

Modelamiento y simulación de las etapas de modulación digital y acceso al medio para un satélite de órbita baja

Elvis Eduardo Gaona García¹

Juanita Rodríguez Garay²

Camilo Humberto Florez Contreras³

Resumen

Este artículo describe los esquemas de modulación y acceso al medio para un sistema satelital de órbita baja basados en GFSK y FHSS/TDMA. A través de simulaciones son comparados estos esquemas con sistemas utilizados convencionalmente en el manejo de satélites LEO. Esto como resultado del proyecto de grado desarrollado en el Grupo de Investigación GITUD.

Palabras clave: FHSS, Filtros Gaussianos, GFSK, modulación digital, Satélites de órbita baja.

Modeling and Simulation of digital modulation stages and channel access for a low orbit satellite

Abstract

This paper describes the modulation scheme and channel access for a satellital system of low orbit based on GFSK and FHSS/TDMA. Through simulations these scheme are compared with systems used conventionally in the working of satellites LEO. This as a result of the grade project developed in the Group of Investigation GITUD.

Key words: FHSS, Gaussian Filters, GFSK, Digital modulation, Low orbit satellites.

1. Introducción

El uso de satélites de órbita baja dentro de los sistemas de comunicación ha tomado una gran relevancia gracias a la implementación en ámbitos en los que se requiere un enlace económico y directivo para señales transmisoras de baja potencia.

Un ejemplo claro del auge de los satélites LEO se visualiza en la expansión de las comu-

nicaciones móviles en las cuales dada la proximidad de la órbita es posible conseguir haces de transmisión mucho mas focalizados y por ende una comunicación mas clara y fuerte [1].

Sin embargo dadas las condiciones del medio de transmisión, la cercanía de la órbita a la interferencia terrestre y la dependencia de la frecuencia de recepción frente a la velocidad del satélite, hacen que en la actualidad los enlaces sean ineficientes ya que presentan un alto BER requiriendo retransmisiones y retardos en las señales [1]. Además, la no-linealidad del canal y los errores de ecualización son factores que afectan la confiabilidad del enlace llegando en ocasiones a impedir los procesos de transmisión y recepción de la información. Un modelamiento detallado del canal al que se enfrentará el enlace se puede observar en [9].

Con la necesidad de asegurar la robustez de los sistemas de comunicaciones de satélites de órbita baja (LEO), se plantea modelar un esquema de modulación y acceso al medio capaz de optimizar las pérdidas ocasionadas por el espacio libre y la órbita satelital enmarcando para ello el trabajo en GFSK y FHSS.

2. Modelamiento del enlace

El esquema de modulación basado en filtros gaussianos, GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying), es un sistema FM de banda angosta que permite el manejo de transmisores y amplificadores de salida en zona de saturación, característica esencial en el manejo de comunicaciones satelitales en las cuales se requiere optimizar la franja de trabajo del transpondedor. Aunque GFSK no se constituye en una innovación dentro de la modulación digital, sus potencialidades no han sido exploradas dentro de la comunicación satelital. Adicional a esto, se plantea un esquema de acceso al medio basado en FHSS puesto que

¹ Docente Asistente, miembro del Grupo de Investigación GITUD, y GITEM.

² Ingeniera Electrónica, Estudiante de la Especialización en Gestión de Proyectos de Ingeniería de la Universidad Distrital.

³ Ingeniero Electrónico, Estudiante de la Especialización en Gestión de Proyectos de Ingeniería de la Universidad Distrital.

la tecnología de Espectro Ensanchado (SS) es una técnica que maximiza el uso del ancho de banda del canal, permite a múltiples señales utilizar el mismo canal sin colisiones y es altamente resistente a la interferencia, permitiendo dar soluciones inalámbricas punto-multipunto [2].

