la longitud efectiva:

$$A_{0.01} = \gamma_R \cdot L_E \text{ dB} \quad (3-47)$$

Atenuación de rebasamiento resultante para otro porcentaje de un año medio

Para otros porcentajes de un año medio que estén comprendidos entre 0.001% y 5%, la atenuación de rebasamiento resultante puede obtenerse a partir de la atenuación de rebasamiento para el 0.01% del año medio, calculada en el paso anterior. Se obtendría del siguiente modo:

- Si $p \geq 1\%$ o $|\varphi| \geq 36^\circ$:

$$\beta = 0 \quad (3-48)$$

- Si $p < 1\%$, $|\varphi| < 36^\circ$ y $\theta \geq 25^\circ$:

$$\beta = -0.005(|\varphi| - 36) \quad (3-49)$$

- De otro modo:

$$\beta = -0.005(|\varphi| - 36) + 1.8 - 4.25 \operatorname{sen} \theta \quad (3-50)$$

Una vez obtenido el valor para β , la atenuación de rebasamiento estimada para el porcentaje de tiempo $p\%$ viene dada por:

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-(0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-p) \operatorname{sen} \theta)} \quad \text{dB} \quad (3-51)$$

3.3.2.2 Cálculo de la Atenuación debida a las Nubes y a la Niebla

La influencia de las nubes en la propagación de la señal aumenta cuando lo hace la frecuencia de trabajo. Esta influencia puede llegar a ser significativa en señales con frecuencias superiores a 10GHz o en sistemas en los que los requisitos de disponibilidad sean muy exigentes.

Para el cálculo de la atenuación debida a las nubes y la niebla recurrimos a la recomendación UIT-R P.840-5 [12], que trata precisamente sobre este cálculo. A continuación se detallan las consideraciones y cálculos que se realizan para llegar al resultado final.

Para las nubes y la niebla compuestas totalmente de gotas minúsculas, generalmente inferiores a 0,1 mm, la aproximación de Rayleigh es válida para frecuencias inferiores a 200 GHz. En este caso, puede expresarse la atenuación en términos del contenido total de agua líquida por unidad de volumen. Así pues, la atenuación específica en el interior de una nube o de la niebla puede expresarse como:

$$\gamma_C = K_I M \quad \text{dB/km} \quad (3-52)$$

Siendo:

γ_C : atenuación específica en la nube, en términos de dB/km .

K_I : coeficiente de atenuación específica, en $\left(\frac{\text{dB/km}}{\text{g/m}^3} \right)$

M : densidad de agua líquida en la nube o en la niebla, en g/m_3

En frecuencias del orden de 100 GHz y superiores, la atenuación debida a la niebla puede ser significativa. La densidad de agua líquida en la niebla es típicamente de unos $0,05 g/m^3$ en la niebla moderada (visibilidad del orden de 300 m) y de $0,5 g/m^3$ en niebla espesa (visibilidad del orden de 50 m).

Cálculo del coeficiente de atenuación específica

Para calcular el valor de K_l se puede utilizar un modelo matemático válido hasta frecuencias de 1000 GHz basado en la dispersión de Rayleigh, que utiliza un modelo Debye doble para la permitividad dieléctrica $\varepsilon(f)$ del agua. Por tanto:

$$K_l = \frac{0.819f}{\varepsilon''(1+\eta^2)} \text{ (dB/km)/(g/m}^3\text{)} \quad (3-53)$$

Donde f es la frecuencia, en GHz, y:

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''} \quad (3-54)$$

La permitividad dieléctrica compleja del agua viene dada por:

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p [1 + (f/f_p)^2]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s [1 + (f/f_s)^2]} \quad (3-55)$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{[1 + (f/f_p)^2]} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{[1 + (f/f_s)^2]} + \varepsilon_2 \quad (3-56)$$

Donde:

- $\varepsilon_0 = 77.6 + 103.3(\theta - 1)$
- $\varepsilon_1 = 5.48$
- $\varepsilon_2 = 3.51$
- $\theta = 300/T$
- T , la temperatura, medida en grados Kelvin

Las frecuencias de relajación principal y secundaria son:

$$f_p = 20.09 - 142(\theta - 1) + 294(\theta - 1)^2 \text{ GHz} \quad (3-57)$$

$$f_s = 590 - 1500(\theta - 1) \text{ GHz} \quad (3-58)$$

Contenido total de la columna de agua líquida de nube

El contenido total de la columna de agua líquida de nube, expresado en kg/m^2 o, de manera equivalente, en mm de agua líquida, puede obtenerse a partir de lanzamientos de radiosondas y mediciones radiométricas. Los datos obtenidos a partir de radiosondas son fáciles de obtener; sin embargo, presentan una resolución temporal limitada y se aplican únicamente a trayectos cenitales. El contenido total de la columna de agua líquida de nube puede obtenerse a partir de mediciones radiométricas en las frecuencias apropiadas a lo largo del trayecto deseado.

Los valores anuales del contenido total de la columna de agua líquida de nube, $L(\text{kg/m}^2)$, que exceden durante el 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30; 50; 60; 70; 80; 90; 95 y 99 por ciento de un año promedio están disponibles en forma de mapas digitales en el sitio web de la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones, en los archivos de datos ESAWRED_xx_v4.TXT, donde xx = 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30; 50; 60; 70; 80; 90; 95 y 99. Los datos corresponden a 0° hasta 360° de longitud y a $+90^\circ$ hasta -90° de latitud, con una resolución de $1,125^\circ$ tanto en latitud como en longitud. Estos datos deben utilizarse conjuntamente con los archivos de datos complementarios ESALAT_1dot125.TXT y ESALON_1dot125.TXT, que contienen las latitudes y longitudes de las entradas correspondientes (puntos de la cuadrícula) en los archivos de datos ESAWRED_xx_v4.TXT. Puede deducirse el contenido total de la columna de agua líquida de nube en cualquier emplazamiento de la superficie terrestre mediante el siguiente método de interpolación:

- determinar las dos probabilidades P_{encima} y P_{debajo} por encima y por debajo de la probabilidad deseada, p , del conjunto: 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30; 50; 60; 70; 80; 90; 95 y 99%;

- b) para las dos probabilidades P_{encima} y P_{debajo} , determinar el contenido de la columna total de agua líquida de nube L_1 , L_2 , L_3 y L_4 en los cuatro puntos más cercanos de la cuadrícula;
- c) determinar el contenido total de la columna de agua líquida de nube L_{encima} y L_{debajo} con las probabilidades P_{encima} y P_{debajo} , mediante una interpolación bilineal de los cuatro valores del contenido total de la columna de agua líquida de nube L_1 , L_2 , L_3 y L_4 en los cuatro puntos de la cuadrícula;
- d) determinar el contenido total de la columna de agua líquida de nube, L , con la probabilidad deseada, p , interpolando L_{encima} y L_{debajo} contra P_{encima} y P_{debajo} para p en una escala lineal L contra $\log(p)$.

Atenuación debida a las nubes

Para obtener la atenuación debida a las nubes para un valor de probabilidad determinado, deben conocerse las estadísticas del contenido total de la columna de agua líquida $L(kg/m^2)$, o de forma equivalente, milímetros de agua precipitable para un emplazamiento determinado, que se han calculado en el apartado previo.

Para calcular la atenuación debida a las nubes:

$$A = \frac{L \cdot K_l}{\text{sen} \theta} \text{ dB para } 90^\circ \geq \theta \geq 5^\circ \quad (3-59)$$

Siendo θ el ángulo de elevación y K_l la atenuación específica previamente calculada.

