

Adecuación de un canal digital para la emisora de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas

José Ignacio Castañeda Fandiño¹

RESUMEN

La transmisión de datos a través de la señal de audio de una emisora de FM es posible gracias al ancho de banda disponible (WB). Este paper describe una solución para adecuar un proyecto anterior que tuvo como objetivo la transmisión de datos usando el WB dedicado para este propósito. Se explica cómo se utiliza un WB más angosto y se logra una velocidad de transmisión más alta, mostrando comparativamente las ventajas que acompañan al nuevo sistema.

Palabras Clave: Modulación Digital, Modulación Analógica, Espectro de Frecuencias, Modulación de Frecuencia.

ABSTRACT

The Data Transmission through audio's signal of a FM's broadcasting station is possible thanks to wide band (WB) available. This paper describes one solution to improve a last project, which was implemented to transmit data using the WB dedicated to this purpose. It explain how a WB more narrow is used and also is possible a greater transmission rate, showing comparatively the advantages that accompany to the new system.

Key Words: Digital modulation, analog modulation, frequency spectrum, frequency modulation.

1. INTRODUCCIÓN

El ancho de banda asignado a una emisora de FM le permite a ésta transmitir información de audio de alta calidad, usando para este propósito las frecuencias comprendidas entre 0 y 15 kHz para la parte monofónica y las frecuencias desde 19 kHz a 53 KHz para la estereofónica, siendo el tono de 19KHz utilizado como piloto para la detección de la señal estereofónica, el cual permite a un receptor

engancharse sin dificultades para recibir dicha señal. El sonido estereofónico está comprendido entre 23 kHz y 53 kHz, usando modulación DSB-SC con una subportadora de 38 kHz, la cual se produce con la multiplicación x 2 del tono Piloto.

La transmisión de un canal de audio deja espacio para material adicional dentro del ancho de banda asignado. El sistema Subsidiary Communications Authorization (SCA) permite, por medio de una autorización a una estación comercial FM, añadir otro canal de radio además del monofónico y el estereofónico. Actualmente el sistema de mayor uso utiliza una portadora centrada en los 67 KHz con un ancho de banda de 10 KHz. Estas subportadoras pueden llevar 5 KHz de programación adicional de audio, que puede ser utilizada en sistemas que brinden servicios de traducción de idiomas o servicios subsidiarios de música por suscripción, conocida como música ambiental., etc. Desde 1955 una estación de FM puede usar

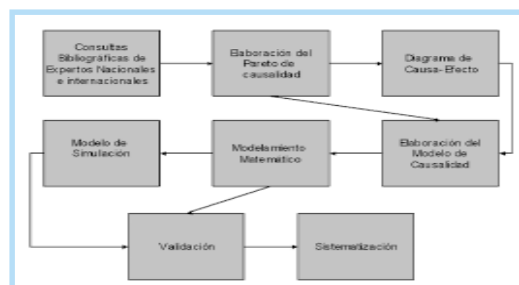


Figura 1. Espectro de un sistema de estéreo multiplex

la técnica de multiplexación de frecuencia para dividir su canal en un canal principal y varios subcanales. Un subcanal se destina para la señal estéreo y los otros pueden ser usados para música u otros propósitos. Para mantener limitado el ancho de banda a las condiciones de transmisión, se reduce la amplitud máxima de estas señales, ya que la amplitud de las señales se ve reflejada en una desviación de frecuencia, con lo cual se logra adaptarla al sistema de

¹ Miembro Grupo de Investigación en Telecomunicaciones de la Universidad Distrital GITUD.

La transmisión de señales digitales a través de un canal análogo es posible si se hace un uso eficiente del espectro.

transmisión al generarse así una reducción en el ancho de banda un espectral. La figura 1 muestra el espectro de una transmisión comercial típica antes del transmisor FM.

El envío de información adicional a la programación normal se realizó en la emisora de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, LAUD 90.4 FM ESTEREO en el 2002, haciendo uso del ancho de banda (WB) dedicado para tal propósito, lo cual implicó la necesidad de solicitar autorización al Ministerio de Comunicaciones. El presente artículo describe una solución para adecuar dicho proyecto a unas exigencias mayores de transmisión, esta adecuación comprende el uso de una región dentro del espectro de transmisión que no pertenezca al de SCA de tal forma que no sea necesaria dicha autorización, garantizando al mismo tiempo la transparencia del canal de datos (no interferencia con la señal de audio radiodifundida), y un aumento en la tasa de transmisión.

2. PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN

El objetivo del proyecto es desarrollar un sistema *Funcional y Estable*, adecuando el prototipo desarrollado anteriormente. Para ello, se tienen en cuenta las características de tal sistema [1]:

- Tipo de Modulación: MSK
- Zona No Utilizada: Banda para SCA (59 – 75) kHz
- Ancho de Banda: 10 kHz aprox.
- Velocidad de Tx: 1 kbps

Debido a que el objetivo buscado es ocupar el menor ancho de banda posible, se debe contar con una técnica de modulación digital que ofrezca:

- Eficiencia Espectral (bps/Hz)
- Rendimiento de Probabilidad de Error
- Mínima utilización del espectro

Existen numerosas técnicas de modulación digital que pueden ser llamativas para este montaje, pero se debe escoger la que más se ajuste a la necesidad requerida y a los límites existentes, además, se debe observar la posibilidad del montaje de acuerdo a su complejidad. Los métodos de modulación más repre-

sentativos se resumen en la tabla I [2], con las características de rendimiento de probabilidad de error, eficiencia espectral y complejidad. A partir de la tabla 1 se puede deducir que existen métodos de modulación que pueden brindar mejores eficiencias de ancho de banda (WB), pero con el inconveniente de implicar montajes bastante laboriosas que pueden derivarse posibles problemas de montaje, además necesitan mayor energía para presentar un rendimiento de probabilidad de error aceptable respecto a sistemas con un menor número de niveles de cuantización, este es el caso de los métodos PSK de 8 y 16. Si se observan en conjunto las tres características, la combinación más llamativa entre eficiencia espectral y comportamiento de error la muestran las técnicas QPSK y MSK, poseyendo ambas niveles de montaje relativamente sencillos de realizar de manera práctica; esto último permite mantener un nivel de costos razonable. Así, se tienen valiosas razones para enfocar el trabajo hacia alguna de las dos técnicas de modulación.

Tabla I. Comportamiento de Error de métodos representativos de modulación digital (filtro no ideal con $r=0.5$, logrando una aproximación a un ancho de banda promedio)

Tipo de Modulación	Sistema ideal Eb / η (dB)	Banda Limitada Eb / ζ (dB)	Banda Limitada B.W.Eff. (bps/Hz)	Grado de Complejidad
BPSK	8.4	9.4	0.8	Media
DPSK	9.3	10.6	0.8	Media-Baja
MSK	8.4	9.4	1.9	Media
QAM	8.4	9.5	1.7	Media
QPSK	8.4	9.9	1.9	Media
DQPSK	10.7	11.8	1.8	Media
8-PSK	11.8	12.8	2.6	Alta
16-PSK	16.2	17.2	2.9	Alta

Las características mencionadas son, para MSK y QPSK, muy similares, pero sus comportamientos en el espectro difieren considerablemente, lo que se convierte en un punto de decisión sobre la técnica a utilizar. La densidad espectral de potencia de la señalización QPSK Y OQPSK es

$$S_x(\omega) = 2 A^2 T_b [S_a(\omega T_b)]^2 \quad (1)$$

y la densidad espectral de potencia de la MSK es

$$S_x(\omega) = \frac{16 A^2 T_b}{\pi^2} \left[\frac{\cos \omega T_b}{1 - (2 \omega T_b / \pi)^2} \right]^2 \quad (2)$$

donde ω' es la frecuencia en radianes medida desde la frecuencia portadora. La figura 2 [3] muestra los gráficos de las ecuaciones (1) y (2), en los que se observa que la modulación MSK tiene un lóbulo principal más amplio (el primer cero está en $0.75/T_b$) que las modulaciones QPSK y OQPSK (el primer cero está en $0.50/T_b$) pero la densidad espectral de potencia de la modulación MSK tiene lóbulos más bajos a frecuencias más lejanas de la portadora, su función de transferencia decrece más rápidamente fuera del ancho de banda mínimo a una razón proporcional, al menos, a ω^4 lejos de la frecuencia portadora. Estas observaciones en la comparación de varias mediciones de ancho de banda están resumidas en la tabla II [1].

Tabla II. Comparación de ancho de banda de la señalización MSK y QPSK

Tipo de Modulación	Anchos de Banda		
	- 3dB	- 50 dB	99% del Contenido de Potencia
QPSK, OQPSK	$0.44 / T_b$	$100/T_b$	$10.3/T_b$
MSK	$0.59 / T_b$	$8.18 / T_b$	$1.17/T_b$

Dadas las características de Densidad Espectral de Potencia, la técnica MSK es la escogida para ser utilizada en el sistema de transmisión de datos, ya que con ella se asegura en mayor grado la integridad del canal digital, gracias a la rápida reducción de energía en sus vecindades.