En el esquema general propuesto, se introduce a un modulador 8-GFSK una entrada de datos binaria que simula en este caso la trama organizada a partir de los distintos usuarios de TDMA, La señal resultante es multiplicada por un sintetizador de frecuencia concebido a partir de un generador de códigos aleatorios, encargado de discriminar las frecuencias a las cuales “saltará” la señal. El esquema del transmisor simplificado es mostrado en la figura 1. En la figura 2, se muestra el esquema del receptor simplificado. En este, el generador de códigos aleatorios debe seguir la misma secuencia establecida en el transmisor con el fin de sincronizar la detección de las señales recibidas. Esta característica da robustez al sistema puesto que sólo aquellos receptores que conocen la secuencia pueden demodular la información. Además, ya que existen rangos de frecuencia en los cuales se presenta mayor interferencia, el diseñador puede ajustar el sintetizador con el fin de realizar saltos fuera de estos rangos.

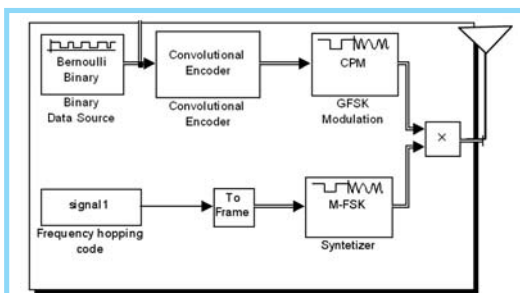


Figura 1. Transmisor de GFSK y FHSS simplificado

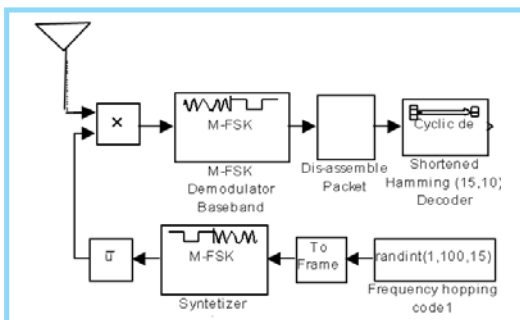


Figura 2. Receptor de GFSK y FHSS simplificado

En la figura 3 se presenta el modelo del canal de comunicaciones. En este se aprecian tres

elementos fundamentales, como es la Distribución tipo Rician con coeficiente de densidad $K=20$ y cuyo esquema lleva implícito el corrimiento Doppler establecido en 20KHz; el bloque de Ruido Blanco Gaussiano, que maneja el parámetro E_b/N_0 ; y las pérdidas por espacio libre, contempladas en 151dB [9].

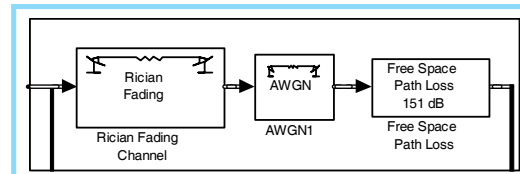


Figura 3. Canal de comunicaciones

3. Modelamiento del esquema de modulación GFSK

La modulación GFSK combina las potencialidades de la modulación FSK con el filtrado mediante técnicas gaussianas.

Puesto que uno de los recursos mas preciados de las comunicaciones satelitales hacen referencia al ancho de banda, se requiere disminuir el espectro de las señales moduladas. Uno de los métodos mas eficaces es la incorporación de filtros gaussianos que por medio del análisis de la covarianza de las señales enviadas por la estación terrena, logra concentrar en el menor espectro la mayor cantidad de energía de la señal. Además, estos filtros encapsulan la información, protegiéndola del ruido y la interferencia del canal.

Para los filtros gaussianos requeridos, una respuesta óptima es aquella en la cual la respuesta transitoria decae rápida y monotónicamente, mientras el ancho de banda del ruido es mínimo para el ancho del pulso dado [2].