Además de proporcionar la información complementaria ya explicada, el Calculador Automático de Balances de Enlace tendrá en cuenta toda la información descrita en apartados anteriores para el cálculo de la atenuación bajo las condiciones dadas en los balances de enlace ascendente y descendente

4 Secuencia de Cálculos para Balances de Enlace

Una buena parte de los datos son procesados de forma automática antes de comenzar la secuencia de cálculos que llevarán al cálculo de los valores del Balance de Enlace.

Posicionamiento

El primero de estos cálculos es el asociado con el posicionamiento de estación terrestre y satélite. Partiendo las coordenadas de latitud y longitud de la estación y de la longitud orbital en la que está situado el satélite, se obtienen:

- Acimut y Elevación
- Distancia de Propagación
- Retardo de Propagación

Estos valores se utilizarán recurrentemente en el proceso de cálculo del Balance de Enlace y con diversos objetivos: desde el cálculo de las pérdidas en espacio libre o el trayecto atmosférico recorrido por la señal a la consideración de las columnas de vapor de agua dado el posicionamiento de la estación terrestre.

Además, tendrán que ser calculados tanto para el *uplink* como para el *downlink*, puesto que normalmente se encontrarán en posiciones diferentes del globo.

4.1 Parámetros relacionados con el Enlace Ascendente

Para el Enlace Ascendente, los parámetros necesarios vendrán dados principalmente por las características técnicas de la estación transmisora, su localización y la posición orbital del satélite.

Con esta información se obtienen valores para la atenuación atmosférica L_{ATM}^{UL} , inherente al paso de la señal electromagnética a través de la atmósfera. Para la obtención de este valor serán necesarios, además de los de posicionamiento, estos datos:

- Frecuencia de operación
- Altitud de la estación terrestre
- Presión atmosférica

- Temperatura

Adicionalmente, se calculan parámetros de indisponibilidad (a partir de la disponibilidad exigida en el enlace), medida tanto en porcentaje como en minutos por año.

Se han creado funciones dedicadas al cálculo de las atenuaciones debidas a:

- El paso de la señal electromagnética a través de la atmósfera, función de Atenuación Atmosférica *atmospheric_att*.
- El efecto de la lluvia y las nubes sobre la portadora, cuyo valor se obtendrá en función de la disponibilidad deseada para el enlace. Es la Atenuación por lluvia y nubes, para la que se ha generado la función *cloud_att*.

Igualmente, se computa el valor del desplazamiento de la polarización, según las siguientes fórmulas:

$$aux1 = LON_{UL} - LON_{SAT} - 360 \cdot \left| \frac{LON_{UL} - LON_{SAT}}{360} \right| \quad (4-1)$$

Sin embargo, este valor debe estar comprendido entre -180 y 180 para el siguiente cálculo, por lo que se adapta el valor a *aux1a*.

Finalmente se calcula la polarización en el enlace ascendente:

$$POL_{UL} = \left(\frac{180}{\pi} \right) \cdot \arctan \left(\operatorname{seno} \left(\frac{(aux1a \cdot \pi / 180)}{LAT_{UL} \cdot \pi / 180} \right) \right) \quad (4-2)$$

Se calcula también la densidad espectral de potencia de la transmisión de la estación terrestre, dadas su PIRE y el ancho de banda de la portadora:

$$S_{UL} = PIRE_{UL} - 10 \log_{10} (BW_{EQ_RECT-C}) \quad (4-3)$$

4.2 Parámetros relacionados con el Satélite

Respecto a la parte receptora del satélite, que es la que interviene principalmente en el enlace ascendente, existen una serie de conceptos que conviene revisar antes de comentar los cálculos que se realizan para el mismo.

La Densidad de Flujo es una medida de la energía que es posible recoger tras ser emitida por una fuente de transmisión. En el caso que nos ocupa, la fuente de transmisión será la estación terrestre y el receptor la antena de nuestro satélite.

Se calcula para el Satélite la Densidad de Flujo de Potencia de Entrada, conocida por sus siglas en inglés IPFD (*Input Power Flux Density*), según esta expresión:

$$IPFD_{SAT} (dBW/m^2) = PIRE_{UL} (dBW) - L_{ATM}^{UL} (dB) - L_{DESAPUNT}^{UL} (dB) - 10 \log_{10} (4\pi \cdot (Dist_{UL} (m))^2) \quad (4-4)$$

Donde

- $PIRE_{UL}$ es la PIRE de la estación terrestre, medida en dBW
- L_{ATM}^{UL} las pérdidas debidas a la atenuación atmosférica, en dB.
- $L_{DESAPUNT}^{UL}$ las pérdidas por desapuntamiento entre antenas, medidas en dB.
- $Dist_{UL}$ es la distancia que separa, en el camino ascendente, la estación transmisora del satélite, medida en metros.

La Densidad de Flujo de Potencia para la que el Transpondedor del Satélite entra en saturación es un parámetro de diseño del mismo, dependiente de las características técnicas de las antenas del satélite y su etapa receptora. Se conoce como SFD (*Saturation Flux Density*), se mide en dB/m².

El Transpondedor del Satélite tendrá unas limitaciones de potencia de entrada y salida dadas por el margen que es preceptivo dejar entre el punto de trabajo y el de máxima ganancia sin distorsión, punto de compresión de 1dB. Este margen se conoce como punto de Back-off de entrada (IBO). Además, factores como la potencia máxima que

puede suministrar a su salida y el punto de Back-off de salida (OBO) determinarán la ganancia total del transpondedor según la expresión:

$$G_{TXPD-SAT} = PIRE_{SAT} - SFD_{SAT} - IBO_{SAT} + OBO_{SAT} \quad (4-5)$$

En función del valor de IPFD calculado para el enlace en cuestión, se determinará qué porcentaje de la PIRE disponible en el transpondedor se destinará a la portadora para la que se esté calculando el enlace. Se seguirá la siguiente lógica:

- Si la IPFD recibida es superior a la SFD, toda la potencia del transpondedor irá destinada a ella.
- Si la IPFD es inferior a la SFD pero no se respeta el IBO, la PIRE destinada a nuestra portadora será:

$$PIRE_{PC} = IPFD_{SAT} + G_{TXPD-SAT} - (IBO - OBO) \cdot \frac{(IPFD_{SAT} - (SFD_{SAT} - IBO_{SAT}))}{IBO_{SAT}} \quad (4-6)$$

- Si está por debajo del IBO, la PIRE para la portadora vendrá dada por la Densidad de Flujo a la entrada y la ganancia total del transpondedor:

$$PIRE_{PC} = IPFD_{SAT} + G_{TXPD-SAT} \quad (4-7)$$

La densidad espectral de PIRE vendrá dada, por tanto, por la PIRE destinada a la portadora repartida en todo el ancho de banda de la misma:

$$S_{PIRE} = PIRE_{PC} * 10 \log_{10} (BW_{EQ_RECT-C}) \quad (4-8)$$

Por otro lado, se realiza el cálculo de PIRE disponible por ancho de banda, $PIRE_{PBW}$, según estas directrices:

- Si la portadora tiene un ancho de banda asignado menor que el del transpondedor del satélite, que debería ser el caso nominal:

$$PIRE_{PBW} = PIRE_{SAT} - OBO_{SAT} + 10 \log_{10} \left(\frac{BW_{AS-C}}{BW_{TXPD}} \right) \quad (4-9)$$

- Si no:

$$PIRE_{PBW} = PIRE_{SAT} - OBO_{SAT} \quad (4-10)$$

Se calculan, por tanto, los valores de PIRE por portadora y por ancho de banda, de modo que pueden sacarse fácilmente conclusiones sobre el uso que se está haciendo del recurso satélite, y en qué medida se están disponiendo de la potencia o del ancho de banda que el mismo tiene capacidad de facilitar.

