

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MAESTRIA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERIA**



**“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA  
DE RADIO DIGITAL (DAB) UTILIZANDO UN  
CÓDIGO DE BLOQUE ESPACIO TIEMPO (STBC)”**

**T E S I S**

Que para cubrir parcialmente los requisitos para obtener el grado de  
MAESTRO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA presenta:

**IRMA URIARTE RAMÍREZ**

DIRECTOR DE TESIS:  
**M.C. GUILLERMO GALAVÍZ YAÑEZ**

CO-DIRECTOR DE TESIS  
**DR. ÁNGEL GABRIEL ANDRADE REÁTIGA**

Mexicali, B.C.

Agosto de 2008



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, MEXICALI**  
**Maestría en Ingeniería Electrónica**

**ACTA DE REVISIÓN DE TESIS**

TESIS DE GRADO

**“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE RADIO  
DIGITAL (DAB) UTILIZANDO UN CÓDIGO DE BLOQUE  
ESPACIO TIEMPO (STBC)”**

PRESENTADA POR

***IRMA URIARTE RAMÍREZ***

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

---

M.C. GUILLERMO GALAVIZ YAÑEZ

Director del Comité

---

DR. ÁNGEL GABRIEL ANDRADE REÁTIGA

Co-director del Comité

---

DR. NUN PITALÚA DÍAZ

Miembro del Comité

---

M.I. PATRICIA LUZ AURORA ROSAS MENDEZ

Miembro del Comité

---

M.C. JORGE EDUARDO IBARRA ESQUER

*Miembro del Comité*

---

*Dr. Ángel Gabriel Andrade Reátiga*

*Coordinador de Posgrado e Investigación*

RESUMEN de la tesis de Irma Uriarte Ramírez, presentado como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA. Mexicali, Baja California, México, Agosto de 2008.

## **EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE RADIO DIGITAL (DAB) UTILIZANDO CÓDIGO DE BLOQUE ESPACIO TIEMPO (STBC)**

Resumen aprobado por:

---

M.C. GUILLERMO GALAVIZ YAÑEZ  
Director de Tesis

---

DR. ÁNGEL GABRIEL ANDRADE REÁTIGA  
Co-director de Tesis

En este trabajo se presenta el estudio y evaluación del desempeño de aplicar técnicas de codificación espacio-tiempo en un sistema de Radiodifusión de Audio Digital (DAB). En el esquema propuesto, se emplean únicamente dos antenas transmisoras y una antena receptora. Se investiga como influye la diversidad espacial y temporal de los códigos espacio-tiempo en mitigar la interferencia íntersímbolo (ISI) y en consecuencia el mejoramiento del Bit Error Rate (BER). Los resultados numéricos muestran que la técnica de codificación espacio-tiempo es un medio eficiente para mejorar el desempeño de un sistema (DAB) y la calidad de servicio de la información.

**Palabras clave:** Codificación espacio-tiempo, radiodifusión digital, multitrayectoria

ABSTRACT of the thesis presented by IRMA URIARTE RAMÍREZ, in order to obtain the MASTER OF ENGINEERING DEGREE ELECTRIC AREA.  
Mexicali, Baja California, México, August 2008.

## **EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE RADIO DIGITAL (DAB) UTILIZANDO CÓDIGO DE BLOQUE ESPACIO TIEMPO (STBC)**

This paper evaluates the performance of space-time coding techniques applied to a Digital Audio Broadcasting (DAB) System. The proposed scheme uses two transmitter antennas and one receiver antenna. This work investigates the way space and time diversity can decrease the inter-symbol interference (ISI) and improve bit error rate. Numeric results show that space-time codes are a good way to improve the performance of a system (DAB) and the quality of additional information services.

Keywords: Space Time Block Code, multipath, Digital Audio Broadcasting..

## DEDICATORIA

A Fernando y al fruto de nuestro amor que llevo en mi vientre.

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente doy gracias a Dios por que en cada momento me demostró que siempre esta ahí sosteniéndome incluso cuando no lo pedí.

Fernando muchas gracias por tu amor, gracias por tu paciencia y tu confianza en mi. Gracias por tus palabras de aliento y por demostrarme a cada momento que me amas. Y gracias por este hijo que llevo dentro que es nuestro tesoro. Te amo mi precioso.

Gracias a mi familia, a esa maravillosa familia que nunca se cansa de ayudarme y de quererme. Gracias a mis padres ( Jue e Irma) y a mis hermanos (Caro, Nati y Jue) por su confianza, gracias a mi Mamá Beni, que siempre esta ahí cuando la necesito, Dios la bendiga siempre. A mis Tita y a sus hijas que siempre me ayudan.

Gracias Guillermo Galaviz y Ángel Andrade, por su paciencia, por su tiempo y por compartir conmigo sus conocimientos. Pero sobre todo gracias por la amistad y por los buenos momentos que pasamos.

Gracias a mis compañeros y ahora amigos de maestría. Gracias Maisha por tu cariño y apoyo. Gracias Dani por tu amistad y por hacerme los días divertidos. Gracias Pablito por ser mi amigo y gracias Charlie por tu confianza. Gracias Citlalli por ser mi amiga y por darme tu confianza.

Gracias a los Maestros Guillermo Anguiano y Rene Bastidas por brindarme su amistad y ayuda.

Gracias Alma y Cecilia por la amistad de tantos años.

# Índice

	<b><u>Página</u></b>
<b>1. Introducción</b>	
Planteamiento del problema	1
Justificación	1
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
Organización de la tesis	2
<b>2. Antecedentes</b>	
Antecedentes	3
<b>3. Radio digital</b>	
Introducción	7
Proyectos de Radio Digital Terrestres	11
Proyecto IBOC	11
DRM (Digital Radio Mondiale)	17
Eureka 147	19
<b>4. Codificación de canal</b>	
Introducción	23
Códigos espacio tiempo	
Definiciones	26
Descripción de los códigos de bloque espacio-tiempo	28
<b>5. Simulaciones en computadora</b>	
5.1 Introducción	33
5.2 Descripción del modelo	33
5.3 Resultados numéricos	37
<b>6. Conclusiones</b>	43
<b>Bibliografía</b>	45

## Índice de figuras

<b>Figura</b>	<b><u>Página</u></b>
1 Efecto multitrayectoria en un sistema móvil.	4
2 Efecto de sombreado en un sistema móvil.	4
3 Espectro de frecuencia IBOC en FM.	12
4 Sistema IBOC híbrido.	16
5 Diagrama a bloques de DAB.	20
6 Diagrama general de un sistema de comunicación.	23
7 Representación de un código de bloque espacio-tiempo $G_2$ de doble transmisor simple de la ecuación 3.	32
8 Diagrama a bloques de un sistema DAB, incluyendo un codificador espacio-tiempo.	34
9 Diagrama a bloques de la simulación utilizada en este trabajo.	36
10 Desempeño de Eureka-147 utilizando un canal AWGN.	38
11 Código de bloque espacio-tiempo $G_2$ con dos receptores.	39
12 Resultados gráficos de un sistema de comunicación modulado QPSK utilizando un código $G_2$ para uno y dos receptores.	40
13 Resultados de un código $G_2$ con un receptor para diversos esquemas de modulación	41
14 Resultados de un código $G_2$ con dos receptores para diversos esquemas de modulación	41
15 Desempeño de Eureka-147 con el código de bloque $G_2$ .	42

## TABLAS

1 Codificación y proceso de transmisión para códigos de bloque espacio-tiempo $G_2$ de la ecuación 3.	29
2 Características del sistema de radio digital Eureka-147	40

# Capítulo 1.

## 1.1 Planteamiento del problema

La radiodifusión digital necesita de velocidades mayores de transmisión, ya que además de audio, también ofrece los servicios de datos y multimedia. El estándar europeo EUREKA-147, propone desarrollar un nuevo sistema de transmisión digital, el cual ha sido reconocido por la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) como un estándar mundial. EUREKA 147 DAB es un sistema de radiodifusión muy confiable, diseñado específicamente para una amplia cobertura en sistemas móviles, portables y fijos. Como inconveniente para este propósito, se presenta el fenómeno de la multitrayectoria, con el propósito de reducir la probabilidad de error e incrementar la tasa de transferencia, se propone la integración del Codificador de Bloque Espacio Tiempo propuesto por Alamouti en [1] al estándar Eureka 147.