La respuesta a la técnica gaussiana está dada por [3], [4]:

$$T(f) = Ae^{-\left(\frac{f}{t_0}\right)^2} \quad (1)$$

donde, A: es la amplitud, f: frecuencia, y t_0 : el tiempo inicial

El ancho de banda del filtro gaussiano es un parámetro crítico, si se reduce sustancialmente, se reduce el ancho de banda ocupado por el sistema pero se aumenta la interferencia intersímbolo. Bajo esta consideración se ha fijado el producto BT (Ancho de banda por período de cada símbolo), en 0.35. Cabe anotar

que este parámetro puede variarse como parte del proceso de optimización del sistema.

Con el fin de garantizar la eficiencia del esquema, se toma un índice de modulación igual a 1, el cual nos lleva a determinar un ancho de banda aproximado de $2f_m$, donde f_m es la máxima componente frecuencial de la señal de modulación y es fijada por el ancho de banda del filtro seleccionado.

Bajo estos parámetros, el ancho de banda total ocupado por el sistema puede ser escrito como:

$$BW = \text{tasa de símbolos} * 2BT \quad (2)$$

En la figura 4, se presenta la simulación correspondiente a la modulación FSK. En ella es posible considerar el espectro de una señal ya modulada así como su ocupación en ancho de banda.

Con el fin de evidenciar el efecto del filtro gaussiano, en la figura 5, se presenta la simulación del espectro de la señal modulada en GFSK, mostrando claramente los bajos requerimientos de ancho de banda del sistema así como la concentración de energía en la frecuencia requerida.

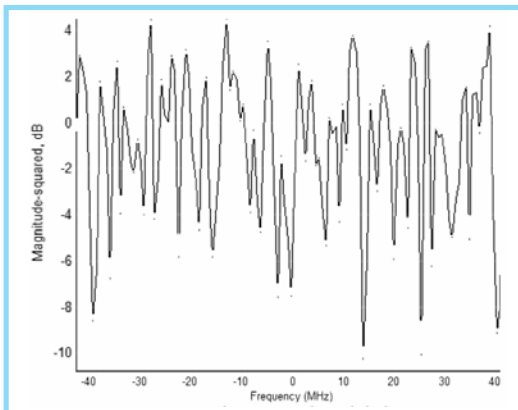


Figura 4. Espectro de una señal modulada en FSK

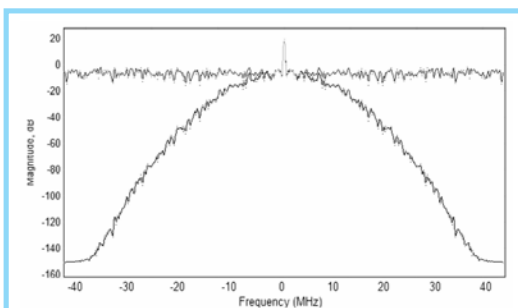


Figura 5. Espectro de una señal modulada en GFSK

4. Comparación de los esquemas de modulación

La mejor forma para llevar a cabo una comparación entre los esquemas convencionales en satélites de órbita baja de modulación digital, es determinar la energía por bit a densidad de ruido necesaria para lograr una Tasa de Error de Bit (BER) tal que se pueda considerar una calidad mínima de enlace, para este caso 1×10^{-6} .

En un primer momento se consideran los esquemas basados en amplitud. En la figura 6 se muestra la relación de BER vs. E_b/N_0 para una modulación 16-QAM para tres situaciones dadas. El esquema a nivel teórico, donde solo se contempla la presencia de Ruido Blanco Gaussiano; el análisis semi-analítico, empleando la técnica Monte Carlo, que ayuda a minimizar los tiempos de computación del modelo; y la simulación bajo las condiciones planteadas en la segunda sección. Cabe anotar que estas situaciones se consideran para cada uno de los esquemas de modulación trabajados.

