

Software Educativo para el Análisis y Diseño de Enlaces de Telecomunicación por Satélite

Everardo Inzunza González, Pablo A. Rousseau Figueroa, David. A. Hernández Robles
 Facultad de Ingeniería Ensenada, Universidad Autónoma de Baja California
 Ensenada, Baja California, CP 22860, México

RESUMEN

En este trabajo, se presenta el desarrollo de un software educativo para analizar y diseñar enlaces de telecomunicación por satélite, este programa está desarrollado con LabVIEW™ y considera aspectos como son: ubicación de las estaciones terrenas transmisora, receptora y satélite, tasa de lluvia de las regiones terrestres, potencia de transmisión, tipo de modulación, tasa de transmisión de bits, ancho de banda, pérdidas atmosféricas, por borde, parámetros de las antenas, otras pérdidas misceláneas, etc. En la sección del satélite se consideran la frecuencia del enlace ascendente y descendente, su potencia isotrópica radiada efectiva (PIRE), figura de mérito. En base a las características del enlace mencionadas anteriormente, el software puede calcular la relación portadora a ruido del enlace de subida, bajada y total, distancias de las estaciones terrenas al satélite, relación de densidad de bit a ruido, probabilidad de error, etc. El programa le indica al diseñador del enlace si es factible de implementarse de acuerdo a las características dadas, en base a la probabilidad de error calculada. En caso de que no se cumpla con el requisitos mínimo de probabilidad de error, el usuario deberá cambiar algunas variables del enlace hasta que cumpla con los criterios de diseño establecidos.

Palabras claves: Satélite, PIRE, Figura de mérito, Atenuación, Probabilidad de error.

1 INTRODUCCIÓN

Los satélites artificiales surgieron de la necesidad de establecer enlaces confiables de comunicación internacional de amplia cobertura, especialmente entre continentes, tanto como para la comunicación telefónica, telegráfica, televisión y de datos [9].

El físico y escritor de ciencia ficción Arthur C. Clarke [1] propuso la idea de aplicar el concepto de órbita geoestacionaria para ubicar en ella satélites artificiales para comunicación de cobertura global. La aplicación de esta idea permitió el desarrollo de los sistemas de satélites comerciales que han tenido gran utilización a nivel mundial.

Los satélites de comunicación pueden recibir y enviar desde el espacio ondas de radio en cualquier dirección que se tenga previsto en su diseño. Por medio de los sistemas de satélites se pueden establecer servicios públicos completos hasta el usuario final, como es el caso de televisión directa al hogar, servicios públicos apoyados parcialmente en redes terrestres de otros servicios como son redes privadas de voz y datos, etc. La figura (1) muestra el diagrama a bloques de un sistema de telecomunicación por satélite punto a punto. Este trabajo se basa en este tipo de configuración de enlace.

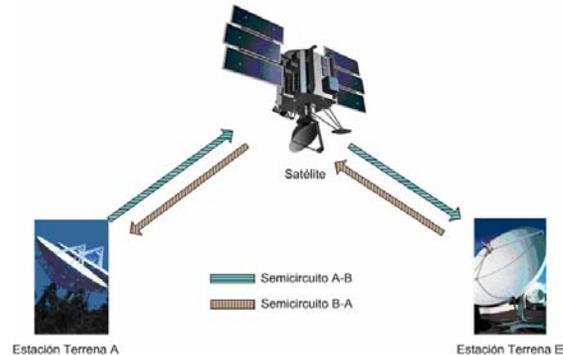


Figura 1) Diagrama a bloques de conectividad punto a punto [9].

2 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL ENLACE

Distancia de la estación terrena al satélite [16]

$$r = \sqrt{R_0^2 + 2R_e(R_0 + R_e)(1 - \cos(\ell)\cos(L))} \quad [\text{Km}] \quad (1)$$

Donde, R_0 es la altura del satélite, R_e es el radio de la tierra y L es la diferencia entre las longitudes de la estación terrena y el satélite.