Por otro lado, se hacen una serie de cálculos relacionados con la aparición de lluvia en el enlace ascendente. Habrá que tener en cuenta la atenuación debida a la lluvia y a las nubes para el tiempo que se desee la disponibilidad, y esta atenuación afectará a la Densidad de flujo de potencia de entrada al satélite. Como la señal es más atenuada, llegará con menor potencia al punto en el que se encuentra el satélite, por lo que los cálculos para la Densidad de Flujo de Potencia de entrada será obtenida de la expresión:

$$IPFD_{SAT/LLUV-UL} (dBW/m^2) = IPFD_{SAT} - L_{LLUVIA}^{UL} - L_{NUBES}^{UL} \quad (4-11)$$

Con estos valores de IPFD se recalculan las PIRE para cada uno de los casos que se han comentado previamente con objeto de ser luego usados en las estadísticas.

4.3 Parámetros relacionados con el Enlace Descendente

Como se ha comentado en apartados previos, el posicionamiento de la estación receptora y la longitud orbital del satélite serán necesarios para la obtención de valores adecuados para:

- Acimut y Elevación
- Distancia de Propagación
- Retardo de Propagación

En el caso del enlace descendente, la posición geográfica de la estación receptora y la altitud de la misma, la posición orbital del satélite y las características técnicas del sistema de recepción propio de la estación serán factores determinantes del propio balance de enlace.

Con esta información de partida, y con los datos siguientes:

- Frecuencia de operación
- Altitud de la estación terrestre
- Presión atmosférica
- Temperatura

se generan los cálculos con los que se consiguen los valores para la atenuación atmosférica en el enlace descendente L_{ATM}^{DL} , debida a la atenuación producida por los gases atmosféricos en el trayecto de la señal a través de la misma.

Del mismo modo, y a través de funciones específicas, se obtienen las atenuaciones debidas a lluvia y las nubes en función de la disponibilidad deseada.

Los datos que definirán el comportamiento en recepción de la estación terrestre serán los siguientes:

- Temperatura de ruido del LNA
- Figura de ruido del resto de la cadena de recepción
- Temperatura

En los apartados siguientes se detallará el modo en el que estos parámetros afectan al Balance de Enlace.

Se calculan los valores de desplazamiento de la polarización de forma similar a como se realizaba para el enlace ascendente:

$$aux1 = LON_{DL} - LON_{SAT} - 360 \cdot \left| \frac{LON_{DL} - LON_{SAT}}{360} \right| \quad (4-12)$$

El valor se adapta a $aux1a$, comprendido entre -180° y 180° para el cálculo final de la polarización en el enlace descendente:

$$POL_{DL} = \left(\frac{180}{\pi} \right) \cdot \arctan \left(\operatorname{seno} \left(\frac{(aux1a \cdot \pi / 180)}{LAT_{DL} \cdot \pi / 180} \right) \right) \quad (4-13)$$

Adicionalmente, se calculan las pérdidas en espacio libre a partir de la frecuencia a la que se produce la comunicación y la distancia recorrida por la señal desde el satélite hasta la estación receptora.

Por otro lado, se calculan todas las temperaturas y figuras de ruido relativas al LNA, en principio sin tener en cuenta la lluvia ni en el enlace descendente ni en el ascendente.

4.3.1 Ruido

El ruido es una perturbación eléctrica que impone un límite a la calidad de funcionamiento de cualquier sistema radioeléctrico. En el caso de las comunicaciones por satélite, las señales son tan débiles que la importancia del impacto del ruido en el sistema se torna fundamental.

Las fuentes de ruido pueden naturales o artificiales, y además pueden clasificarse en externas o internas al sistema.

Las fuentes de ruido externas están asociadas a la radiación producida por elementos naturales, como la tierra, el cielo, y los efectos del medio sobre esta radiación (lluvia, gases atmosféricos)

Las fuentes internas de ruido están relacionadas con los circuitos pasivos de conexión de la antena al receptor y el propio receptor.

El ruido artificial aparece como consecuencia de actividades industriales, pero a diferencia del ruido natural de radiación no tiene una densidad espectral de potencia plana y su espectro disminuye al incrementarse la frecuencia. Es despreciable a partir de la banda de 1GHz, por lo que no lo consideraremos a la hora de realizar los cálculos, puesto que en comunicaciones por satélite se opera a frecuencias sustancialmente superiores.

La influencia del ruido sobre la calidad de las comunicaciones puede evaluarse a través del valor normalizado de la potencia total de ruido, que engloba el ruido captado por la antena y el generado por ella. De hecho, se puede considerar la antena como un colector que recibe simultáneamente señal de información y ruido.

El concepto de temperatura de ruido es muy utilizado en sistemas de comunicaciones. La temperatura de ruido de un elemento se define como la temperatura a la que debería estar un componente pasivo, por ejemplo una resistencia, para generar el mismo ruido que el propio elemento.

Es conveniente caracterizar los dispositivos que forman parte de sistemas de microondas y sus componentes por su temperatura de ruido. De esta forma se proporciona un modo para determinar cuánto ruido se genera en los dispositivos activos y pasivos de un sistema de recepción, modelándolo como una serie de elementos ideales, con las mismas prestaciones pero que no generan ruido, y las fuentes de ruido a la temperatura equivalente asociadas.

La potencia de ruido normalizada se calcula con la expresión:

$$N = kT_{eq}B \quad (4-14)$$

Donde:

- k : es la constante de Boltzmann, $k = 1.38 \cdot 10^{-23} J / K$, que también puede expresarse en decibelios como $k = -228.6 dBW / Hz / K$.

- T_{eq} : es la temperatura equivalente de ruido.
- B : es el ancho de banda del instrumento de medida, medido en Hercios.

Se deduce claramente de la ecuación anterior que la potencia de ruido es directamente proporcional al ancho de banda.

La figura de ruido se usa frecuentemente para especificar el ruido generado por un dispositivo, y con ella se logra medir la degradación de la relación señal a ruido entre la entrada y la salida producida por un elemento:

$$F = \frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}} \quad (4-15)$$

Puede expresarse en decibelios:

$$F(dB) = (S/N)_{in,dB} - (S/N)_{out,dB} \quad (4-16)$$

La temperatura equivalente de ruido del sistema caracteriza del mismo modo al sistema, y se relaciona con la figura de ruido como:

$$T_{eq} = (F - 1) \cdot T_0 \quad (4-17)$$

Donde $T_0 = 290^\circ K$ es la temperatura de referencia.

En el caso que nos ocupa, se calcularán por separado las contribuciones a la temperatura de ruido relativas al punto de entrada del Amplificador de Bajo Ruido, de modo que pueda obtenerse la temperatura de ruido del sistema como la suma de las contribuciones de cada componente del sistema al ruido.

Podemos modelar el sistema de modo que puedan calcularse las diferentes temperaturas de ruido equivalentes respecto al LNA:

$$T_{SIST} = T_{IN} + T_{LNA} + \frac{T_{RX}}{G_{LNA}} \quad (4-18)$$

Debidas a la antena y las pérdidas debidas al alimentador y guía de onda:

$$T_{IN} = G_{RF} T_{ANT} + T_{AMB} \cdot (1 - G_{RF}) \quad (4-19)$$

Donde T_{AMB} es la temperatura ambiente, T_{ANT} la temperatura de ruido de la antena y $G_{RF} = 1/L_{RF}$ las pérdidas asociadas con alimentador y guía de onda.

4.3.2 G/T

La figura de mérito que caracteriza de forma más clara el comportamiento de un sistema en recepción es la G/T. Se define como la relación entre la ganancia de la antena a la frecuencia de recepción y en la dirección del satélite, y la temperatura de ruido del sistema referida a la entrada del receptor.

No es una característica exclusivamente dependiente de la antena, aunque un buen diseño de la misma tiene un efecto inmediato en el aumento de esta figura de mérito.