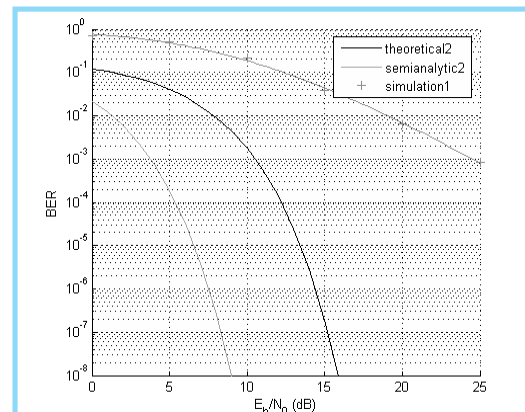


Figura 6. Análisis del BER para un esquema 16-QAM

A partir de esta figura se aprecia que se requiere una relación E_b/N_0 superior a 25dB para lograr la calidad mínima del enlace. Con el fin de mejorar tal situación, se prefiere sacrificar la reducción de ancho de banda que ofrece un esquema de 4 niveles y emplear un valor M-ario menor. Dada esta consideración se realiza la simulación de 8-QAM, agregando además un módulo de corrección de error hacia delante FEC con codificación convolucional tipo Trellis, cuyo resultado se aprecia en la figura 7.

Aunque se observa una mejora significativa en cuanto a los requerimientos del enlace, aun se necesita una E_b/N_0 superior a 25 dB para

un BER de 1×10^{-6} . Adicional a esto, se debe tener en cuenta que se requiere una serie de bloques adicionales con el fin de llevar a cabo un enlace exitoso [9], por lo tanto se plantea el análisis de esquemas basados en fase y frecuencia. En la figura 8, se observa los resultados obtenidos para 8-PSK.

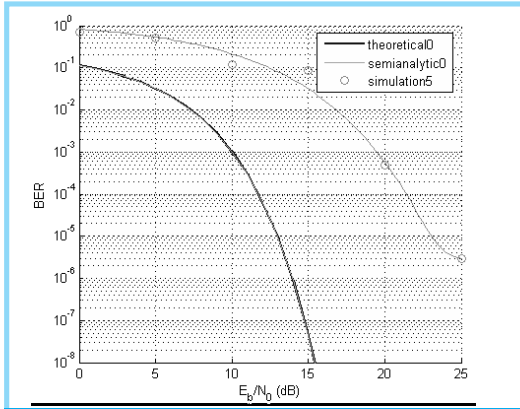


Figura 7. Análisis del BER para un esquema 8-QAM

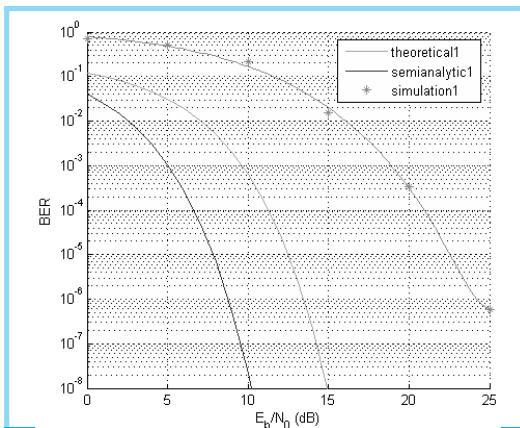


Figura 8. Análisis del BER para un esquema 8-PSK.

El esquema resulta más robusto frente a 16-QAM y 8-QAM, ya que para este caso se requiere una relación de energía de bit a densidad de ruido de 24 dB para lograr un BER de 1×10^{-6} . Sin embargo con el fin de continuar la exploración por diversos esquemas de modulación se plantea los resultados obtenidos de la simulación de $\delta/4$ -DQPSK en la figura 9.

A partir de los resultados arrojados, es posible entender el auge que ha tenido este esquema en los últimos tiempos, pues con una E_b/N_0 de tan solo 20.5 dB es posible tener un enlace con la calidad requerida. Sin embargo, estos dos últimos esquemas presentados basados en fase aun requieren módulos adicionales para la óptima recepción de la información, por lo que se estudia a continuación 8-FSK

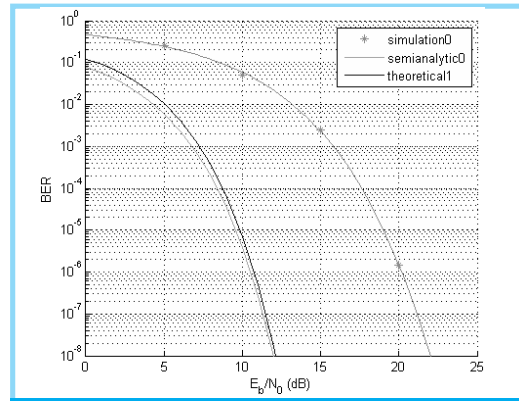


Figura 9. Análisis del BER para un esquema $\delta/4$ -DQPSK.