## 1.2 Justificación

La tecnología de la radiodifusión digital empezó en 1988, con el proyecto de la comunidad Europea (EUREKA 147), desde entonces hasta nuestros días se han creado estándares adoptados por la ETSI y la ITU.

Los países mas interesados en la conversión analógica digital son el Reino Unido, Alemania y España. El resto de los países europeos este cambio es insignificante. En 1999, Alemania realizó propuestas sobre planeación de redes de radiodifusión digital, se caracterizó el canal y se hicieron estudios de rendimiento [2]. En España se han hecho pruebas de campo y mediciones de cobertura en áreas urbanas con el sistema DAB. [3]. Se ha analizado la recepción de la señal en la banda L, donde el desvanecimiento multitrayectoria, el desplazamiento Doppler y el efecto de ruido degradan la señal que se transmite, con el fin de caracterizar canales móviles. Se ha trabajado con múltiples antenas (MIMO-DAB), para alcanzar tasas altas de transmisión para multimedia [4].

Por su parte Estados Unidos también realiza ya transmisiones con su estándar para radiodifusión digital IBOC, en su versión híbrida. Se han hecho estudios sobre todo con codificación de canal, ya que se ha presentado en este sistema el problema de interferencia con la señal analógica de radio.

En México se reservó desde el año 2000 una franja espectral para pruebas de radio digital, se han hecho pruebas de campo de ambos sistemas, pero aun no se decide nada.

### **1.3 Objetivo General**

El objetivo primordial de esta tesis es el analizar y evaluar el desempeño de un código de bloque espacio-tiempo dentro de un sistema de radiodifusión digital (estándar Eureka-147.) y bajo un ambiente multitrayectoria.

#### **1.3.1 Objetivos Específicos.**

- Investigar las características de los sistemas de radiodifusión digital.
- Investigar los requerimientos para la transmisión de audio digital a través del medio inalámbrico
- Simular códigos de bloque espacio-tiempo para conocer su funcionamiento y características de desempeño.
- Simular un sistema de radio digital correspondiente al estándar Eureka-147.

### **1.4 Organización de la tesis.**

Para tal efecto, este trabajo esta organizado de la siguiente manera. Se presentan en la sección II las características generales de los sistemas de radiodifusión de audio digital propuestos en los estándares IBOC (USA) y Eureka 147 (Europa). El funcionamiento de un decodificador de bloque espacio-tiempo se presenta en la sección III. En la sección IV se presenta la propuesta de un codificador espacio-tiempo aplicado en el sistema DAB Eureka 147. En la sección V se presentan los resultados numéricos de estas simulaciones. Finalmente se presentan las conclusiones de esta tesis.

## Capítulo 2.

### 2.1 Antecedentes.

Desde la década pasada, los cambios y desarrollos en la radiodifusión han sido notorios. Después de la radio FM estereo, la radiodifusión digital es un avance mas en la transmisión de audio para fines comerciales. Esta radio digital, tiene dos versiones, la que utiliza transmisión terrestre y la vía satelite. Esta tecnología es conocida alrededor de mundo con los siguientes nombres: Digital Audio Broadcasting (DAB), Digital Radio Broadcasting (DRB) y como Digital Satellite Broadcasting (DSB).

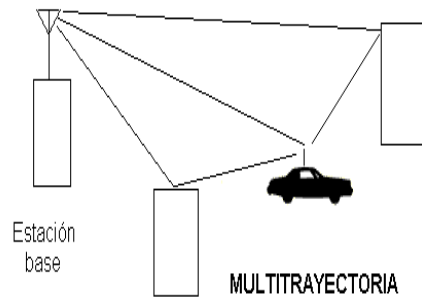
Los sistemas DAB necesitan velocidades altas para la transmisión diversos servicios, además de audio, por ejemplo datos y multimedia. Sin embargo, debido a las limitantes de espectro disponible, es impractico o en algunas ocasiones muy caro el incrementar el ancho de banda de la transmisión. Existen otros problemas que se presentan durante la transmisión y recepción de audio digital.

La recepción de señales DAB esta influenciada por las múltiples trayectorias que se originan de las reflexiones de una señal portadora y que toman diversos caminos de propagación con diferentes características (reflexiones y difusión causadas por obstáculos en el entorno). La multitrayectoria (fig. 1) provoca variaciones en la señal, ya que puede ocurrir que las señales reflejadas al llegar al mismo receptor se cancelen entre si, por lo tanto se incrementa la probabilidad de perder información. Estas variaciones usualmente corresponden a una distribución Rayleigh [22].

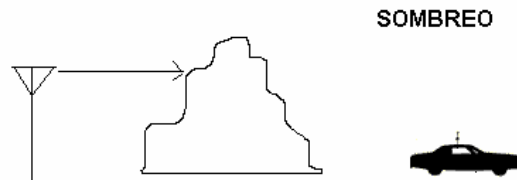
Otro fenómeno que ocurre en el receptor móvil, es el corrimiento en frecuencia debido al efecto Doppler que ocasiona un degradamiento en los parámetros de la señal recibida.

Las características de propagación del canal de transmisión de un sistema digital de radio, se ven afectadas por diversos factores. El canal esta expuesto a atenuaciones provocadas por el sombreado (debido a edificios altos, árboles, etc.) se ilustra en la figura 2.

Por lo tanto, el diseño, la complejidad y como consecuencia el precio de un sistema DAB, son directamente proporcionales a estos factores que incrementan la probabilidad del error. El grado de atenuación de la señal recibida, depende de la frecuencia de operación, la altura de la antena receptora y el tipo de entorno en el cual opera la señal; si es rural, con mucha vegetación, montañoso, suburbano o urbano.



**Fig. 1** Efecto multitrayectoria en un sistema móvil..



**Fig. 2** Efecto de sombreo en un sistema móvil.

Para combatir los diversos efectos de estos fenómenos, se han desarrollado diversas técnicas que ofrecen mejorar la protección de la información causada por el canal. Estas técnicas envían al receptor múltiples versiones de la señal transmitida [5], [6].

Muchas técnicas, en el área de la codificación de canal, explotan la diversidad temporal, en frecuencia, espacio, código y polarización con el fin de mejorar el desempeño de los sistemas digitales, ya que neutralizan los efectos del desvanecimiento en los canales de comunicaciones móviles inalámbricos [7], [8].

En años recientes, ha crecido el interés por combinar los beneficios de las técnicas de codificación de canal con corrección de error con múltiples antenas (diversidad espacial). El interés por estudiar las técnicas de Codificación Espacio-Tiempo se debe a las ventajas que ofrecen en aplicaciones de sistemas de comunicaciones móviles. Utilizar esta técnica permite reducir la probabilidad de perder información por los efectos del desvanecimiento multitrayectoria, sombreado y dispersión [1].

Los esquemas de Codificación Espacio Tiempo se construyen a partir de un sistema con múltiples antenas transmisoras y una o más antenas receptoras para lograr diversidad espacial. Algunos de los trabajos que exploran la diversidad espacial y temporal de los sistemas inalámbricos, incluyen técnicas Codificación de Bloque Espacio-Tiempo (STBC) y técnicas de múltiples elementos de antenas [4].