3. MODULACIÓN MSK

La técnica de modulación digital MSK (*Minimum Shift Keying* o *Conmutación de Corrimiento Mínimo*), es una versión de FSK cuyas características hacen que sea un método mejorado respecto a ésta [1], [4], [5] También recibe el nombre de *modulación digital FSK de Fase Continua*, en la cual se utiliza una modulación sobre la fase con el objetivo de reducir el contenido espectral que se origina fuera de la banda, para esto, se controla la fase de tal manera que se evita toda discontinuidad en la señal modulada mientras se utiliza el corrimiento de frecuencia para conducir la información. Esto presenta una ventaja respecto a la modulación FSK, en la cual, la fase no se aprovecha, excepto para proveer la posible sincronización del receptor con el transmisor.

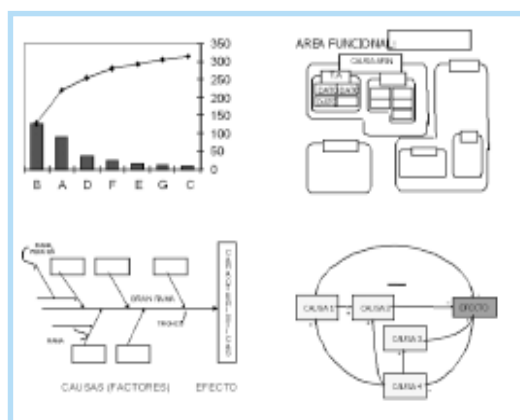


Figura 2. Densidades Espectrales de Potencia de las ondas MSK, QPSK Y OQPSK

La modulación m-aria MSK ofrece una solución práctica para la representación de códigos binarios sobre portadora analógica.

En MSK, la condición para la conmutación ortogonal es de

$$2 \Delta \omega T_b = n \pi \quad (3)$$

Siendo, $\Delta \omega$ la diferencia entre las frecuencias que representan la información digital (1 y 0); T_b el tiempo de bit y n un número entero.

Puesto que el objetivo es la eficiencia espectral, se elige la condición mínima:

$$\Delta \omega T_b = \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

ó

$$2 \Delta f T_b = \frac{1}{2} \quad (5)$$

Como este es el mínimo espacio de frecuencia entre ω_1 y ω_2 que permite que las dos ondas de señal FSK sean ortogonales entre sí, esta selección particular de la FSK se llama *Conmutación de Corrimiento Mínimo (MSK)* [1], [6].

Haciendo una comparación con la técnica FSK, el mayor problema que se tiene se deriva de no existir un control sobre la fase de la señal, lo cual provoca grandes discontinuidades en la fase de la forma de onda al transmitirse los bits. Estas características indeseables de la señal FSK, hacen que su espectro se esparza ampliamente, lo cual, con el ancho de banda del que se dispone, puede provocar interferencias. Como complemento a esta explicación, se tienen las gráficas de una señal FSK y MSK junto con sus espectros (Figura 3), por medio de una simulación de computador [4]. Usando un generador de datos aleatorios a 40kbps, con las frecuencias para FSK de 70 KHz y 90 KHz, y para MSK de 60 KHz y 80

La estructura espectral de la señal MSK permite un alto grado de integridad de la información transmitida.

KHz, se puede apreciar en la figura 3 [4] la evidente ventaja de MSK frente a FSK en términos de su contenido dentro del ancho de banda permitido. También se puede notar que el espectro de MSK carece de componentes espectrales a las frecuencias de señalización. La razón de esto se debe al hecho que al mismo tiempo existe igual probabilidad de transmisión para las dos fases. La potencia, por consiguiente, no es desperdiciada, demostrando lo dicho anteriormente [4].