Aunque es notable la mejora de este esquema frente a QAM (Figura 10), 8-FSK no supera los resultados obtenidos con $\delta/4$ -DQPSK, y llega a ser comparable con los requisitos de E_b/N_0 de 8-PSK, ya que se requiere alrededor de 23.5dB para lograr la calidad mínima del enlace.

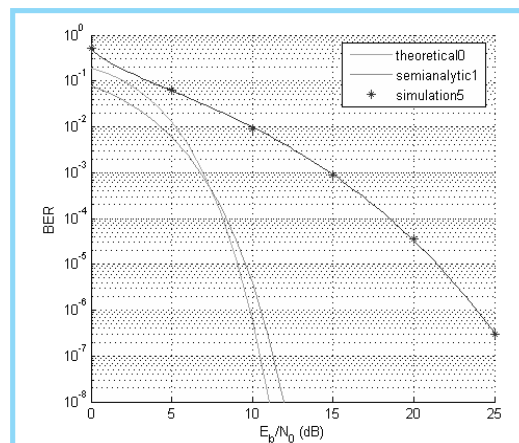


Figura 10. Análisis del BER para un esquema 8-FSK.

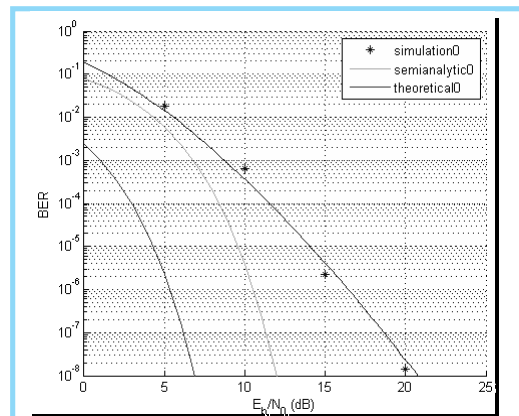


Figura 11. Análisis del BER para un esquema 8-GFSK.

Al introducir un filtro gaussiano a un esquema FSK se obtiene mejoras sustanciales, no solo por la disminución de potencia de transmisión necesaria ya que se requiere 17dB

de Eb/No para un BER de 1×10^{-6} tal y como se aprecia en la figura 11, sino porque a nivel de modelamiento ya no se requieren módulos adicionales que impidan la saturación en la etapa de recepción [9].

5. Modelamiento del esquema de acceso al medio FHSS/TDMA

Con el fin de garantizar un enlace satelital en el cual los rangos de frecuencia más vulnerables a la interferencia sean obviados, se plantea un modelo de espectro ensanchado FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), considerando, como ya se mencionó anteriormente una trama de entrada compuesta por múltiples usuario (TDMA).

En estos sistemas, un código pseudo-aleatorio, denominado secuencia de pseudo-ruido (PN), es generado independientemente de la señal y se emplea para modular los datos. En el receptor se demodula la señal empleando la secuencia PN generada en el emisor, pero debidamente sincronizada. [5], [6], [7]

En los sistemas FHSS la fase de expansión requiere de una señal modulada. El bloque de expansión multiplica la señal modulada y la salida de un sintetizador de frecuencia, alimentado por la secuencia pseudo-aleatoria, de tal forma que la frecuencia central se desplaza en el tiempo, pero en función de la secuencia de pseudo-ruido [8].

En la figura 12, se presenta el espectro de la señal modulada con GFSK, correspondiente a un ancho de banda de 1Mhz y una magnitud de 20dB.