La fórmula general utilizada para la obtención de la G/T, habitualmente expresada en términos de decibelios por Kelvin, dB(K⁻¹) es a partir de la cual se calcula en la aplicación. Es necesario que tanto la ganancia como la temperatura de ruido del sistema estén referidas al mismo punto del sistema. Tal como se realizan los cálculos en el programa este punto sería la entrada del Amplificador de Bajo Ruido:

$$G/T_{NOLLUVIA} = G_{ANT}^{RX} - L_{DESAPUNT} - L_{RF} - L_{RAD} - 10 \cdot \log(T_{SIST}^{NOLLUVIA}) \quad (4-20)$$

Donde G_{ANT}^{RX} es la ganancia de la antena en recepción, $L_{DESAPUNT}$ las pérdidas por desapuntamiento, L_{RF} las pérdidas debidas a alimentador y guía de onda y L_{RAD} las del radomo.

4.3.3 Efectos de la lluvia

En sistema de radiocomunicaciones por satélite, especialmente cuando operan a frecuencias por encima de 10GHz, las pérdidas debidas a efectos atmosféricos y precipitaciones deberían ser contempladas en la obtención de la figura de mérito de recepción del sistema.

Normalmente estas pérdidas se obtienen para un porcentaje de tiempo determinado, un factor muy a tener en cuenta puesto que los tiempos de disponibilidad que determinan la calidad afectan directamente al dimensionamiento del enlace y son requerimientos de diseño de la estación

Nótese que la figura de mérito G/T es un valor dependiente de la temperatura de ruido, que se verá fuertemente afectada si consideramos factores atmosféricos.

En caso de considerar la lluvia, las expresiones:

$$T_{SIST} = T_{IN} + T_{LNA} + \frac{T_{RX}}{G_{LNA}} \quad (4-21)$$

$$T_{IN} = G_{RF} T_{ANT} + T_{AMB} \cdot (1 - G_{RF}) \quad (4-22)$$

Siguen siendo válidas, pero la temperatura de entrada T_{IN} será diferente a cuando no se considera la lluvia en el enlace, en la medida en la que cambie la temperatura de la antena a causa de la lluvia.

En concreto, se calculará la temperatura de antena como sigue:

$$T_{ANT}^{LLUVIA} = \frac{T_{CIELO}}{\frac{L_{LLUVIA}}{L_{RAD}}} - \frac{(T_{ANT}^{TOTAL} - T_{CIELO})}{L_{RF}} \quad (4-23)$$

Donde T_{CIELO} es la temperatura del cielo, L_{LLUVIA} las pérdidas debidas a la lluvia y T_{ANT}^{TOTAL} la temperatura de ruido de la propia antena, sin consideraciones externas.

Por otro lado, puede calcularse la temperatura de la lluvia como:

$$T_{LLUVIA} = 1.12 \cdot (273 + T_{AMB}) - 50 \quad (4-24)$$

Se calcula, por tanto la contribución de la lluvia a la temperatura se cuantifica como:

$$T_{ADICIONAL}^{LLUVIA} = \frac{T_{LLUVIA} \cdot (L_{LLUVIA} - 1)}{L_{LLUVIA} / L_{RAD} / L_{RF}} \quad (4-25)$$

$$T_{SIST}^{LLUVIA} = T_{SIST}^{NOLLUVIA} + T_{ADICIONAL}^{LLUVIA} \quad (4-26)$$

Y la figura de mérito G/T:

$$G/T_{LLUV-DL} = G_{ANT}^{RX} - L_{DESAPUNT} - L_{RF} - L_{RAD} - 10 \cdot \log(T_{SIST}^{LLUVIA}) \quad (4-27)$$

Para valorar el impacto de la lluvia en el cálculo, se establecen dos relaciones entre parámetros calculados con lluvia y sin ella:

- Degradación de la G/T debido a la lluvia:

$$DEG_{G/T}^{LLUV-DL} = 10 \log \left(\frac{G/T_{LLUV-DL}}{G/T_{NOLLUVIA}} \right) \quad (4-28)$$

- Degradación del enlace descendente debido a la lluvia, que podemos establecer como la suma de la atenuación producida por la lluvia y la disminución en la G/T:

$$DEG_{DOWNLINK}^{LLUV-DL} = DEG_{G/T}^{LLUV-DL} + L_{LLUV-DL} \quad (4-29)$$

4.4 Interferencias

Los propios equipos que componen el sistema de comunicaciones vía satélite son equipos no ideales, por lo que habrá que considerar los efectos de las no linealidades de los mismos.

Adicionalmente, cualquier sistema de comunicaciones por satélite tiene que compartir el medio con otros sistemas, por lo que pueden producirse perturbaciones de distinta naturaleza que afecten al balance de enlace bajo estudio.

La forma más práctica de tratar las interferencias en un cálculo de balance de enlace consiste en añadir un nuevo término de ruido calculado en función de estas interferencias, y es lo que se obtendrá en los apartados siguientes para cada uno de los tramos de enlace.

4.4.1 Enlace Ascendente

4.4.1.1 Intermodulación del Amplificador de la Estación Transmisora

Particularizando para el enlace ascendente, los factores que habrá que tener en cuenta en cuanto a los equipos pertenecientes al propio sistema serán los productos de Intermodulación del Amplificador de Potencia de la estación transmisora. El parámetro que definirá esta interferencia será el ratio potencia de portadora frente a intermodulación, C/IM_{HPA}^{TX} , medida en decibelios.

4.4.1.2 Interferencias Externas

Pasando a las interferencias externas al sistema, se enumeran a continuación las que se van a considerar en la implementación de la aplicación, y que son del tipo de interferencia que entran en la antena de recepción del satélite:

- Interferencia del canal adyacente en enlace ascendente, originada en el propio satélite y debida a otros canales adyacentes al que se está considerando. Todas se miden en decibelios, $C/I_{CAN-ADJ}^{UL}$

- Interferencia de satélite adyacente en enlace ascendente, debida a la transmisión desde un satélite distinto al objetivo pero que puede encontrarse en longitudes orbitales muy cercanas, $C/I_{SAT-ADJ}^{UL}$
- Interferencia de polarización cruzada en enlace ascendente, con origen en el propio satélite y asociada a la utilización de la polarización cruzada del mismo. Se denomina C/I_{POL-CR}^{UL}

La suma, producto de la contribución de los distintos tipos de interferencias que se han enumerado, viene dada por:

$$C/I_{TOTAL/NO LLUVIA}^{UL} = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{10^{C/I_{CAN-ADJ}^{UL}/10}} + \frac{1}{10^{C/I_{SAT-ADJ}^{UL}/10}} + \frac{1}{10^{C/I_{POL-CR}^{UL}/10}} \right) \quad (4-30)$$

En el caso de que exista lluvia en el enlace ascendente, tendremos que incluir los efectos de ésta sobre la propia portadora. Será el valor de potencia de la señal portadora el que se vea afectado por la atenuación de la lluvia, perturbando directamente las relaciones de portadora a interferencia originales, de modo que:

$$C/I_{TOTAL/LLUV-UL}^{UL} = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{10^{(C/I_{CAN-ADJ}^{UL} - I_{LLUV}^{UL})/10}} + \frac{1}{10^{(C/I_{SAT-ADJ}^{UL} - I_{LLUV}^{UL})/10}} + \frac{1}{10^{(C/I_{POL-CR}^{UL} - I_{LLUV}^{UL})/10}} \right) \quad (4-31)$$

En el caso de que aparezca lluvia en el enlace descendente, las interferencias e intermodulaciones asociadas al enlace ascendente no se ven afectadas. Por ello, todos los cálculos anteriores son válidos.