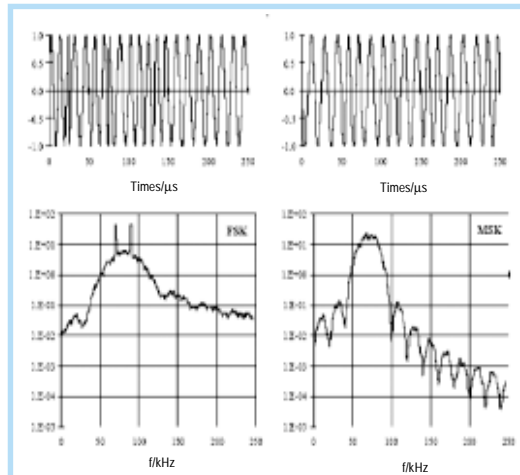


Figura 3. Señales FSK y MSK con sus espectros

En resumen, las ventajas de MSK frente a FSK son:

- Control de la fase para evitar toda discontinuidad en la señal modulada.
- Transmisión de información a mayores velocidades dentro de un ancho de banda (WB) determinado.
- Menor consumo de potencia

4. MONTAJE

La figura 4 muestra el diagrama de bloques del sistema completo. Se puede apreciar en ella la parte de transmisor (a la izquierda) y la parte del receptor (a la derecha). El sistema funciona de la siguiente forma:

Los datos son generados en un PC por medio de una interfaz de usuario creada en JAVA, la cual permite escribir los mensajes alfanuméricos y ser modificados antes de ser enviados; también es posible almacenar los

mensajes como archivos de texto para ser recuperados en otra oportunidad si se desea volver a enviar. Para la exportación de los datos, se utiliza la interfaz RS-232, es decir, los datos son generados en forma serial, ya que la entrada de datos al modulador digital es de este tipo.

Los datos son transmitidos del PC al modulador, el cual se encarga de producir dos señales senoidales de diferentes frecuencias de acuerdo al dato binario de entrada. El modulador utilizado es el *cmx469A* de la empresa *CML Microcircuits*, que posee características llamativas para esta aplicación. Las más representativas son:

- Funciones de Transmisor y Receptor independientes
- Disponibilidad de Selección de Rata de bits: 1200, 2400 y 4800.
- Recuperación de reloj
- Detección de portadora
- Bajo consumo de potencia (2.0 mA typ. @ 3.0 V)

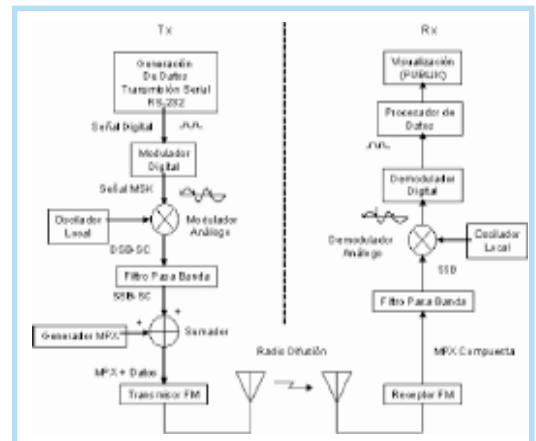


Figura 4. Diagrama de Bloques del Sistema de Transmisión de Datos

Aplicaciones:

- Datos sobre Radio
- Canales de Datos de Banda Angosta
- Radio y aplicaciones generales

Aprovechando al máximo las características del dispositivo, se configuró a una tasa de 4800 baudios. En esta configuración, las frecuencias generadas son:

- Medio ciclo de 2400 Hz para la marca ('1')
- Un ciclo de 4800 Hz para el espacio ('0')

Como las frecuencias producidas por el modulador se encuentran dentro del ancho de banda de audio monofónico, lo cual causa notables interferencias en el sonido, es necesario desplazar dichos tonos a un lugar en el que no se presenten estos problemas, incluyendo el audio estéreo. El ancho de banda escogido se encuentra entre los 53 kHz y los 59 kHz, espacio en el que no se tiene información de audio, ni es dedicado para SCA (ver figura 1). Para ello se montó un modulador balanceado de DBS-SC, cuyas entradas son las frecuencias de información y una portadora de 53kHz. Con esto se tienen frecuencias de suma y de diferencia. Las frecuencias de diferencia caen dentro de la banda lateral superior del audio estéreo, por lo que se deben eliminar a través de un filtro pasabanda, que sólo permita el paso de las frecuencias de suma, logrando una señal SSB [3]. Así, las frecuencias de trabajo son:

- Marca: $(53000 + 2400) \text{ Hz} = 55400 \text{ Hz}$
- Espacio: $(53000 + 4800) \text{ Hz} = 57800 \text{ Hz}$

El ajuste del oscilador [7] y el filtro [8] son puntos críticos, ya que por parte del oscilador se debe garantizar estabilidad y el filtro debe ser muy selectivo, buscando la transparencia del canal digital, lo cual exige un orden alto, al menos de cuarto orden, con esto, se consigue una caída de 80 dB/década. Luego del filtro se tiene un sumador encargado de adicionar a la señal de audio producida por un generador MPX, la señal de datos para finalmente entregar toda la señal a la parte de radiodifusión.