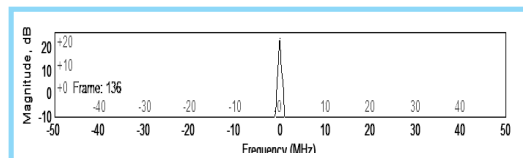


Figura 12. Espectro de la señal modulada en GFSK

Con el fin de generar el salto en frecuencias, se emplea un generador cíclico de números aleatorios con rango de 1 a 16, correspondiente a los 15 canales y frecuencia de 1Mhz. En el caso del sintetizador de frecuencia fue empleado un modulador FSK con separación de frecuencias de 1Mhz [10].

En la figura 13, se puede observar que los saltos se dan dentro de un ancho de banda de

aproximadamente 16MHz. Las tres primeras simulaciones corresponden a distintos tiempos de simulación mientras que la última simulación muestra una imagen con persistencia que captura en detalle el compendio de los 16 saltos generados por el sintetizador de frecuencia.

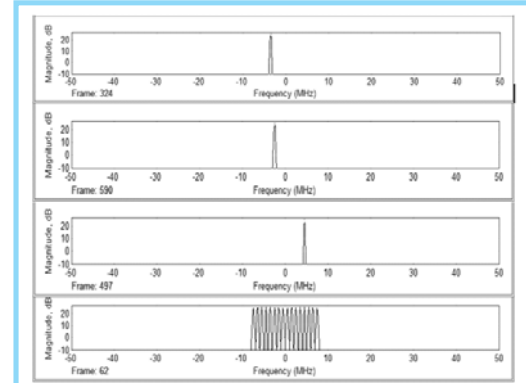


Figura 13. Generación de saltos en frecuencia

Con el fin de consolidar el sistema de comunicación, se vinculan los esquemas de modulación y acceso al medio. La señal modulada es multiplicada nuevamente por la salida del sintetizador de frecuencia, haciendo que el efecto de los saltos sea trasladado a la señal de información.

Es preciso anotar que puesto que el sintetizador maneja 16 canales representados en un ancho de banda de 16Mhz, se produce una expansión del espectro ocupado por el sistema, dado que este es mayor en el acceso al medio que en la señal modulada. Figura 14.

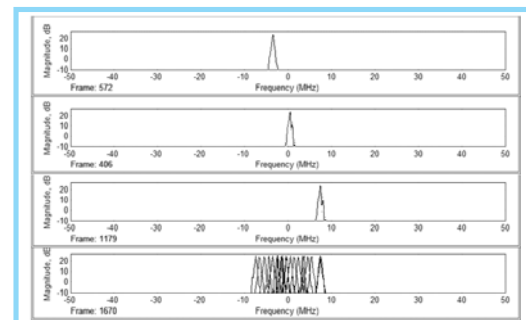


Figura 14. Señal modulada con FHSS

6. Conclusiones

El filtro gaussiano, se comporta en el receptor como un filtro de postdetección capaz de disminuir el ruido térmico y la interferencia co-canal así como los mayores armónicos presentes en la señal modulada. Esta es la característica que hace a GFSK un esquema de

modulación robusto frente a canales con Ruido Blanco Gaussiano o en general ruido no correlacionado así como distribuciones tipo Rician o Rayleigh en las cuales el efecto de multitraectoria introduce interferencias en la señal recibida.

En la modulación GFSK al introducirse un filtro gaussiano de predetención, se reducen las componentes mayores de ruido sobre la frecuencia portadora al tiempo que aumenta la ganancia de la señal al reducir su ancho de banda, acondicionándola antes de que esta sea sometida a la demodulación.

En términos de ancho de banda, es posible realizar una estimación de los requerimientos mínimos de transmisión para cada una de las modulaciones. Si bien al incrementar esquemas M-arios, se reduce sustancialmente el ancho de banda (BW), la interferencia intersímbolo limita la cantidad de agrupaciones de bits.