Alamouti et al [1], propuso un esquema de codificación de bloque espacio-tiempo (STBC) el cual se ha propuesto en varios estándares para celulares. El esquema de este código, propone diversidad espacial, por medio de varias antenas y el uso de un apropiado codificador de canal, de esta manera se puede obtener ganancia de codificación uniendo las ventajas de las técnicas mencionadas. Dicho esquema emplea múltiples antenas, o arreglos de antenas en donde transmisores y receptores permiten la multiplexión de datos en espacio y tiempo, por lo tanto se incrementa la velocidad de la transmisión.

En el área de las comunicaciones inalámbricas, generalmente se utilizan mas de una antena para la transmisión, esto con el fin de ofrecer diversidad espacial y evitar perder información debido a las multitrayectorias. Sin embargo, estudios recientes en teoría de la información, muestran que el fenómeno de la multitrayectoria, es decir, el que haya replicas de una señal puede ser una ventaja, es por esto que se propone utilizar múltiples antenas en la transmisión y recepción.

Por ejemplo en [1], se desarrolló un esquema para transmitir información usando dos antenas transmisoras y un algoritmo simple de decodificación para una sola antena

receptora, este algoritmo puede generalizarse a un número arbitrario de antenas receptoras.

En el trabajo de Tarokh et. al. [9], se propone una generalización del esquema propuesto en [1] para un número arbitrario de antenas transmisoras, definiendo el concepto de Codificación de Bloque Espacio Tiempo. En búsqueda de mejorar el desempeño de transmitir información sobre canales con desvanecimiento multitrayectoria, en [4], se diseña una nueva clase de códigos Recursivo Convolutivo Espacio Tiempo, los cuales utilizan dos estados en un arreglo paralelo de arquitectura simple, lo que permite realizar concatenaciones en serie con otros códigos de canal para incrementar la tasa de transferencia y mejorar la calidad de servicio de la información.

Sin embargo, no se ha hecho mucho trabajo en el desempeño de esquemas de diversidad en transmisión aplicado en sistemas DAB en un entorno multitrayectoria, excepto en [4] donde presentan un sistema de Radiodifusión de Audio Digital que utiliza el sistema de Codificación Espacio Tiempo de los laboratorios Bell (BLAST) para lograr un incremento en la tasa de transmisión.

## **Capítulo 3.**

En capítulo describe los sistemas de radiodifusión digital propuestos por diversas organizaciones mundiales.

### **3.1 INTRODUCCION.**

La calidad en la transmisión y recepción en los sistemas de radio comercial actual, dependen para su buen desempeño de diversos factores, tales como; el estado del tiempo, la hora del día, los obstáculos en el entorno, el tipo de antena, ruido ambiental, interferencias provocadas por el encendido de electrodomésticos y automóviles, etc. Se necesita la sintonización constante para captar las diferentes frecuencias además, la calidad en el sonido no es muy buena, el radioescucha desea que la fidelidad del sonido sea excelente, es decir, que sea semejante a la de un disco compacto (CD) [10].

Los sistemas actuales de radiodifusión, no son del todo eficientes. Por ejemplo los sistemas FM utilizan demasiado espacio en el espectro, el ancho de banda es muy grande, por esta razón se utilizan en frecuencias muy altas (más de 300 KHz). Otro problema de FM es la complejidad de los circuitos empleados para modular y remodular. Para AM, se presentan otros inconvenientes como la baja inmunidad que presentan ante la presencia de ruido y el bajo efecto de captura. Finalmente el transmisor AM, presenta poca eficiencia, debido al gran tamaño de sus amplificadores [2].

Para solucionar los problemas antes mencionados, se propone que la radio comercial actual emigre a sistemas digitales. Resulta ser muy visionario que los equipos digitales desplacen a los analógicos pero para esto se trabaja en los sistemas llamados DAB (Digital Audio Broadcasting) o Radiodifusión de Audio Digital, o también conocidos como sistemas DRB (Digital Radio Broadcasting). Este sistema es vía terrestre y ofrece todas las bondades del audio digital. Esto significa que la transmisión y la recepción de sonido se procesan utilizando tecnología similar a la que se utiliza en los reproductores de discos compactos. Esta ofrece una recepción libre de interferencia y

alta calidad de sonido, una tecnología amigable y un sin limite de beneficios, como por ejemplo mas estaciones, datos adicionales como titulo de las canciones, nombres de los artistas o personajes entrevistados, reporte de tiempo, de la bolsa de valores, del trafico, ademas de multimedia, donde se pretende el radioescucha pueda bajar su musica favorita (compra por internet) [11].

Esta tecnología puede ser terrestre (DAB, DRS) o via satelite (SDARS). En este trabajo nos enfocaremos a los sistemas terrestres. Se puede obtener el servicio solamente con una antena. La calidad de los programa de radio transmitidos es como la que ofrece un CD inclusive en un auto en movimiento, sin ninguna interferencia o distorsión de la señal. DAB es una tecnología para esta época de las comunicaciones multimedia móviles. Como se menciona anteriormente, no solamente se transmite señales de audio, sino también imágenes y datos. Se trabaja también en la transmisión de video.

El tema de Radiodifusión Digital se convierte en un tema de investigación para muchas compañías, a principios de la década de los noventa [12], compañías como la BBC de Londres (British Broadcasting Corporation) apostaron por el sistema DAB (Digital Audio Broadcasting) [13], ya que ofrece ventajas con respecto a la radiodifusión convencional.

La primera de ellas es que aprovecha mejor el espectro de frecuencias, es decir que puede ofrecer más servicios en el mismo ancho de banda en el que lo haría un sistema AM o FM. En segundo lugar la señal transmitida es más resistente a interferencia o el efecto multitrayectoria. En tercer lugar, DAB puede proveer una calidad de audio superior (Bit Error Rate  $<10^{-5}$ , velocidades mayores a 1 Mbps. En cuarto lugar, se esta trabajando en equipos mas sencillos y amigables. Por ultimo, DAB no esta limitado a señales de audio, sino que también puede proveer otro tipo de servicios, como por ejemplo imágenes, texto e incluso video.

Existen varios proyectos que hacen de los sistemas DAB accesibles al público. La comunidad europea trabaja en un estándar para radiodifusión digital llamado EUREKA-

147. Este nombre fue adoptado en el año de 1995 [12]. Esta diseñado para operar en varias bandas de frecuencias, por lo general en la banda L (1500 MHz). Se conoce también como la “nueva banda de radio”. Esta banda de frecuencia fue asignada en 1992 especialmente para el nuevo servicio de radio digital. Fue autorizada por la Conferencia Administrativa Mundial de Radio (WARC).

En Estados Unidos, desde 1994, existe otra propuesta para radio digital. Esta tecnología es llamada IBOC (in-band, on-channel). Esta permite que estaciones existentes emigren sin incidentes al formato digital sin necesidad de conseguir nuevas licencias para operar (otorgadas por la FCC) o descontinuar abruptamente las transmisiones analógicas. Las bandas de trabajo son las de AM (510-1710 KHz) y FM (88-108 MHz). Estos sistemas de radio digital terrestre serán introducidos primeramente como sistemas híbridos (hybrid IBOC) en donde la transmisión digital se añadirá a la existente analógica. Después estos sistemas evolucionarán, hasta ser completamente independientes.

Existe un tercer proyecto, también europeo, el cual es conocido como Digital Radio Mondiale. El DRM es un sistema creado por el consorcio del mismo nombre, cuya misión es establecer un sistema digital para las bandas de radiodifusión con modulación de amplitud, Onda Larga (ondas kilométricas), Onda Media (ondas hectométricas) y Onda Corta (ondas decamétricas), por debajo de 30 MHz. El 16 de junio de 2003 se iniciaron las primeras emisiones regulares. El sistema ha sido aprobado en el año 2003 por la UIT (recomendación ITU-R BS 1514) y recomendado por ese organismo como único estándar mundial en las bandas entre 3 y 30 MHz (Onda Corta). También ha sido estandarizado por la norma IEC-62272-1 y por la ETSI ES-201980.