Ángulos de apuntamiento al satélite

Ángulo de elevación: Es el ángulo formado entre la dirección de viaje de una onda electromagnética irradiada desde una antena de estación terrestre que apunta directamente hacia un satélite [11]. Se puede calcular mediante la ecuación (2).

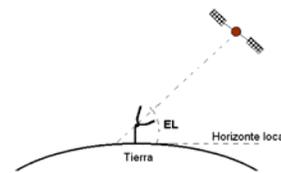


Figura 2) Ángulo de elevación

$$E_L = \tan^{-1} \left[\frac{6.61075 - \cos \gamma}{\sin \gamma} \right] - \gamma \quad (2)$$

El coeficiente γ se puede calcular con la ecuación (3)

$$\gamma = \cos^{-1} [\cos L_e \cdot \cos |\ell_s - \ell_e|] \quad (3)$$

Donde L_e es la Latitud de la estación terrena, ℓ_s es Longitud del satélite y ℓ_e es la Longitud de la estación terrena, E_L es el ángulo de elevación [°].

Ángulo de azimut: Es el ángulo de apuntamiento horizontal de una antena, normalmente se mide con respecto al polo norte [11]. Se puede calcular con las ecuaciones (4a), (4b), (4c) y (4d).

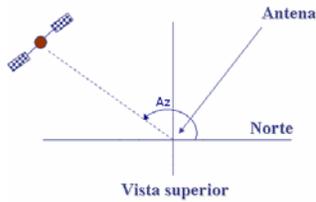


Figura 3) Ángulo de azimut

$A_z = 180^\circ + \varphi$; Cuando el satélite se encuentra al Suroeste de la estación terrena. (4a)

$A_z = 180^\circ - \varphi$; Cuando el satélite se encuentra al Sureste de la estación terrena. (4b)

$A_z = \varphi$; Cuando el satélite se encuentra al Noreste de la estación terrena. (4c)

$A_z = 360^\circ - \varphi$; Cuando el satélite se encuentra al Noroeste de la estación terrena. (4d)

Donde φ es una constante y se calcula con la ecuación (5).

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{\tan(|\ell_s - \ell_e|)}{\sin(L_e)} \right] \quad (5)$$

Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE)

El PIRE se utiliza para expresar la potencia transmitida de una estación terrena o satélite [13]. El PIRE es simplemente la potencia generada por un amplificador de alta potencia considerando la ganancia de la antena y tomando en cuenta las pérdidas en la línea de transmisión que conecta la salida del amplificador de alta potencia con la antena de la estación terrena o satélite [13]. El PIRE se puede calcular con la ecuación (6).

$$PIRE = P_t G_t \quad [Watts] \quad (6)$$

Donde, P_t es la potencia de transmisión [Watts], G_t es la ganancia de la antena transmisora [adimensional], PIRE es la potencia isotrópica radiada efectiva [Watts].

Pérdidas por propagación en el espacio libre [13]

Son las pérdidas incurridas por una onda electromagnética al propagarse en línea recta por el vacío, sin energías de absorción y reflexión debidas a objetos cercanos [11]. Estas pérdidas dependen de la frecuencia y se incrementan directamente con la distancia, se calcula con la ecuación (7).

$$L_p = \left(\frac{4\pi D}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi f D}{c} \right)^2 \quad (7)$$

Donde D es la distancia de la estación terrena al satélite [m], f es la frecuencia [Hz], c es la velocidad de la luz en el vacío [3×10^8 m/S], L_p son las pérdidas por propagación en el espacio libre [adimensional].

Ganancia de la antena parabólica [11]

Estas antenas presentan una ganancia aparente porque concentran la potencia irradiada en un haz angosto [11].



Figura 4) Reflector parabólico [11].