El filtro gaussiano actúa sobre la señal aumentando la eficiencia espectral de la misma aún con un sistema $M=2$. Adicionalmente, la información contenida es condensada, minimizando la interferencia co-canal. Una vez que el espectro es reducido, la potencia de la señal se concentra en la frecuencia central haciendo que los requerimientos de E_b/N_0 sean menores a los necesarios en otros esquemas de modulación.

El uso de FHSS permite condicionar la portadora a saltos que pueden ser aleatorios o predefinidos, de esta manera es posible evitar la ubicación espectral de la señal en frecuencias sobre las cuales existan condiciones significativas de interferencia.

En FHSS por utilizar saltos en frecuencia sobre códigos pseudoaleatorios, avala la confiabilidad en la información transmitida garantizando seguridad, puesto que la codificación solo es conocida por la pareja Transmisor-Receptor y la portadora salta a través del ancho de banda disponible, la interceptación de la misma hace que sea una tarea imposible en cuanto el tiempo de permanencia sobre una frecuencia en particular.

Referencias bibliográficas

- [1] Tomasi Wayne. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. Edición 4. Pearson. México, 2003.
- [2] M. Fitch, K. Briggs, I. Boyd and F. Stentiford. (University College London). Gaussian multi-level FM for high-bandwidth satellite communications. 2004.
- [3] R. A. Rosien and R. Shavlach, .Bandwidth conservation in pulse modulated radars,. 1958 IRE NATIONAL CONVENTION RECORD.
- [4] A. Mack, A. Meyernoff, D. L. Jacoby, and R. H. Levine. Reduction of bandwidth requirements for radio relay systems.1958 IRE NATIONAL CONVENTION RECORD.
- [5] Ha_ze F., .Spread Spectrum Communications. IEEE Short Circuit Magazine, Nov-Dic 1998, <http://ewh.ieee.org/r10/bombay/news2/story10.htm>
- [6] Randy R., .Introduction to Spread Spectrum, Spread Spectrum Scene, <http://www.sssmag.com/ss.html>
- [7] Glas J.P.F..On the Multiple Access Interference in a DS/FFH Spread Spectrum Communication system., in the Proceedings of the Third IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications,Oulu, Finland, July 4-6, 1994.
- [8] Meel, J. Spread Spectrum (SS): Applications, Spread Spectrum Project 1997-1999, DE NAYER Institute,http://www.sssmag.com/pdf/Ss_jme_denayer_appl_print.pdf
- [9] Rodríguez Juanita, Flórez Camilo. Modelamiento y simulación de las etapas de acceso al medio y modulación digital para un enlace satelital de órbita baja. Tesis de grado. Diciembre 2006.
- [10] Rodríguez Juanita, Flórez Camilo. Modeling and simulation of a low orbit satellital system based on GFSK and FHSS. Universidad de Belgrado. Julio de 2006

Elvis Eduardo Gaona García

Nació en Arauca, Colombia. Es Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital, de Bogotá, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones en la Universidad Distrital de Bogotá, Colombia. Se desempeña como Docente del área de Telecomunicaciones en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital desde hace 6 años. Actualmente, desarrolla el módulo de Estación Terrena del Proyecto de Investigación Cubesat-UD: Telemetría y Telemedicina, y pertenece como investigador al grupo GITEM. egaona@udistrital.edu.co

Juanita Rodríguez Garay

Nació en Bogotá, Colombia. Es Ingeniera Electrónica de la Universidad Distrital de Bogotá, Colombia. Actualmente es estudiante de la Especialización en Gestión de proyectos de Ingeniería en la Universidad Distrital de Bogotá, Colombia. juanisg93@gmail.com

Camilo Humberto Florez Contreras

Nació en Bogotá, Colombia. Es Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital de Bogotá, Colombia. Actualmente es estudiante de la Especialización en Gestión de proyectos de Ingeniería en la Universidad Distrital de Bogotá, Colombia. camiloflorez@gmail.com