Los sistemas antes mencionados, fueron diseñados dependiendo de las necesidades del país donde fueron desarrollados. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) a establecido las características que la radio digital debe de cumplir, las cuales se mencionan a continuación [14]:

1. La calidad de sonido debe ser similar a la de un disco compacto (CD, velocidad de muestreo de 44.1 KHz.).
2. Eliminar interferencias por el efecto multitrayectoria.
3. Proporcionar un servicio a receptores portátiles, fijos y en movimiento.
4. Utilizar eficientemente el espectro radioeléctrico.
5. Capacidad para transmitir datos.

En general, los sistemas digitales de radiodifusión para su transmisión necesitan de dos procesos básicos: la codificación de fuente y la codificación de canal. En la codificación de canal, la señal de audio se convierte en digital, normalmente con una reducción de la velocidad binaria conforme a las características de la señal. En este proceso también se multiplexa la señal de audio con otras señales de datos, que juntas forman la señal a transmitir.

Cada uno de los sistemas propuestos que han sido mencionados, posee su propio codificador de fuente, según se explicará más adelante. Con lo que respecta a la codificación de canal, los datos se codifican de nuevo esta vez para incrementar su robustez y adaptarse al medio de transmisión, los datos codificados se convierten en una señal de radiofrecuencia para su transmisión. Como en la codificación de fuente, cada sistema emplea diversas técnicas para lograr este proceso, que serán mencionadas en la sección correspondiente.

Por último, es importante señalar que estos sistemas que actualmente están en prueba, no pueden ser implementados en cualquier país. Dependen de las posibilidades que éstos tengan hablando en términos de disponibilidad de espectro. Es decir, si su espectro está saturado, es imposible utilizar un sistema que utiliza una banda específica (como Eureka-147). Si este es el problema, la solución será un sistema con reuso de espectro (IBOC).

## **3.2 PROYECTOS DE RADIO DIGITAL TERRESTRES.**

En esta sección se mencionaran las principales características de los sistemas de radiodifusión terrestres, el proyecto de la comunidad europea denominado EUREKA-147, el de los Estados Unidos conocido como IBOC, y un tercer sistema también por parte de Europa llamado Digital Radio Mondiale (DRM). Trataremos ampliamente el primer sistema, ya que es parte de este proyecto, los demás solamente se hará una breve descripción.

### **3.2.1 Proyecto IBOC.**

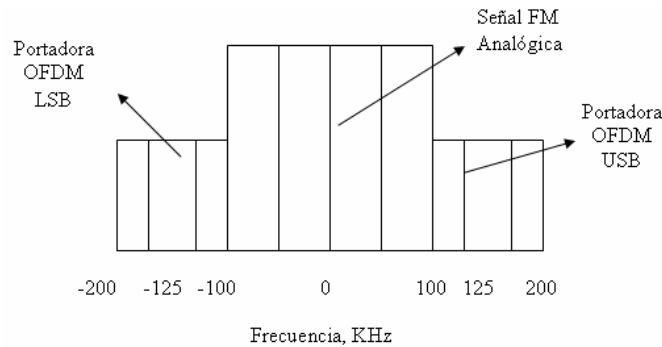
En los Estados Unidos se está trabajando con un proyecto conocido como IBOC (in band-on channel). Este proyecto es de la National Association of Broadcasters de Estados Unidos e inició a mediados de los noventa. [15]. Debido a que este país no cuenta con espectro disponible por debajo de los 3 GHz, se propone utilizar las bandas de AM y FM existentes. Este proyecto IBOC DAB tiene como ventaja que podrá trabajar con las antenas y transmisores que se tienen actualmente. En los últimos años a este proyecto se le ha llamado también HD Radio (High Definition Radio).

Estados Unidos desarrolló cuatro sistemas IBOC DAB. Tres de estos sistemas están designados para coexistir con la banda de FM, y solamente uno con la banda de AM. Para la banda de FM se tiene el sistema desarrollado por la compañía llamada AMATI Communications en sociedad con AT&T. Otros dos proyectos son de USA Digital Radio, un consorcio de tres compañías estadounidenses. Este mismo consorcio desarrolló el sistema IBOC DAB para la banda de AM.

En Marzo de 1993, la Asociación Nacional de Radiodifusores y la Asociación de Industrias Electrónicas (EIA), se unieron para aplicar las pruebas pertinentes a estos sistemas en los Estados Unidos [12]. El Comité Nacional de Sistemas de Radio (NRSC) también se unió a esta serie de pruebas. La NRSC desarrolló un plan y procedimientos para llevar a cabo las pruebas de laboratorio para IBOC DAB. Se probó el desempeño de

estos sistemas en presencia de ruido, de interferencia co-canal o de un canal adyacente. También se simuló para un sistema móvil y que se encontrara en distintos ambientes en los que pudiera darse la multitrayectoria.

**IBOC FM.** En este sistema la información es transmitida en un nivel de potencia menor (alrededor de los 25 dB) que la señal FM analógica que la transporta. La transmisión digital se realiza en subbandas en ambos lados de la señal analógica. La señal compuesta es de 400 KHz con la portadora FM en el medio. Las bandas digitales laterales son de 70 KHz . (Fig 3)



**Fig. 3.** Espectro de frecuencia IBOC en FM.

La compañía LDR (Lucent Digital Radio) diseñó el sistema híbrido FM con el propósito específico de proveer audio con calidad de sonido igual a la de un disco compacto, manejo de datos, una resistencia a la degradación del canal y una máxima cobertura aun bajo una variedad de condiciones del canal FM.

El sistema FM IBOC de LDR está compuesto por tres componentes básicos: el codificador de fuente, un módem (modulador y demodulador), un modulo realzar la señal, y un codificador de canal.

El sistema está diseñado para que haya compatibilidad con la FM actual, así como para que la transición del sistema FM análogo al FM híbrido y al FM totalmente digital,

sea gradual. Además, este sistema ha sido diseñado para transmitir a pesar de la presencia de condiciones adversas.

En el sistema FM IBOC totalmente digital, se reemplaza la señal portadora FM por una señal digital OFDM teniendo está cuatro subbandas, utilizando una potencia de 10 dB menor que la requerida por una señal FM. Estas bandas ocupan el espectro de frecuencias que van desde los -100 KHz a los +100KHz. El nivel inferior izquierdo y las subbandas de la derecha permanecen en el mismo nivel, pero ahora ocupan el espectro que va desde los -200 KHz a los -100 KHz y de los 100 a los 200 KHz. La tasa de transferencia de este sistema es de 300 Kbps en el centro de la banda, los cuales complementan los 128 kbps disponibles en las bandas laterales. Esto claramente soportará sonido envolvente (sorrround sound) el cual necesita 280 Kbps. La potencia adicional podrá extenderse en el rango de la señal digital al umbral de la actual señal de FM audible en un canal sin presencia de ruido.

El sistema digital tiene las siguientes características:

1. Alta eficiencia de espectro.
2. Operación dentro del actual contorno protegido y dentro de la mascara de emisión de la FCC.
3. Libertad de los radiodifusores para la transición totalmente digital en cualquier momento.
4. Rango que va más allá del canal audible de FM.
5. Aumento de la resistencia de los daños del canal.

El sistema comprende los siguientes elementos que se pueden apreciar en la Figura 4:

Codificador de audio.