La ganancia de estas antenas se calcula con la ecuación (8).

$$G = \eta \left(\frac{\pi D_{ant}}{\lambda} \right)^2 \quad (8)$$

Donde η es la eficiencia de la antena, D_{ant} es el diámetro de la antena [m] y λ es la longitud de onda de la portadora de microondas [m], G es la ganancia de la antena (adimensional).

Potencia de ruido del receptor [5]

El nivel de este ruido depende directamente de la temperatura del receptor y el ancho de banda de ruido, se calcula utilizando la ecuación (9).

$$N = KTB \quad (9)$$

Donde K es la constante de Boltzman, T es la temperatura ambiente del receptor [°K], B es el ancho de banda de ruido [Hz], N es la potencia de ruido del receptor [Watts].

Relación de portadora a ruido [11]

Es la relación de la potencia de la portadora de banda ancha (incluyendo sus bandas laterales asociadas) sobre la potencia de ruido de banda ancha del receptor [11].

$$\frac{C}{N} = \frac{P_{Rx}}{T_{SYS}} = \frac{\lambda^2 G_t G_r P_t}{(4\pi R)^2 K T_{SYS} B} \quad (10)$$

donde G_t es la ganancia de la antena transmisora, G_r es la ganancia de la antena receptora, P_t es la potencia de transmisión, R es la distancia de la estación terrena al satélite, T_{SYS} es la temperatura del receptor, P_{RX} es la potencia de la señal de RF a la entrada del receptor, C/N es la relación de portadora a ruido.

Cálculo de $\frac{C}{N}$ del enlace ascendente [13]

$$\left(\frac{C}{N} \right)_{asc dB} = PIRE_{E.T.} [dBW] + \frac{G}{T} \left[\frac{dB}{\circ K} \right]_{satélite} - 10 \log(K \cdot B_{N(Hz)}) - L_{p_{asc}} - L_{a_{asc}} - L_{R_{asc}} - BO_{asc} - \text{pérd. por borde}_{asc} - \text{pérd. misceláneas} \quad (11)$$

Donde $\frac{G}{T}$ es la figura de mérito del satélite, L_p son las

pérdidas en la trayectoria de espacio libre, L_a son las pérdidas atmosféricas, L_R son las pérdidas por lluvia, BO es el Back-off del transmisor, B_N es el ancho de banda de ruido, C/N es la relación de portadora a ruido del enlace ascendente [dB]. Las pérdidas atmosféricas y por vapor de agua se pueden obtener de [4] o a partir de la gráfica de [11].

Cálculo de $\frac{C}{N}$ del enlace descendente [13]

$$\left(\frac{C}{N} \right)_{desc dB} = PIRE_{sat} [dBW] - BO_{sat} - 10 \log(K \cdot B_{N(Hz)}) + G_r - 10 \log(T_{sys}) - L_{p_{desc}} - L_{a_{desc}} - L_{R_{desc}} - \text{pérd. por borde}_{desc} - \text{pérd. miscelánea} s \quad (12)$$

Donde BO_{sat} es el back off del satélite, C/N es la relación de portadora a ruido del enlace descendente [dB].

Cálculo de $\frac{C}{N}$ del enlace total [13]

$$\left(\frac{C}{N} \right)_{Total} = \frac{1}{\left(\frac{C}{N} \right)_{asc} + \left(\frac{C}{N} \right)_{desc}} \quad (13)$$

La ecuación (13) nos indica el desempeño del enlace total, normalmente se requiere que sea mayor a 10 dB. Las relaciones C/N deben estar en escala adimensional (no dB's) para que la ecuación sea válida. Posteriormente se convierte a dB's.

Cálculo de la relación de energía de bit a densidad de ruido [11]

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C/f_b}{N/B_N} = \frac{C}{N} \cdot \frac{B_N}{f_b} \quad (14)$$

Donde $\frac{C}{N}$ es la relación de portadora a ruido del enlace total (ascendente y descendente), B_N es el ancho de banda de ruido, f_b es la tasa de bits por segundo, $\frac{E_b}{N_0}$ es la relación de energía de bit a densidad de ruido.