Por parte de la recepción, se tiene, para la detección de la señal, un receptor de FM comercial, encargado de recibir la señal de la emisora, la cual está compuesta por el audio (MPX) + datos; esta señal es filtrada para obtener únicamente los tonos de los datos, comprendidos entre 55 kHz y 58 kHz. Seguido del filtrado, se encuentra un demodulador analógico detector de SSB, del cual se obtiene la información digital en banda base (2400 Hz y 4800 Hz). Estas señales son transmitidas directamente al demodulador digital, el cual está formado por una unidad idéntica a la utilizada en el transmisor, el cual se encarga de generar los datos binarios que posteriormente son entregados a un microcontrolador, capaz de procesar dicha

información y controlarla para ser visualizada en un tablero electrónico público o PUBLIK.

5. SISTEMA FINAL

El sistema logrado tiene estas características:

- Tipo de modulación: MSK
- Ancho de Banda: 3 kHz
- Velocidad de Tx: 4.8 kbps
- Canal Transparente

Dimensiones Físicas

- Transmisor: 18 x 20 x 6 cm
- Receptor: 18 x 20 x 6 cm
- PUBLIK: 50 x 7 cm

6. RESULTADOS

El ajuste del oscilador local en el receptor se realizó en forma experimental, utilizando un ajuste manual y validado dicho sincronismo con la señal recibida en el osciloscopio. Se partió del modelo teórico usado en el transmisor, de manera que las señales de los datos llegaran con su fase lo más cercano posible a las originales. Las formas de onda de los dos tonos en forma original y recuperados se muestran en la figura 5.

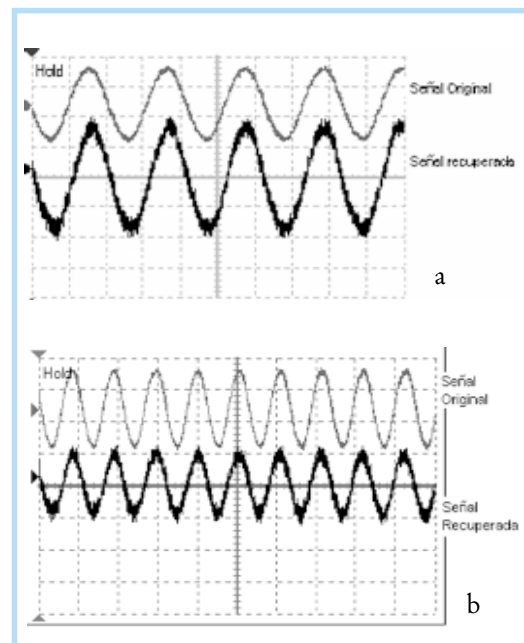


Figura 5.(a) Recuperación del tono de 2.4 kHz, '1' lógico.
(b) Recuperación del tono de 4.8 kHz, '0' lógico

Con la técnica de corrección de errores utilizada (algoritmo 2 de 3) [1], la recepción correcta de los datos alcanza un fiabilidad del 95%,

El uso de la fase en MSK brinda una ventaja respecto a la modulación FSK, con lo cual se hace un mejor uso del espectro.

lo que representa una estabilidad del sistema aceptable, siendo este código un algoritmo sencillo, que puede ser reemplazado por otros más elaborados los cuales podrían exigir una mayor capacidad de procesamiento del microcontrolador utilizado.

La señal de la emisora LAUD 90.4 FM ESTEREO, presenta un alto componente de ruido en estéreo, el cual afecta estas las componentes donde se han depositado los datos modulados, por lo tanto, los datos se pueden ver afectados, lo cual dificulta su recepción.