Primeramente, la señal se muestrea a velocidades muy altas por un convertidor de alta calidad y resolución. Después, la señal muestreada se procesa y codifica en un

procesador de señal digital. El codificador de LDR llamado Codificador Perceptual de Audio (PAC) se utiliza para codificar audio y reducir la tasa de datos 11 veces menos que la de un fuente estándar de un disco compacto a una tasa de 1.4 Mbps. La implementación del sistema FM híbrido para un algoritmo PAC produce cuatro cadenas de 32 kbps para una tasa de audio total de 128 Kbps. Este concepto esta patentado, y es llamado multi-streaming, utiliza el tiempo y la diversidad de frecuencia, y además brinda resistencia a los daños que pueda sufrir el canal. La implementación de FM utiliza una versión multi descriptiva del codificador PAC. Cada una de estas cadenas transporta suficiente información para reproducir audio con calidad y las cadenas también pueden recombinarse en incrementos de 32 kbps para reconstruir una señal original de audio a 128 kbps. En la implementación de FM totalmente digital, el codificador PAC, puede implementar una capacidad de sonido sorround en aproximadamente 280 kbps.

El modem.

Se usa la multiplexión OFDM para cada señal portadora que ha sido modulada con QPSK, esto para proporcionar un salida digital que pueda soportar la tasa de datos que se necesita para tener calidad de disco compacto, y su vez pueda recibirse aunque exista movilidad (un receptor no fijo). La técnica de multiplexión OFDM permite el máximo uso del ancho de banda con interferencia mínima con el canal adyacente. El sistema FM totalmente digital puede ocupar toda la banda FM, por lo que tiene mayor tasa de transimisión.

El nivel de potencia de una señal totalmente digital, puede ser 12 dB más grande que el de una señal híbrida. Además, el espectro, que va de los -100 KHz a los +100 KHz, puede ser dividido en cuatro cadenas permitiendo el uso de multi-streaming.

#### Codificación de canal.

Los flujos de salida del procesador PAC son codificados para la transmisión, con un poderoso codificador con corrección de error y un entrelazador. Este da lugar a un

sistema que opera con un bajo de  $E_b/N_0$  lo cual es lo mas avanzado en la tecnología de acuerdo con LDR. Este bajo  $E_b/N_0$  combinado con un alto nivel de compresión (proporcionado por un PAC) da como resultado un sistema que puede operar a una pequeña razón de portadora a ruido.

Todas estas técnicas, en combinación, dan como resultado una recepción con alta fidelidad a pesar de las más adversas condiciones. La metodología del diseño enfatiza la aceptación mayor de trade off para el uso eficiente del espectro y una mejor operación en presencia de ruidos.

Resalta en el sistema el que puede proporcionar un número de trayectos para enviar datos auxiliares a los receptores para proveer servicios tales como: radiodifusión de emergencia, publicidad y otras operaciones definidas por los servicios de datos. Las tasas de datos que se maneja están en el rango de los 8 kbps a los 128 kpbs dependiendo de tradeoff de las tasas de audio y los requisitos para corrección de datos.

#### Equipo para la transmisión

El transmisor FM híbrido consiste en dos transmisores, el que se utiliza para la radio FM existente y el transmisor IBOC. Las salidas de ambos se combinan después de procesarse en amplificadores de alta potencia. El transmisor FM es estándar. El procesamiento del audio, así como la modulación se realiza utilizando equipo disponible en el mercado. Las señales provenientes de ambos transmisores se combinan en una sola señal que utiliza el mismo cableado y antena.

#### Diseño del receptor.

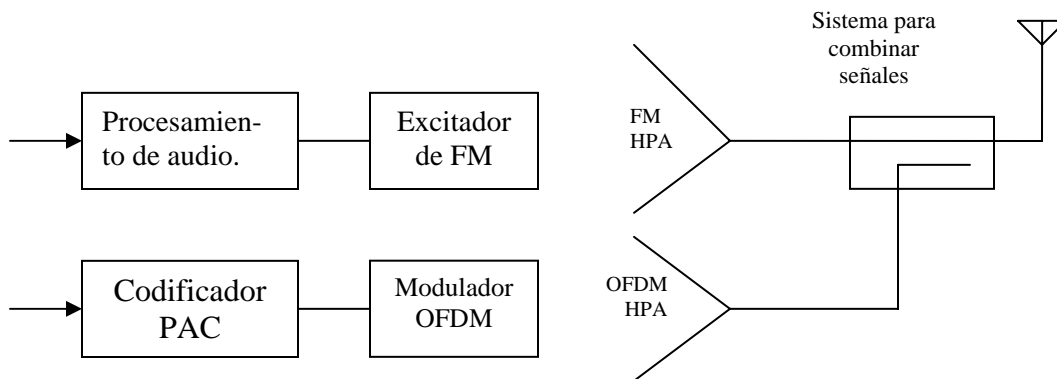
El receptor IBOC incluye dos subsistemas: el primero es un amplificador de entrada RF, y el segundo esta integrado por un procesador IBOC. El procesador IBOC incluye un procesador digital de señal IBOC que muestrea y procesa la señal FM híbrida,

y un decodificador de audio PAC que descomprime y combina los flujos de audio recibidos.

El receptor de RF ocupa distintos requisitos que el receptor FM común. La principal diferencia es un circuito de control automático de ganancia y antiguo receptor de FM tiene un amplificador de ganancia constante.

El procesador IBOC actúa para cancelar interferencia, de la señal demodulada OFDM, con corrección de errores y de datos demultiplexados. La señal digital demodulada se alimenta al decodificador PAC y a circuitos de interfase. Además, el procesador de señal digital demodula y procesa la señal FM. Debido a las virtudes del procesamiento digital de señales, da como resultado en una calidad mucho mejor de la señal FM. El procesador digital de señal también desempeña otras funciones de control como el control de ganancia del receptor.

Finalmente, el PAC decodifica y combina flujos de audio para producir sonido cercanos a la calidad digital de un CD.



**Fig.4** Sistema IBOC híbrido.

### 3.2.2 Digital Radio Mondiale (DRM)

Este es un nuevo estandar para radio digital, basado en la multiplexion por frecuencias ortogonales (OFDM), para rangos de onda larga, media y corta. Esta diseñado para utilizar las mismas frecuencias que los sistemas análogos [16].

Codificador de fuente.

En la codificación de la fuente el sistema ofrece tres opciones:

- Codificación de audio AAC (*Advanced Audio Coding*) para radiodifusión en mono o estéreo, con protección frente a errores. Por ejemplo, para OM se puede utilizar la configuración estándar de 23'6 Kbit/s ó 10 Kbit/s para OC.
- Codificación de voz CELP (*Code Excited Linear Prediction*) para radiodifusión en mono, cuando se requiere baja velocidad binaria o alta protección frente a errores.
- Codificación de voz HVXC (*Harmonic Vector eXcitation Coding*) cuando se requiere muy baja velocidad binaria y protección frente a errores.

Además, con cualquiera de estas opciones puede utilizarse un método para la reconstrucción de las bandas altas (SBR, *Spectral BandReplication*), con el fin de mejorar la calidad percibida del audio,utilizando de forma dinámica el contenido espectral de la información en la banda baja, para simular en la recepción la información de la banda alta, eliminada previamente a la transmisión.

Multiplexor.

El multiplexor transporta tres componentes, que juntos suministran la información necesaria para que el receptor sincronice la señal y determine qué parámetros se han utilizado en la codificación para, de esta forma, poder decodificar los canales de audio y datos contenidos en el múltiplex. Estos tres componentes son: audio y

datos (MSC, Main Service Channel) , canal de acceso rapido (FAC), y el canal de descripcion de servicio (SDC, Service Description).

Modulador.