Pérdidas por lluvia [12]

Estas pérdidas se presentan al viajar una onda electromagnética a través de una trayectoria afectada por lluvia [4]. Se pueden calcular utilizando la ecuación (15).

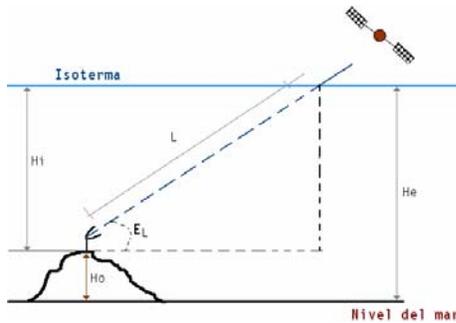


Figura 5) Vista lateral de la trayectoria de propagación de una portadora a través de una región con lluvia.

$$A_{LL} = aR^b L \quad [dB] \quad (15)$$

$$a = \begin{cases} 4.21X10^{-5} f^{2.42} & 2.9 \leq f \leq 54 \text{ GHz} \\ 4.09X10^{-2} f^{0.699} & 54 \leq f \leq 180 \text{ GHz} \end{cases} \quad (16)$$

$$b = \begin{cases} 1.41 f^{-0.0779} & 8.5 \leq f \leq 25 \text{ GHz} \\ 2.63 f^{-0.272} & 25 \leq f \leq 164 \text{ GHz} \end{cases} \quad (17)$$

$$L = \frac{H_e - H_0}{\text{Sen}(E_L)} \quad (18)$$

Donde a y b son coeficientes dependientes de la frecuencia, L es la longitud de la trayectoria de la señal de RF en la lluvia [Km], H_e es la altura de la atmósfera [Km], H_0 elevación de la antena sobre el nivel del mar [Km], H_i es la altura de la isoterma, A_{LL} es la atenuación por lluvia.

$$H_e = \begin{cases} H_i & R \leq 10 \frac{mm}{hr} \\ H_i + \text{Log}_{10} \left(\frac{R}{10} \right) & R > 10 \frac{mm}{hr} \end{cases} \quad (19)$$

$$H_i = \begin{cases} 4.8 \text{ Km} & \text{Latitud} \leq 30^\circ \\ 7.8 - 0.1 \cdot (\text{Latitud}) & \text{Latitud} > 30^\circ \end{cases} \quad (20)$$

Probabilidad de error en el enlace [14, 15 y 16]

$$P_e = Q \left(\sqrt{2 \frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (21)$$

$$Q(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt \quad (22)$$

$$X = \frac{E_b}{N_0} \quad (23)$$

Donde P_e es la probabilidad de error del enlace, $Q(X)$ es la función de error complementario, X es el nivel de bit a ruido (adimensional).

3 DESARROLLO DEL SOFTWARE

Se desarrolló el software de tal manera que se relacione con el diagrama a bloque mostrado en la figura (1), es decir, para la introducción de los datos se divide en tres secciones: Estación terrena transmisora, Satélite y estación terrena receptora. Además se tienen dos secciones de resultados, en la primera sección se muestran resultados del enlace ascendente y descendente, en la segunda sección se muestran resultados generales o totales del enlace de telecomunicación por satélite. La figura (6) muestra los detalles de los datos a introducir para la sección de la estación terrena transmisora, en esta figura se observa que se introduce el nombre de la ciudad, su localización (latitud y longitud), potencia de transmisión, tipo de modulación, banda de guarda, rizado del filtro, back-off del transmisor, tasa de bits por segundo. Además los parámetros de la antena, tales como: Diámetro, eficiencia y su elevación sobre el nivel del mar. También se consideran las pérdidas atmosféricas del enlace ascendente, pérdidas por borde, pérdidas en la línea de transmisión y otras pérdidas misceláneas (pérdidas por: gases, vapor de agua, etc.).