En función de si la lluvia también aparece en el enlace ascendente o no lo hace, se puede expresar que:

$$C/I_{TOTAL/LLUV-DL}^{UL} = C/I_{TOTAL}^{UL} \quad (4-32)$$

$$C/I_{TOTAL/LLUV-ULDL}^{UL} = C/I_{TOTAL/LLUV-UL}^{UL} \quad (4-33)$$

4.4.2 Enlace descendente

4.4.2.1 Intermodulación del Transpondedor

En el caso del enlace descendente, la Intermodulación a considerar será la asociada al Amplificador de Potencia situado en el Transpondedor del Satélite, que tampoco presenta un funcionamiento completamente lineal. La parametrización de la no linealidad se efectúa a partir de la relación entre la potencia de la señal portadora y los productos de intermodulación, C/IM_{HPA}^{SAT} .

Cuando exista lluvia en el enlace ascendente, el valor del ratio entre la señal portadora y los productos de intermodulación se verá rebajado al ser el nivel de la señal portadora afectado precisamente por la atenuación que aparece:

$$C/IM_{HPA/LLUV-UL}^{SAT} = C/IM_{HPA}^{SAT} - (PIRE_{PC} - PIRE_{PC/LLUV-UL}) \quad (4-34)$$

Si la lluvia se presenta sólo en el enlace descendente, no será necesario suponer ninguna variación en esta relación, puesto que el efecto se produce en una etapa posterior a la examinada:

$$C/IM_{HPA/LLUV-DL}^{SAT} = C/IM_{HPA/NOLLUVIA}^{SAT} \quad (4-35)$$

De la exposición anterior se deriva que, cuando exista lluvia tanto en el enlace ascendente como en el descendente:

$$C/IM_{HPA/LLUV-ULDL}^{SAT} = C/IM_{HPA/LLUV-UL}^{SAT} \quad (4-36)$$

4.4.2.2 Interferencias Externas

En cuanto a las interferencias externas al sistema, las que se van a considerar son las equivalentes a las comentadas previamente para el enlace ascendente, pero en este caso serán las que interfieran en la antena de la estación receptora:

- Interferencia del canal adyacente en enlace descendente, $C/I_{CAN-ADJ}^{DL}$
- Interferencia de satélite adyacente en enlace descendente, $C/I_{SAT-ADJ}^{DL}$
- Interferencia de polarización cruzada en enlace descendente, C/I_{POL-CR}^{DL}

De forma paralela a la calculada en el apartado anterior, la expresión con la que se obtiene la suma de las contribuciones de los distintos tipos de interferencias es la siguiente:

$$C/I_{TOTAL/NO LLUVIA}^{DL} = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{10^{C/I_{CAN-ADJ}^{DL}/10}} + \frac{1}{10^{C/I_{SAT-ADJ}^{DL}/10}} + \frac{1}{10^{C/I_{POL-CR}^{DL}/10}} \right) \quad (4-37)$$

Al igual que ocurría con los productos de intermodulación en caso de aparición de lluvia en el enlace ascendente, la portadora transmitida por el enlace se ve afectada por la lluvia, de modo que sería necesario recalcular la $C/I_{TOTAL/LLUV-UL}^{DL}$:

$$C/I_{TOTAL/LLUV-UL}^{DL} = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{10^{\frac{(C/I_{CAN-ADJ}^{DL} - (PIRE_{PC} - PIRE_{PC/LLUV-UL}))}{10}}} + \frac{1}{10^{\frac{(C/I_{SAT-ADJ}^{DL} - (PIRE_{PC} - PIRE_{PC/LLUV-UL}))}{10}}} + \frac{1}{10^{\frac{(C/I_{POL-CR}^{DL} - (PIRE_{PC} - PIRE_{PC/LLUV-UL}))}{10}}} \right) \quad (4-38)$$

Cuando se tiene en cuenta la lluvia sólo en el *downlink*, el nivel de señal de la portadora se verá disminuido en función de la atenuación debida a esa lluvia en el enlace descendente.

Teniendo esto en cuenta, se puede recalcular la relación de portadora a interferencia, de forma que:

$$C/I_{TOTAL/LLUV-DL}^{DL} = -10 \cdot \log \left(\frac{\frac{1}{10^{\frac{(C/I_{CAN-ADJ-L_{LLUV}}^{DL})}{10}}}} + \frac{1}{10^{\frac{(C/I_{SAT-ADJ-L_{LLUV}}^{DL})}{10}}}} + \frac{1}{10^{\frac{(C/I_{POL-CR-L_{LLUV}}^{DL})}{10}}}} \right) \quad (4-39)$$

En el caso en el que concurriera la lluvia tanto en el enlace ascendente como en el descendente, los efectos de cada una de ellas se superpondrían, dando lugar a una relación portadora a interferencia aún más debilitada y obtenida según la expresión siguiente:

$$C/I_{TOTAL/LLUV-ULDL}^{DL} = -10 \cdot \log \left(\frac{\frac{1}{10^{\frac{((C/I_{CAN-ADJ-L_{LLUV}}^{DL})-(PIRE_{PC}-PIRE_{PC/LLUV-UL}))}{10}}}} + \frac{1}{10^{\frac{((C/I_{SAT-ADJ-L_{LLUV}}^{DL})-(PIRE_{PC}-PIRE_{PC/LLUV-UL}))}{10}}}} + \frac{1}{10^{\frac{((C/I_{POL-CR-L_{LLUV}}^{DL})-(PIRE_{PC}-PIRE_{PC/LLUV-UL}))}{10}}}} \right) \quad (4-40)$$

4.5 Resultados Globales

El último paso en el cálculo del Balance de Enlace consistirá en la combinación de los resultados obtenidos para los enlaces ascendente y descendente, comparándose el resultado con un requisito mínimo que debe sacarse de la especificación de diseño original.

La aplicación realiza todos los cálculos necesarios para la obtención, en último término, de los márgenes finales con los que contará el sistema para las diferentes situaciones que pueden darse:

- Enlace sin lluvia,
- Lluvia en enlace ascendente,
- Lluvia en enlace descendente o,
- Lluvia en enlaces ascendente y descendente.

Aunque la metodología empleada es genérica, a cada uno de los casos se le aplicará unas consideraciones particulares, que se detallarán en cada uno de los apartados que se presentan a continuación.

En cualquier caso, estos márgenes finales para cada caso serán los que aseguren que el comportamiento del sistema será el esperado para las condiciones de contorno que se asumen como.

Aunque finalmente estarán relacionadas, pueden establecerse una primera separación de los cálculos en dos partes, una asociada al enlace ascendente y otra asociada al descendente. Posteriormente se ligarán ambos cálculos para la obtención de los valores del Balance de Enlace completo.

4.5.1 Enlace Sin Lluvia

En el caso del enlace sin lluvia, se calcula directamente la relación portadora a ruido C/N para el enlace ascendente a través de la siguiente expresión:

$$C/N_{NOLLUVIA}^{UL} = PIRE_u + G/T_{SAT} - L_{FSL}^{UL} - L_{ATM}^{UL} - L_{DESAPUNT}^{UL} + k - 10 \cdot \log(BW_{OC-C}) \quad (4-41)$$

Donde $PIRE_u$ es la PIRE de la estación transmisora, G/T_{SAT} la figura de mérito G/T del satélite, L_{FSL}^{UL} las pérdidas en espacio libre, L_{ATM}^{UL} las atmosféricas, $L_{DESAPUNT}^{UL}$ las debidas al desapuntamiento, $k = -228.6 \text{ dB}/^\circ \text{ K/Hz}$ la constante de Boltzmann, expresada en dB/K/Hz; y BW_{OC-C} el ancho de banda ocupado por la portadora, en hercios.