El sistema DRM utiliza modulaci3n COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division M3ltiplex*), es decir, una codificaci3n que se inserta en un m3ltiplex por divisi3n de frecuencia, con la particularidad de que estas frecuencias est3n uniformemente espaciadas de forma que son ortogonales, para transmitir los datos del m3ltiplex (MSC, FAC y SDC) descrito anteriormente. Se compone de una combinaci3n de t3cnicas que combaten los efectos adversos de la propagaci3n que se producen en la bandas de OM, OL y OC.

El sistema OFDM utiliza un gran n3mero de subportadoras, moduladas individualmente, espaciadas en frecuencia de forma uniforme, que transportan la informaci3n. En el sistema DRM el n3mero de subportadoras var3a desde 88 a 458, dependiendo de modo y del ancho de banda ocupado. Las subportadoras se modulan con modulaci3n de amplitud en cuadratura (QAM).

Codificaci3n de canal.

Los niveles de protecci3n frente a errores se consiguen mediante una codificaci3n convolucional que introduce redundancia en la se3al.

### 3.2.3 EUREKA-147.

Existe una serie de proyectos los cuales están patrocinados por varios países de Europa, estos proyectos se engloban con el nombre de EUREKA [17]. Para el área de radiodifusión digital se tiene un proyecto, el numero 147, de ahí el nombre EUREKA-147. En este proyecto se propone desarrollar un nuevo sistema de transmisión digital, el cual ha sido reconocido por la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) como un estándar mundial. El diagrama a bloque se muestra en la Fig. 5.

El proyecto EUREKA 147 DAB es un sistema de radiodifusión muy confiable, diseñado específicamente para una amplia cobertura en sistemas móviles, portables y fijos, usando simplemente antenas no direccionables. La especificación EN 300 401 de la ETSI (European Telecommunications Standard Institute) especifica la señal DAB transmitida [18].

Existen todavía algunos inconvenientes para su implementación total por ejemplo:

- En algunos países, carencia de rango de frecuencias para su transmisión.
- Los costos de inversión y desarrollo de la tecnología.
- La búsqueda de proveedores para los servicios de datos.
- Aun no se definen los proveedores de equipo para la transmisión y recepción, ni los proveedores de servicio.

Sin embargo, el proyecto Eureka ofrece abundantes beneficios sobre la radio convencional, incluso sobre los servicios de radio digital vía satélite.

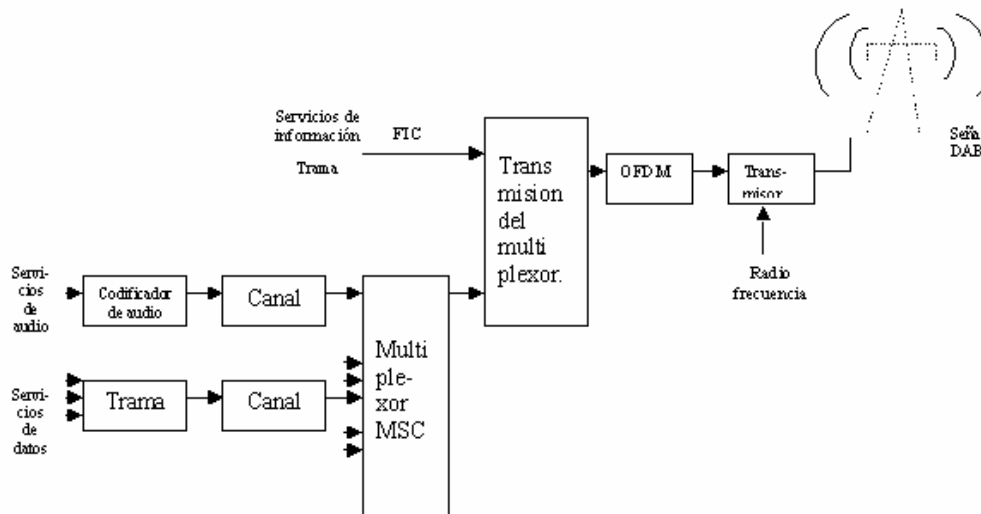
A continuación se muestran estas ventajas:

- Calidad superior de audio.
- Utilidad, este termino es para señalar que el sistema no necesita sintonizar frecuencia como lo hacemos normalmente en los receptores análogos, sino simplemente seleccionar las estaciones favoritas de un menú de texto.

- Mejores condiciones en la recepción. El sistema cubre una amplia área geográfica, incluso sin perder la señal. Por ejemplo un automovilista puede recibir la misma estación a lo largo de todo un país, sin resintonizar y con la misma calidad.

El sistema ofrece los siguientes servicios:

- Audio (servicio principal): Música, radionovelas, noticias, información, etc. La recepción puede ser monofónica o estereofónica.
- Datos de programa asociados (PAD): el sistema despliega en una pantalla de LCD información en forma de texto, que complementa el audio.
- Servicios informativos: Servicios que se ofrecen de otras fuentes distintas a la radiodifusora, por ejemplo: el clima, tráfico, finanzas, etc.
- Servicio de datos: Se puede mandar información específica al radioescucha, ya que cada receptor tiene una dirección exclusiva.
- Imágenes fijas o en movimiento.



**Fig. 5.** Diagrama a bloques de DAB.

EUREKA 147 comprende los siguientes elementos:

**a) Codificación de audio MUSICAM.**

MUSICAM es el acrónimo de: Masking patern Universal Sub-band Integrated Coding And Multiplexing. Emplea la técnica de codificación psicoacústica, tal como marca el codificador de audio del nivel II de MPEG-2. Este codificador se basa en las características de funcionamiento del sistema auditivo humano. Básicamente el sistema solamente codifica las señales de audio y sus componentes que el oído es capaz de percibir, desechando información, que según el modelo psicoacústico el oído humano no percibe.

MUSICAM puede comprimir señales digitales de audio en el rango de los 8 kbits/s a los 384 kbits/s, a una tasa de muestreo de 48 kHz, o si el servicio es de calidad baja a una velocidad de 24 kHz. También es capaz de distribuir señales de audio con calidad comparable a la de un disco compacto, utilizando una tasa de datos de 192 kbits/s o más baja para servicios estéreo. La elección de la opción de codificación dependerá de la calidad con la cual se quiera transmitir la señal, y a su vez también al tipo de servicio a transmitir, como por ejemplo si se trata de música o voz.

**b) Multiplexión y codificación de la transmisión.**

Los datos que se van a transmitir, se combinan en una única trama.

La trama DAB, esta compuesta por tres elementos:

- El canal de sincronía, que transporta información concerniente a la frecuencia y al tiempo. Esto para que pueda lograrse la sincronía entre el receptor y la señal DAB, y esta última se pueda decodificar.
- El canal de información rápido (Fast Information Channel FIC), transporta la información que describe como está constituida la trama enviada, y como distinguir información de cada uno de los servicios individuales.

- Canal de servicio principal (Main Service Channel MSC). Contiene tramas de audio o paquetes de datos, que corresponden a cada uno de los diferentes servicios incluidos en la trama.

Para mejorar la protección contra errores, se emplea la técnica de corrección adelantada de error utilizando códigos convolutivos (convolutional forward error correction FCC), un entrelazador de tiempo y otro de frecuencia. La velocidad de datos que alcanza el sistema EUREKA es de aproximadamente 3 Mbps, del cual 2.3 Mbps son ocupados por el canal principal, ya que este lleva las tramas de audio o paquetes de datos correspondientes a los diferentes servicios que se ofrecen.

### **c) Modulación COFDM.**

DAB utiliza el esquema para modulación digital de multiportadora espectralmente eficiente, llamada multiplexión por división de códigos de frecuencias ortogonales (COFDM). En lugar de utilizar una única portadora digitalmente modulada a una tasa alta de símbolos, COFDM utiliza muchas portadoras (arriba de 1536) separadas por 1 KHz, para el caso DAB. Cada una de estas portadoras se modula con DQPSK (Differential Encoded Quadrature Phase-Shift Keying). Estas portadoras ocupan aproximadamente 1.54 MHz del espectro. Por lo tanto, la tasa de símbolos de cada portadora es mas baja, y el período de símbolo es mas largo y esto ofrece una protección al efecto de multitrayectoria.