7. CONCLUSIONES

Gracias a la modulación MSK, se logró una adecuación del recurso ancho de banda, sin ser necesaria la ocupación de la banda de comunicaciones subsidiarias y, por ende, la autorización para su uso, teniendo un canal transparente que puede ser usado tanto para datos como para otras aplicaciones. La tasa de transmisión de bits a la que se llegó superó el valor del objetivo inicial (2 kbps), ya que se aprovecharon al máximo los recursos del modulador digital, el cual ofrece velocidades desde 1200 a 4800 baudios, siendo esta última la utilizada en el montaje final convirtiendo al sistema en uno más idóneo para aplicaciones posteriores. La correcta recepción de los datos depende, en principio, de la calidad de la señal recibida, es decir, de la señal completa (MPX + datos). A ello están ligados factores como la sensibilidad del receptor comercial (umbral mínimo de señal que puede el receptor percibir sin distorsión), el cubrimiento que haga la antena de alta potencia en el lugar de recepción, la potencia de la señal de transmisión, la ubicación de la antena de potencia, la antena que se utilice en el receptor y la calidad de la misma señal.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TOMASI, Wayne. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, 2 ed. México: Prentice Hall, 1.996. 858 p.
- [2] STERMLER, Ferrel. *Sistemas de Comunicación*. México: Alfaomega, 1.999. 690 p.
- [3] Minimum Shift Keying [MSK] Modulation —a special form of FSK. [<http://www.columbia.edu/~rdg74/ee6713/MSK.PDF>]. 2001

- [4] DARNTON, Bernard y BAHN, John. «Digital Microwave Modulator». Physics Department, University of Otago, PO Box 56, Dunedin. [<http://www.physics.otago.ac.nz/electronics/papers/DartonBahr96.pdf>]. Agosto, 1996
- [5] GABRIUNAS, Vytautas. *Apuntes de Electrónica*, Universidad Distrital F. J. C. Bogotá, 1999
- [6] COUCH, Leon. *Sistemas de Comunicaciones Digitales y Análogos*, 5 ed. México: Prentice Hall, 1.998. 776 p.
- [7] PERTENCE, Junior. *Amplificadores Operacionales y Filtros Activos*. McGraw-Hill. España, 1991.
- [8] GONZALEZ, Leonardo, GARCIA, Julio y GUZMAN Jorge. *Estudio, Diseño e Implementación de un Canal Digital para la Emisora de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas*. Trabajo de Grado. Universidad Distrital F.J.C. Bogotá, 2002
- [9] TERREL, David. *OP AMPS - Design, Application and Troubleshooting*. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, 1992.
- [10] COUGHLIN, Robert y DRISCOLL, Frederick. *Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales*, 4 ed. México: Prentice Hall, 1.993. 538 p.
- [11] SUAREZ, Carlos. *Introducción a los Amplificadores Operacionales con Aplicaciones*. Colombia, 2000: 205 p.
- [12] FLOYD, Thomas. *Fundamentos de Sistemas Digitales*. Sexta Edición. Prentice Hall. España, 1997
- [13] SCHILLING, Donald y TAUB Helbert. *Principles of Communication Systems*. Second Edition. McGraw-Hill. Singapur, 1986.
- [14] FINK, Donald y CHRISTIANSEN, Donald. *Manual de Ingeniería Electrónica*, Volumen IV. McGraw-Hill. México, 1992.
- [15] KRAUSS, Herbert. *Estado Sólido en Ingeniería de Radiocomunicación*. LIMUSA. México, 1984.
- [16] FM SCA—Subsidiary Communications Authorization or FM Subcarrier Information —Also Called Subsidiary Communications Service (SCS) [<http://home.tbbs.net/~bhammond/sca.htm>]. 2001
- [17] Hodgart M.N. «A robust MSK demodulator through DSP», IEEE Proc. of the South African Symposium on Comm. and Signal Processing COMSIG'92, pp. 211-216, Sept. 1992.
- [18] NARAYANAN, Krishna R.; ALTUNBAS, Ibrahim and NARAYANASWAMI, Sekhar. «Design of Serial Concatenated MSK Schemes Based on Density Evolution». IEEE Transactions on Communications, vol. 51, No. 8, august 2003
- [19] BEAULIEU, Norman C. and ABU-DAYYA, Adnan A., «Error Rates of Nyquist-Shaped QPSK in Cochannel Interference and Fading.» IEEE CCECE/CCGEI, 1993. pp 733-737.
- [20] Cochran, Bruce A., «Development and Application of M-ary Gaussian Minimum Shift Keying Modulation.» IEEE, 1995. pp. 1805-1908.
- [21] WIKLUNDH, K. «A comparison between the impact of some signals on an MSK receiver. Military Communications Conference Proceedings, 1999. MILCOM 1999. IEEE, Vol. 1, Noviembre. 1999. Page(s): 51 -55

José Ignacio Castañeda Fandiño

Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital, Especialista en Telecomunicaciones Móviles, Profesor de planta de la Universidad Distrital. Hace parte del Grupo de Investigación en Telecomunicaciones de la Universidad Distrital