Para el enlace descendente, el cálculo de la relación portadora a ruido se realiza de esta forma:

$$C/N_{NOLLUVIA}^{DL} = PIRE_{PC}^{SAT} + G/T_{NOLLUVIA} - L_{FSL}^{DL} - L_{ATM}^{DL} - L_{DESAPUNT}^{DL} + k - 10 \cdot \log(BW_{OC-C}) \quad (4-42)$$

Donde $PIRE_{PC}^{SAT}$ es la PIRE dedicada a la portadora de la disponible en el satélite, $G/T_{NOLLUVIA}$ la figura de mérito de la estación receptora, L_{FSL}^{DL} las pérdidas en espacio libre en el camino descendente, L_{ATM}^{DL} las atmosféricas, $L_{DESAPUNT}^{DL}$ las debidas al desapuntamiento, $k = -228.6 \text{ dB}/^\circ \text{ K/Hz}$ la constante de Boltzmann, expresada en dB/K/Hz; y BW_{OC-C} el ancho de banda ocupado por la portadora, en hercios.

El siguiente paso es sumar todas las contribuciones, tanto de señal como de ruido, que se han contemplado en el cálculo del balance de enlace.

De este modo, puede obtenerse la relación $C/(N+I)$ en unidades naturales a través de:

$$\begin{aligned} (C/(N+I)_{NOLLUVIA})^{-1} = & ((C/IM)_{HPA}^{TX})^{-1} + ((C/I)_{TOTAL/NOLLUVIA}^{UL})^{-1} + \\ & ((C/N)_{NOLLUVIA}^{UL})^{-1} + ((C/IM)_{HPA}^{SAT})^{-1} + ((C/I)_{TOTAL/NOLLUVIA}^{DL})^{-1} + ((C/N)_{NOLLUVIA}^{DL})^{-1} \end{aligned} \quad (4-43)$$

De aquí se extrae el cálculo de la $C/(N + I)$ en decibelios:

$$\frac{C}{N + I_{NOLLUVIA}} = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{10^{C/IM_{HPA}^{TX}/10}} + \frac{1}{10^{C/I_{TOTAL}^{UL}/10}} + \frac{1}{10^{C/N_{NOLLUVIA}^{UL}/10}} + \frac{1}{10^{C/IM_{HPA}^{SAT}/10}} + \frac{1}{10^{C/I_{TOTAL}^{DL}/10}} + \frac{1}{10^{C/N_{NOLLUVIA}^{DL}/10}} \right) \quad (4-44)$$

Una vez se ha obtenido la $C/(N + I)_{NOLLUVIA}$, el cálculo de la $E_b/(N_0 + I_0)$ total sin lluvia se calcula con la siguiente expresión:

$$E_b/(N_0 + I_0)_{NOLLUVIA} = C/(N + I)_{NOLLUVIA} + 10 \cdot \log(BW_{OC-C}) - 10 \cdot \log \left(BR_C \cdot \left(1 + \frac{OH_C}{100} \right) \right) \quad (4-45)$$

Donde BW_{OC-C} es el ancho de banda ocupado por la portadora, en hercios; BR_C es la tasa de bit de la señal de información, en bits por segundo; y OH_C es el porcentaje de cabeceras e información adicional de la señal digital (*overhead*).

Tras la obtención de $E_b/(N_0 + I_0)_{NOLLUVIA}$, la aplicación compara el resultado obtenido con la E_b/N_0 requerida para el tipo de modulación empleada y el margen adicional de seguridad que se ha especificado para el enlace.

$$\Delta_{E_b/N_0}^{NOLLUVIA} = E_b/(N_0 + I_0)_{NOLLUVIA} - E_b/N_{0REQ} - \Delta_{ADICIONAL} \quad (4-46)$$

El margen se obtiene en decibelios y, si es positivo, se concluye que para el caso sin lluvia y con la configuración dada para todos los parámetros el balance de enlace es positivo y se podrá mantener la comunicación de forma estable. El margen total con el que se cuenta será igual al calculado más el de seguridad.

Por otro lado, se calcula la densidad de flujo punto a punto que llega a la estación receptora en el caso de no haber lluvia, según:

$$SFD_{NOLLUVIA} = PIRE_{SAT}^{PC} - L_{ATM}^{DL} - 10 \cdot \log_{10} \left(4\pi \cdot (Dist_{DL}(m))^2 \right) \quad (4-47)$$

Que viene dada en unidades dBW/m².

Igualmente, se calcula la $C/N_{NOLLUVIA}$ como la suma de las contribuciones de los enlaces ascendente y descendente, sin tener en este caso en cuenta el efecto de las interferencias e intermodulaciones:

$$C/N_{NOLLUVIA}^{NO-INT} = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{10^{C/N_{NOLLUVIA}^{UL}/10}} + \frac{1}{10^{C/N_{NOLLUVIA}^{DL}/10}} \right) \quad (4-48)$$

Y el cálculo de la E_b/N_0^{NO-INT} es similar a como se calculó previamente cuando sí se tuvieron en cuenta las interferencias:

$$E_b/N_0^{NO-INT} = C/N_{NOLLUVIA}^{NO-INT} + 10 \cdot \log(BW_{OC-C}) - 10 \cdot \log \left(BR_C \cdot \left(1 + \frac{OH_C}{100} \right) \right) \quad (4-49)$$

4.5.2 Enlace con lluvia en el Enlace Ascendente

De forma paralela a como se ha calculado el enlace para el enlace sin lluvia, se calcula para el caso de lluvia en el enlace ascendente. De hecho, el programa se apoya en resultados obtenidos previamente para la relación C/N sin lluvia, añadiendo ahora el efecto de atenuación de la lluvia:

$$C/N_{LLUV-UL}^{UL} = C/N_{NOLLUVIA}^{UL} - L_{LLUVIA}^{UL} \quad (4-50)$$

Donde L_{LLUVIA}^{UL} es la atenuación asociada a la lluvia en el enlace ascendente en decibelios.

Por otro lado, se recalcula la relación portadora a ruido para el enlace descendente, puesto que:

$$C/N_{LLUV-UL}^{DL} = PIRE_{PC/LLUV-UL}^{SAT} + G/T_{NOLLUVIA} - L_{FSL}^{DL} - L_{ATM}^{DL} - L_{DESAPUNT}^{DL} + k - 10 \cdot \log(BW_{OC-C}) \quad (4-51)$$

Donde $PIRE_{PC/LLUV-UL}^{SAT}$ es la PIRE dedicada a la portadora de la disponible en el satélite cuando se considera lluvia en el enlace ascendente, $G/T_{NOLLUVIA}$ la figura de mérito de recepción de la estación receptora cuando no hay lluvia en el enlace descendente, L_{FSL}^{DL}

las pérdidas en espacio libre en el camino descendente, L_{ATM}^{DL} las atmosféricas, $L_{DESAPUNT}^{DL}$ las debidas al desapuntamiento, L_{LLUV}^{DL} la atenuación por lluvia en el downlink, $k = -228.6 \text{ dB}/^\circ \text{ K}/\text{Hz}$ la constante de Boltzmann, expresada en dB/K/Hz; y BW_{OC-C} el ancho de banda ocupado por la portadora, en hercios.