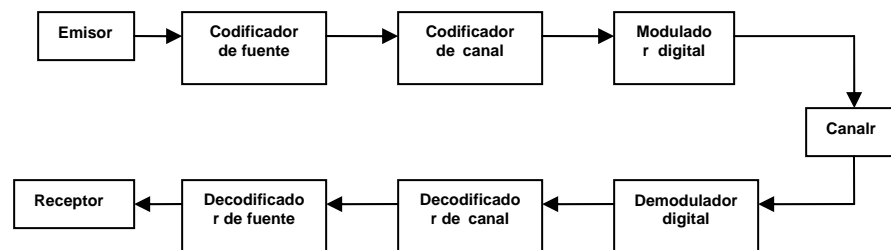
## Capítulo 4.

### CODIFICACIÓN DE CANAL.

#### 4.1 Introducción.

Un sistema de comunicaciones tiene como objetivo principal el transmitir información (audio, video, datos) desde una fuente o emisor hasta un destino o receptor a través de un canal.

El esquema general de un sistema de un sistema de comunicaciones es el siguiente puede apreciarse en la Figura 6:



**Fig. 6** Diagrama general de un sistema de comunicación.

El objetivo principal del sistema de comunicaciones es el de que la información proveniente de la fuente llegue sin errores o al menos con un bajo número de ellos al destino, es decir si busca que el sistema tenga una baja probabilidad de error.

En general, la probabilidad de error en un sistema de comunicaciones esta en función de las características del código, los tipos de formas de onda utilizadas para transmitir la información sobre el canal, la potencia del transmisor, las características del canal (cantidad de ruido, naturaleza de las interferencias, etc.) y del método de demodulación y decodificación. Es decir cada uno de los elementos (Fig. 4) tiene efecto en el desempeño del sistema. La diferencia entre la señal original y la señal reconstruida es una medida de la distorsión inducida por el sistema de comunicación digital.

El objetivo más importante del diseño del sistema de comunicaciones será la minimización de la probabilidad del error en esta secuencia de símbolos. [19]

Sin lugar a duda la presencia de ruido en el sistema es el principal factor que puede provocar errores en la información. El ruido es un fenómeno aleatorio el cual no se puede controlar.

Durante la transmisión, la presencia de éste en el canal es inevitable. Por esta razón, antes de enviar los símbolos codificados a través del canal, se realiza una nueva codificación orientada a que el receptor pueda detectar y corregir los errores producidos en el canal. En la recepción se realiza un proceso inverso. Estos procedimientos o técnicas tienen la función de introducir redundancia a una secuencia binaria de información, esto con el propósito de minimizar o eliminar los efectos provocados por el ruido y la interferencia que pueden presentarse durante la transmisión de la señal a través de un canal.

La radio, es uno de los sistemas de comunicaciones mas populares, actualmente se trabaja emigrar de la tecnología analógica a digital, por lo tanto, como se mencionó anteriormente la presencia de ruido en el canal es un factor para aumentar la probabilidad del error.

La función de un codificador de canal discreto es la de introducir redundancia a una secuencia binaria de información, esto con el propósito de minimizar o eliminar los efectos provocados por el ruido y la interferencia que pueden presentarse durante la transmisión de la señal a través de un canal.

El objetivo es el de reducir la probabilidad del error (PB), o reducir el  $E_b/N_0$  necesario, utilizando un ancho de banda mayor al requerido.

Los primeros trabajos en el área de las comunicaciones digitales y específicamente en codificación de canal fueron los de Shannon (1948), Hamming (1950) y Golay (1949). Estos fueron los primeros trabajos que probaron el desempeño de los códigos de canal, después se desarrollaron otros como por ejemplo los de Muller (1954) y

Reed (1954). Durante el periodo de 1960-1970, se dieron importantes avances, como la aparición de los códigos Reed-Salomon y los BCH (Bose-Chaudhuri).

Paralelamente al desarrollo de los códigos mencionados (códigos de bloque), aparecen las investigaciones sobre códigos convolutivos los cuales fueron inventados por Elías (1955). Estos códigos tenían una desventaja, se tenía problemas con la decodificación. Durante esta década, la de los 60's se trabajo con el algoritmo de decodificación, hasta llegar al algoritmo de Viterbi (1967).

En la década de los setenta, la principal contribución fue el trabajo de Ungerboeck y Csajka (1976) sobre codificación sobre canales de ancho de banda obligados. Hasta la fecha no han cesado las investigaciones en esta área. [19]

La codificación de canal se divide en dos áreas: la codificación de formas de onda y en la de secuencias estructuradas. También ofrece tiene la capacidad de la corrección de errores, existen dos técnicas utilizadas:

- Detección de errores o corrección hacia atrás o ARQ (Automatic Repeat Request): Utiliza bits de paridad (bits redundantes se agregan a la información), Cuando el receptor detecta un error solicita al emisor la repetición del bloque de datos transmitido. El emisor retransmitirá los datos tantas veces como sea necesario hasta que los datos se reciban sin errores.
- Corrección de errores o corrección hacia delante o FEC(Forward Error Correction): Se basa en el uso de códigos autocorrectores que permiten la corrección de errores en el receptor

Dentro de la codificación de canal se encuentra un tipo de códigos conocidos como de bloque, en éstos los datos de la fuente se segmentan en bloques de datos de  $k$  bits donde cada bloque representa uno de  $2^k$  mensajes distintos. El codificador transforma cada bloque de datos  $k$ -bit en un bloque más grande de  $n$  bits. Los bits  $(n - k)$  son agregados a cada bloque de datos, no aportan nueva información. Los códigos se

especifican como  $(n,k)$ . La tasa de codificación es  $k/n$ . Existen varios códigos que pertenecen a esta categoría, como lo son los códigos de paridad, lineales, lineales sistemáticos, cíclicos, Hamming y Reed Salomon.

Otra categoría son los códigos convolutivos, Se diferencian de los códigos de bloque en su forma estructural y las propiedades para corregir errores. Los códigos de bloque suelen tener limitada la capacidad de corrección de errores alrededor de 1 o 2 símbolos erróneos por palabra de código. Estos códigos son buenos para utilizar en canales con baja probabilidad de error. Trabajan con cadenas de datos en forma secuencial. No requieren un bloque completo para procesarlo. Los códigos convolutivos son adecuados para usar sobre canales con mucho ruido (alta probabilidad de error).

Un código convolutivo queda especificado por tres parámetros  $(n,k,K)$ :

**n** es el número de bits de entrada.

**k** es el número de bits codificados.

**K** es la memoria del código

## **4. 2 Códigos espacio-tiempo.**

### 4.2.1 Definiciones.

En este tipo de códigos se explota la diversidad espacial y temporal. Antes de introducirnos de lleno al tema de codificación espacio tiempo es conveniente definir el término diversidad. La diversidad es una técnica muy utilizada para disminuir la probabilidad de error en un sistema de comunicaciones inalámbricas, provocada por el desvanecimiento del tipo Rayleigh. El concepto de diversidad, en un principio se aplicaba solamente a la etapa de recepción, consiste en habilitar al receptor para que este sea capaz de recibir en cualquier momento más de una señal, ya es casi imposible que todas las señales recibidas estén severamente dañadas por el desvanecimiento, al menos una de ellas, contendrá la información esperada. Por lo tanto, el receptor elige la señal

con mas potencia o hace una combinación de varias de la seña le que se reciben. Existen cinco categorías de técnicas de diversidad [20]:

1.-Diversidad espacial. Se logra utilizando más de una antena receptora. El espacio entre las antenas se elige de tal forma que las seña les recibidas han experimentado desvanecimientos no correlacionado. A esta técnica se le llama diversidad microscópica. Otra manera de obtener diversidad espacial es la selección de diferentes estaciones base. El sombreado causado por las variaciones de terreno y el entorno natural provoca desvanecimiento a gran escala. Si se selecciona la estación base adecuada, el móvil mejora la razón de seña l a ruido para en el enlace de subida (telefonía celular).