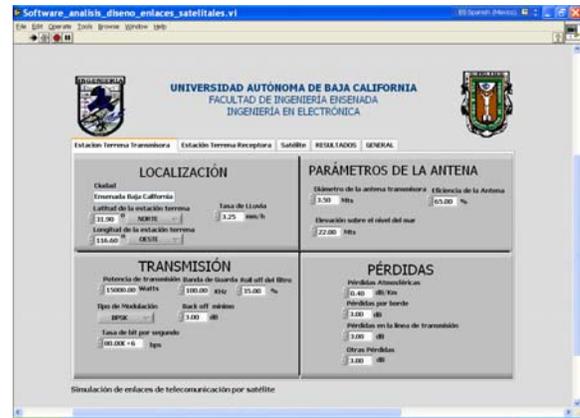


Figura 6) Interfaz de usuario para la sección del Transmisor.

La figura (7) muestra los detalles para introducir los datos de la estación terrena receptora, en esta interfaz se puede observar que se puede proporcionar como datos de entrada el nombre de la ciudad, su localización (latitud y longitud), tasa de lluvia de la región. Los parámetros de la antena, tales como: Diámetro, eficiencia y su elevación sobre el nivel del mar. Además se debe considerar las pérdidas atmosféricas, temperatura del sistema, pérdidas por borde, además otras pérdidas misceláneas (pérdidas por: gases, vapor de agua, etc.).



Figura 7) Interfaz de usuario para la sección del Receptor.

La figura (8) muestra la sección de datos de entrada del satélite, en ella se debe introducir: ubicación del satélite en la órbita geostacionaria (longitud), frecuencias de portadora de enlace ascendente y descendente, su Potencia isotrópica radiada efectiva (PIRE), ancho de banda del transpondedor y el back-off del satélite.



Figura 8) Interfaz de usuario para la sección del Satélite.

La figura (9) presenta la interfaz gráfica para la presentación de los resultados del enlace ascendente y descendente, en esta sección podemos observar los datos que son calculados por el software, tales como: las ganancias de las antenas transmisora y receptora, distancias de las estaciones terrenas al satélite, ángulos de elevación y azimut, relación portadora a ruido.



Figura 9) Interfaz gráfica para la sección de resultados (enlace ascendente y descendente).

En la figura (10) el software nos proporciona los principales datos que nos determinan el desempeño total del enlace de telecomunicación, estos datos son: Relación portadora a ruido total, relación de energía de bit a densidad de ruido y probabilidad de error. Este último parámetro, es de los más importante, debido a que si es menor a 1×10^{-6} significa que el enlace es confiable de implementarse con las características proporcionadas en los datos de entrada. Además se recomienda que la relación portadora a ruido (del enlace ascendente, descendente y total) sean mayor a 10 dB para garantizar la confiabilidad y disponibilidad del enlace para cuando se presenten variaciones climatológicas inesperadas, lo cual provocarán un desvanecimiento en la señal portadora de microondas.



Figura 10) Interfaz gráfica para la sección de resultados generales del enlace.

4 CONCLUSIONES Y RESULTADOS

Se desarrolló un software educativo que nos permite analizar y diseñar enlaces de telecomunicación por satélite. El programa considera aspectos de la trayectoria como son pérdidas en: la trayectoria de espacio libre, por lluvia, atmosféricas y otras pérdidas misceláneas (vapor de agua y gases), ganancia de las antenas. Además considera la potencia de transmisión, ruido en el equipo receptor, ubicación de las estaciones y satélite, PIRE del satélite, ancho de banda del transpondedor, figura de mérito, etc. El software puede ser utilizado en universidades, centros de investigación donde se impartan cursos sobre sistemas satelitales, debido a que resulta bastante didáctico debido a la interfaz gráfica que presenta a los usuarios, se puede interactuar con el programa para cambiar ciertos parámetros del enlace y analizar las diferentes atenuaciones, ganancia de antenas, energía de bit sobre densidad espectral de potencia de ruido, relación portadora a ruido del enlace ascendente, descendente y total. Finalmente si la probabilidad de error del enlace total es menor a 1×10^{-6} se enciende un indicador verde lo cual muestra que el enlace es adecuado para su implementación, en caso contrario el enlace no será óptimo encendiendo un indicador rojo indicando al diseñador que deberá modificar previo análisis algunos parámetros del enlace satelital para que pueda ser confiable de implementarse.