De modo similar a como se realizó en el caso sin lluvia, se sumarán todas las contribuciones de señal y de ruido que se han tenido en cuenta en el cálculo del balance de enlace, arrojando la relación $C/(N + I)$ para el caso que nos ocupa:

$$\begin{aligned} (C/(N + I)_{LLUV-UL})^{-1} = & \left((C/IM)_{HPA}^{TX} \right)^{-1} + \left((C/I)_{TOTAL/LLUV-UL}^{UL} \right)^{-1} + \left((C/N)_{LLUV-UL}^{UL} \right)^{-1} + \\ & + \left((C/IM)_{HPA/LLUV-UL}^{SAT} \right)^{-1} + \left((C/I)_{TOTAL/LLUV-UL}^{DL} \right)^{-1} + \left((C/N)_{LLUV-UL}^{DL} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (4-52)$$

La misma relación en decibelios:

$$\frac{C}{N + I_{LLUV-UL}} = -10 \cdot \log \left(\begin{aligned} & \frac{1}{10^{C/IM_{HPA}^{TX}/10}} + \frac{1}{10^{C/I_{TOTAL/LLUV-UL}^{UL}/10}} + \frac{1}{10^{C/N_{LLUV-UL}^{UL}/10}} + \\ & + \frac{1}{10^{C/IM_{HPA/LLUV-UL}^{SAT}/10}} + \frac{1}{10^{C/I_{TOTAL/LLUV-UL}^{DL}/10}} + \frac{1}{10^{C/N_{LLUV-UL}^{DL}/10}} \end{aligned} \right) \quad (4-53)$$

La resolución de la $E_b/(N_0 + I_0)$ total sin lluvia se obtiene de forma inmediata a través de la expresión siguiente:

$$\begin{aligned} E_b/(N_0 + I_0)_{LLUV-UL} = & C/(N + I)_{LLUV-UL} + 10 \cdot \log(BW_{OC-C}) - \\ & 10 \cdot \log \left(BR_C \cdot \left(1 + \frac{OH_C}{100} \right) \right) \end{aligned} \quad (4-54)$$

Donde BW_{OC-C} es el ancho de banda ocupado por la portadora, en hercios; BR_C es la tasa de bit de la señal de información, en bits por segundo; y OH_C es el porcentaje de cabeceras e información adicional de la señal digital (*overhead*).

El valor obtenido para $E_b/(N_0 + I_0)_{LLUV-UL}$, la E_b/N_0 requerida para el tipo de modulación empleada y el margen de seguridad para el que se ha diseñado el enlace marcarán el margen adicional que se obtenga de esta forma:

$$\Delta_{E_b/N_0}^{LLUV-UL} = E_b/(N_0 + I_0)_{LLUV-UL} - E_b/N_{0REQ} - \Delta_{ADICIONAL} \quad (4-55)$$

Las observaciones realizadas en el apartado anterior son aplicables a este y a los siguientes: El margen obtenido, en decibelios, marca si la comunicación es viable en las condiciones solicitadas cuando existe lluvia en el enlace ascendente. En caso de ser positivo, la comunicación es posible y además constante; en caso de no serlo, habría que considerar que se está recurriendo al margen de seguridad, lo que podría propiciar la pérdida de la comunicación en los parámetros de calidad que inicialmente se concretaron para el enlace.

También en el caso de la lluvia en el enlace ascendente se calcula la densidad de flujo punto a punto, que se verá igualmente afectada por la lluvia en el enlace ascendente y que se evalúa de este modo:

$$SFD_{LLUV-UL} = PIRE_{SAT/LLUV-UL}^{PC} - L_{ATM}^{DL} - 10 \cdot \log_{10} \left(4\pi \cdot (Dist_{DL}(m))^2 \right) \quad (4-56)$$

Se mide en dBW/m².

Adicionalmente, se obtiene la relación portadora a ruido sin valorar las aportaciones de interferencias y productos de intermodulación, en un caso más ideal:

$$C/N_{LLUV-UL}^{NO-INT} = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{10^{C/N_{LLUV-UL}^{UL}/10}} + \frac{1}{10^{C/N_{LLUV-UL}^{DL}/10}} \right) \quad (4-57)$$

Y en esta situación, más cercana a la ideal, se obtiene también el valor de la E_b/N_0 para el caso en el que hay lluvia en el *Uplink* y no interferencias o intermodulaciones que dificulten la comunicación:

$$E_b/N_{0LLUV-UL}^{NO-INT} = C/N_{LLUV-UL}^{NO-INT} + 10 \cdot \log(BW_{OC-C}) - 10 \cdot \log \left(BR_C \cdot \left(1 + \frac{OH_C}{100} \right) \right) \quad (4-58)$$

4.5.3 Enlace con lluvia en el Enlace Descendente

En este caso, la lluvia se considerará sólo en el camino de bajada de la señal, el establecido entre el propio satélite y la estación receptora situada en la superficie terrestre.

Todo lo referente al enlace ascendente se ve completamente aislado de este fenómeno, por lo que los pasos para el cálculo de diversos parámetros son exactamente iguales que para el primero de los casos tratados, en el que no se contemplaba la aparición de lluvia en ninguno de los dos enlaces.

De acuerdo a lo expuesto, se puede concluir que:

$$C/N_{LLUV-DL}^{UL} = C/N_{NOLLUVIA}^{UL} \quad (4-59)$$

La relación portadora a ruido para el enlace descendente sí verá modificado su valor por el impacto de la lluvia en el downlink:

$$C/N_{LLUV-DL}^{DL} = PIRE_{PC}^{SAT} + G/T_{LLUV-DL} - L_{FSL}^{DL} - L_{ATM}^{DL} - L_{DESAPUNT}^{DL} - L_{LLUV}^{DL} + k - 10 \cdot \log(BW_{OC-C}) \quad (4-60)$$

Donde $PIRE_{PC}^{SAT}$ es la PIRE dedicada a la portadora de la disponible en el satélite, $G/T_{LLUV-DL}$ la figura de mérito de la estación receptora cuando hay lluvia en el enlace descendente, L_{FSL}^{DL} las pérdidas en espacio libre en el camino descendente, L_{ATM}^{DL} las atmosféricas, $L_{DESAPUNT}^{DL}$ las debidas al desapuntamiento, $k = -228.6 \text{ dB/}^\circ \text{ K/Hz}$ la constante de Boltzmann, expresada en dB/K/Hz; y BW_{OC-C} el ancho de banda ocupado por la portadora, en hercios.

La relación $C/(N+I)$ significa la suma de todas las aportaciones, tanto de señal útil como de ruido o interferencias, y viene dada en unidades naturales por:

$$\begin{aligned} (C/(N+I))_{LLUV-DL}^{-1} &= ((C/IM)_{HPA}^{TX})^{-1} + ((C/I)_{TOTAL/LLUV-DL}^{UL})^{-1} + \\ &((C/N)_{LLUV-DL}^{UL})^{-1} + ((C/IM)_{HPA/LLUV-DL}^{SAT})^{-1} + \\ &((C/I)_{TOTAL/LLUV-DL}^{DL})^{-1} + ((C/N)_{LLUV-DL}^{DL})^{-1} \end{aligned} \quad (4-61)$$

Y en decibelios:

$$\frac{C}{N + I_{LLUV-DL}} = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{10^{C/IM_{HPA}^{TX}/10}} + \frac{1}{10^{C/I_{TOTAL}^{UL}/LLUV-DL/10}} + \frac{1}{10^{C/N_{LLUV-DL}^{UL}/10}} + \frac{1}{10^{C/IM_{HPA}^{SAT}/LLUV-DL/10}} + \frac{1}{10^{C/I_{TOTAL}^{DL}/LLUV-DL/10}} + \frac{1}{10^{C/N_{LLUV-DL}^{DL}/10}} \right) \quad (4-62)$$

El cálculo de la $E_b/(N_0 + I_0)$ con lluvia en el enlace descendente sale de la expresión siguiente:

$$\begin{aligned} E_b/(N_0 + I_0)_{LLUV-DL} &= C/(N + I)_{LLUV-DL} + 10 \cdot \log(BW_{OC-C}) - \\ &10 \cdot \log \left(BR_C \cdot \left(1 + \frac{OH_C}{100} \right) \right) \end{aligned} \quad (4-63)$$

Donde BW_{OC-C} es el ancho de banda ocupado por la portadora, en hercios; BR_C es la tasa de bit de la señal de información, en bits por segundo; y OH_C es el porcentaje de cabeceras e información adicional de la señal digital (*overhead*).

Paralelamente a los apartados previos, se computa el margen respecto a la E_b/N_0 requerida y el margen de seguridad:

$$\Delta_{E_b/N_0}^{LLUV-DL} = E_b/(N_0 + I_0)_{LLUV-DL} - E_b/N_{0\ REQ} - \Delta_{ADICIONAL} \quad (4-64)$$

Las apreciaciones anteriores para márgenes similares son perfectamente aplicables a este caso.

La densidad de flujo punto a punto sufre alguna variación debida a la lluvia en el *downlink*, según la expresión:

$$SFD_{LLUV-DL} = PIRE_{SAT}^{PC} - L_{ATM}^{DL} - L_{LLUV}^{DL} - 10 \cdot \log_{10} \left(4\pi \cdot (Dist_{DL}(m))^2 \right) \quad (4-65)$$

En dBW/m².

El programa también tiene en cuenta el caso ideal en el que no aparecen fuentes de interferencia externas ni no linealidades en los elementos amplificadores de la cadena. Para este caso se calcula la relación señal a ruido:

$$C/N_{LLUV-DL}^{NO-INT} = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{10^{C/N_{LLUV-DL}^{UL}/10}} + \frac{1}{10^{C/N_{LLUV-DL}^{DL}/10}} \right) \quad (4-66)$$

Y de la misma forma la energía de bit frente al ruido:

$$E_b/N_0^{NO-INT}_{LLUV-DL} = C/N_{LLUV-DL}^{NO-INT} + 10 \cdot \log(BW_{OC-C}) - 10 \cdot \log \left(BR_C \cdot \left(1 + \frac{OH_C}{100} \right) \right) \quad (4-67)$$

4.5.4 Enlace con lluvia en los Enlaces Ascendente y Descendente

El último de los casos a considerar es el más negativo de todos, en el que se tienen en cuenta los efectos de la lluvia de forma simultánea en los enlaces ascendente y descendente. Este es un caso extremo y, dado que las localizaciones en las que se encuentran las estaciones transmisora y receptora son independientes, las probabilidades de lluvia en ambos sitios están incorreladas.

En cualquier caso, la aplicación ejecuta todo el proceso de cálculo de balances de enlace para cuando se den estas circunstancias. El desarrollo es gemelo a los anteriores, y una combinación de aquellos en los que se observa la aparición de lluvia en el enlace ascendente y en el descendente.

La obtención de la relación señal a ruido para el enlace ascendente es exactamente igual al caso en el que aparece la lluvia sólo en ese tramo del enlace, es decir:

$$C/N_{LLUV-ULDL}^{UL} = C/N_{LLUV-UL}^{UL} \quad (4-68)$$

En el enlace descendente sí se aprecian los efectos combinados de la lluvia en ambos, así pues:

$$C/N_{LLUV-ULDL}^{DL} = PIRE_{PC/LLUV-UL}^{SAT} + G/T_{LLUV-ULDL} - L_{FSL}^{DL} - L_{ATM}^{DL} - L_{DESAPUNT}^{DL} - L_{LLUV}^{DL} + k - 10 \cdot \log(BW_{OC-C}) \quad (4-69)$$

Donde $PIRE_{PC/LLUV-UL}^{SAT}$ es la PIRE dedicada a la portadora de la disponible en el satélite cuando se considera lluvia en el enlace ascendente, $G/T_{LLUV-ULDL}$ la figura de mérito de recepción de la estación receptora cuando no hay lluvia en los enlaces ascendente y descendente, L_{FSL}^{DL} las pérdidas en espacio libre en el camino descendente, L_{ATM}^{DL} las atmosféricas, $L_{DESAPUNT}^{DL}$ las debidas al desapuntamiento, L_{LLUV}^{DL} la atenuación por lluvia en el *downlink*, $k = -228.6 \text{ dB}/^\circ \text{ K/Hz}$ la constante de Boltzmann, expresada en dB/K/Hz; y BW_{OC-C} el ancho de banda ocupado por la portadora, en hercios.

Las aportaciones totales de señal útil y ruidos e interferencias se calculan de acuerdo a los siguientes términos:

$$\begin{aligned} (C/(N+I)_{LLUV-ULDL})^{-1} &= ((C/IM)_{HPA}^{TX})^{-1} + ((C/I)_{TOTAL/LLUV-ULDL}^{UL})^{-1} + \\ &((C/N)_{LLUV-ULDL}^{UL})^{-1} + ((C/IM)_{HPA/LLUV-ULDL}^{SAT})^{-1} + \\ &((C/I)_{TOTAL/LLUV-ULDL}^{DL})^{-1} + ((C/N)_{LLUV-ULDL}^{DL})^{-1} \end{aligned} \quad (4-70)$$

Que en decibelios se expresa como:

$$\frac{C}{N+I_{LLUV-ULDL}} = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{10^{C/IM_{HPA}^{TX}/10}} + \frac{1}{10^{C/I_{TOTAL/LLUV-ULDL}^{UL}/10}} + \frac{1}{10^{C/N_{LLUV-ULDL}^{UL}/10}} + \frac{1}{10^{C/IM_{HPA/LLUV-ULDL}^{SAT}/10}} + \frac{1}{10^{C/I_{TOTAL/LLUV-ULDL}^{DL}/10}} + \frac{1}{10^{C/N_{LLUV-ULDL}^{DL}/10}} \right) \quad (4-71)$$

El cálculo de la $E_b/(N_0 + I_0)$ con lluvia en los enlaces ascendente y descendente es inmediato a partir del valor anterior:

$$\begin{aligned} E_b/(N_0 + I_0)_{LLUV-ULDL} &= C/(N+I)_{LLUV-ULDL} + 10 \cdot \log(BW_{OC-C}) - \\ &10 \cdot \log \left(BR_C \cdot \left(1 + \frac{OH_C}{100} \right) \right) \end{aligned} \quad (4-72)$$

Donde BW_{OC-C} es el ancho de banda ocupado por la portadora, en hercios; BR_C es la tasa de bit de la señal de información, en bits por segundo; y OH_C es el porcentaje de cabeceras e información adicional de la señal digital (*overhead*).

El margen que queda, examinando la E_b/N_0 requerida y el margen de seguridad:

$$\Delta_{E_b/N_0}^{LLUV-ULDL} = E_b/(N_0 + I_0)_{LLUV-ULDL} - E_b/N_{0REQ} - \Delta_{ADICIONAL} \quad (4-73)$$

Si el margen es positivo, la comunicación será estable y garantizada en los parámetros de calidad de diseño del enlace. Si no lo es, se descontará del margen adicional de seguridad, pudiendo llegarse a la imposibilidad de establecimiento del enlace en las condiciones deseadas.

También se calcula la densidad de flujo de señal recibida en la localización de la antena receptora:

$$SFD_{LLUV-ULDL} = PIRE_{SAT/LLUV-UL}^{PC} - L_{ATM}^{DL} - L_{LLUV}^{DL} - 10 \cdot \log_{10} \left(4\pi \cdot (Dist_{DL}(m))^2 \right) \quad (4-74)$$

En dBW/m².

En el caso ideal en el que se obvian las contribuciones al ruido de las interferencias externas y las no linealidades de los dispositivos amplificadores también se recalcula la relación señal a ruido:

$$C/N_{LLUV-ULDL}^{NO-INT} = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{10^{C/N_{LLUV-ULDL}^{UL}/10}} + \frac{1}{10^{C/N_{LLUV-ULDL}^{DL}/10}} \right) \quad (4-75)$$

Y la energía de bit frente a ruido:

$$E_b/N_0_{LLUV-ULDL}^{NO-INT} = C/N_{LLUV-ULDL}^{NO-INT} + 10 \cdot \log(BW_{OC-C}) - 10 \cdot \log \left(BR_C \cdot \left(1 + \frac{OH_C}{100} \right) \right) \quad (4-76)$$