El software demostró ser fácil de utilizar y amigable para los estudiantes y profesores que lo han utilizado para el análisis y diseño de enlaces satelitales en la Universidad.

5 AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Roberto Conte Galván y al M.C. Benjamín Hilarión Ramírez Durán por sus sabios conocimientos impartidos durante el curso de maestría Sistemas de Satélites I y por sus valiosos consejos transmitidos durante este curso, gracias estimados profesores.

6 REFERENCIAS

- [1] Clark, A.C. 1945. "Extra-Terrestrial Relays". Wireless World. 51, 10pp 305-308.
- [2] Freeman, R.L., 1987. "Radio System Design for Telecommunications (1 – 100 GHz)". John Wiley & Sons, Inc. Primera edición. New York. 560 pp.
- [3] Freeman, R.L. 1994. "Reference Manual for Telecommunications Engineering". John Wiley & Sons, Inc. Segunda edición. New York. 811-1041 p.
- [4] Frey, T.L. 1999. "The Effects of the Atmosphere and Weather on the Performance of a mm-Wave Communication Link". Applied Microwave & Wireless. 11 (2): 76 – 80 p.
- [5] Friis, H. T., 1944. "Noise Figure of Radio Receivers", Proc. IRE, July 1944, 419-422 pp.
- [6] Nakashima V., Yuki. 2002. "Optimización De La Capacidad De Tráfico Y Asignación De Recursos En Sistemas Inalámbricos LMDS De Banda Ancha". CICESE, Div. de Física Aplicada, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Tesis de Maestría. Septiembre 2002.
- [7] Pratt, T. y C.W. Bostian. 1986. "Satellite Communications". John Wiley & Sons, Inc. Primera edición. New York. 472 pp.

- [8] Rappaport, T.S. 1996. "Wireless Communications Principles and Practice". Prentice Hall, Inc. Primera edición. New Jersey. 641 pp.
- [9] Rosado, C. 2001. "Comunicación por Satélite". Limusa, S.A. de C.V, México. 13, 53, 57, 93-134 pp.
- [10] Sklar, B. 1988. "Digital Communications Fundamentals and Applications". Prentice Hall, Inc. New Jersey. 188-231 p.
- [11] Tomasi, W. 2003. "Sistemas de comunicaciones electrónicas". Prentice Hall, Inc. 4^a edición. México. 352, 793-831 p.
- [12] R. L. Olsen et. al. "The aR^b Relation in the Calculation of Rain Attenuation", IEEE Trans. Antennas Propagation. Vol. AP-26, Mar. 1978, pp. 318-329.
- [13] Tri T. Ha, MacMillan 1986. "Digital Satellite Communications". McGraw-Hill. pp. 81 y 129-186
- [14] V. K. Prabhu. "Error Rate Considerations for Coherent Phase-Shift-Keyed Systems with Co-channel Interference". Bell Syst. Tech J., Vol. 48, Mar. 1969, pp. 743-767.
- [15] A. S. Rosenbaum. "PSK Error Performance with Gaussian Noise and Interference. Bell Syst. Tech. J., Vol. 47, Feb. 1969, pp. 413-442.
- [16] R. Conte. "Notas del curso de maestría Sistemas de Satélites I". Trimestre 2002-1, CICESE 2002.