2.- Diversidad en frecuencia. Se logra transmitiendo la misma seña l con portadora distinta. Estas seña les estas separadas al menos por el ancho de banda coherente del canal. Así que las seña les no experimentan el mismo grado de desvanecimiento.

3.- Diversidad en tiempo. Las seña les se transmiten por ranuras de tiempo separadas por al menos el tiempo de coherencia del canal. Por ejemplo, algunos códigos transmiten un símbolo en varias ranuras de tiempo. Algunos otros tipos de códigos con control de error codifican la secuencia de bits en una secuencia mas larga. Este es otro tipo de diversidad en tiempo ya que la información se distribuye por todo el código y si parte de ella se borra, la información aun puede recuperarse. Usualmente su utiliza el entrelazado en combinación con los códigos de corrección de error.

Los códigos espacio-tiempo toman como base la técnica de máxima razón de combinación en el receptor (MRRC), esta utiliza dos receptores y una antena transmisora. Siavash M. Alamouti, hace algunas modificaciones a esta técnica, aplicando la diversidad en espacio tanto a las antenas receptoras como a las transmisoras [a simple transmit]. Esta técnica tiene como propósito emplear un simple esquema de transmisión con diversidad espacial el cual mejora la calidad de la seña l en el receptor, ya que para ella se utilizan dos antenas [1].

#### 4.2.2 Descripción de los códigos de bloque espacio-tiempo.

Un código de bloque espacio-tiempo se obtiene a partir de una relación entre la señal original a transmitir y replicas de dicha señal creadas artificialmente en el transmisor para enviar la información con diversidad a través de varios canales [9]. Para esto se define una matriz de transmisión de dimensiones  $n \times p$ , donde  $p$  es el número de antenas transmisoras y  $n$  representa el número de ranuras de tiempo usadas para transmitir  $k$  símbolos.

El valor de cada elemento de la matriz se obtiene a partir de la combinación lineal de los  $k$  símbolos de entrada  $x_1, x_2, \dots, x_k$  y sus conjugados. Donde  $x_i \forall i = 1, 2, \dots, k$  representan la señal portadora de la información. En una constelación de  $2^b$  puntos,  $b$  es el número de dígitos binarios usados para representar un símbolo  $x_i$ . Así, un bloque de  $k \times b$  dígitos binarios se introduce al codificador en un instante de tiempo, de aquí el término Bloque. Una forma general de representar la matriz de transmisión de un Código de Bloque Espacio-Tiempo esta dada por:

$$G = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{21} & \dots & g_{p1} \\ g_{12} & g_{22} & \dots & g_{p2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ g_{1n} & g_{2n} & \cdot & g_{pn} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

donde los elementos  $g_{ij}$  representan la combinación lineal de los símbolos  $x_1, x_2, \dots, x_k$  y sus conjugados. Las entradas  $g_{ij}$ , se transmiten simultáneamente por las antenas transmisoras  $1, \dots, p$  en cada ranura de tiempo  $j=1, \dots, n$ . Se puede observar en  $G$  que la codificación es realizada en espacio (múltiples antenas) y en tiempo (múltiples ranuras de tiempo).

Debido a que  $k$  símbolos se transmiten en  $n$  ranuras de tiempo, la tasa de codificación del Código de Bloque Espacio-Tiempo está dada por:

$$R = k/n \quad (2)$$

En una terminal receptora, podemos tener un número arbitrario de receptores  $q$ , obteniendo un orden de diversidad de  $p \times q$ .

### Códigos bloque Espacio-Tiempo basados en un doble transmisor

El código espacio tiempo propuesto por Alamouti en [10] es un esquema basado en un doble transmisor con  $p=2$ . La matriz de transmisión se define por;

$$G_2 = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ -\bar{x}_2 & \bar{x}_1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

donde  $x_1, x_2$  y sus conjugados son las señales portadoras.

En esta propuesta, la tasa de código es la unidad, ya que  $k=2$  y  $n=2$ . En la tabla 1 se muestra la codificación y el proceso de transmisión asociados.

Ranuras de tiempo, T	No. de Antenas p	
	Tx1	Tx2
1	$x_1$	$x_2$
2	$-\bar{x}_2$	$\bar{x}_1$

**Tabla 1.** Codificación y proceso de transmisión para códigos de bloque espacio-tiempo  $G_2$  de la ecuación 3.

Se puede observar que en cualquier instante de tiempo  $T$ , se transmiten dos señales de manera simultánea desde la antena Tx1 y Tx2. Para  $T=1$ , la señal  $x_1$  se transmite por la antena Tx1 y al mismo tiempo  $x_2$  se transmite por la antena Tx2. En la siguiente ranura de tiempo  $T=2$ , se transmitirán los conjugados de los símbolos  $x_1$  y  $x_2$ .

## Códigos espacio-tiempo $G_2$ con un receptor

Se tienen los canales  $h_1$  y  $h_2$  por los que se transmiten las señales portadoras  $x_1$ ,  $x_2$  y sus conjugados simultáneamente, a través de dos transmisores Tx1 y Tx2 como se observa en la figura 7. Se tiene que;

$$h_1 = h_1(T = 1) = h_1(T = 2) \quad (4)$$

$$h_2 = h_2(T = 1) = h_2(T = 2) \quad (5)$$

Los canales se modelan como distorsión multiplicativa compleja, la cual consiste en una respuesta en magnitud y fase dada por;

$$h_1 = |h_1|e^{j\theta_1} \quad (6)$$

$$h_2 = |h_2|e^{j\theta_2} \quad (7)$$

Donde  $|h_1|$  y  $|h_2|$  son las magnitudes del desvanecimiento y  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son los valores de fase.

En cada ranura de tiempo se añaden muestras de ruido,  $n_1$  y  $n_2$ , independientes en el receptor, por lo que la señal recibida se expresa como;

$$y_1 = h_1x_1 + h_2x_2 + n_1 \quad (8)$$

$$y_2 = -h_1\bar{x}_2 + h_2\bar{x}_1 + n_2 \quad (9)$$

donde  $y_1$  y  $y_2$  son la primer y segunda señal recibida respectivamente. Se puede observar que  $y_1$  consiste de las señales originales  $x_1$  y  $x_2$ , mientras que  $y_2$  está compuesta por los conjugados de  $x_1$  y  $x_2$ . Para determinar los símbolos transmitidos, se tiene que extraer la señal  $x_1$  y  $x_2$ . Asumiendo que se tiene una perfecta información del canal, por ejemplo, un

perfecto estimador de canal, las señales recibidas  $y_1$  y  $y_2$  pueden ser multiplicadas por el conjugado de las funciones de transferencia del canal complejo  $h_1$  y  $h_2$ , respectivamente, para remover los efectos del canal. Entonces las correspondientes señales son combinadas en la entrada del detector de máxima probabilidad de la siguiente manera;

$$\begin{aligned}\tilde{x}_1 &= \bar{h}_1 y_1 + h_2 \bar{y}_2 \\ \tilde{x}_1 &= \bar{h}_1 h_1 x_1 + \bar{h}_1 h_2 x_2 + \bar{h}_1 n_1 - h_2 \bar{h}_1 x_2 + h_2 \bar{h}_2 \bar{x}_1 + h_2 \bar{n}_2 \\ \tilde{x}_1 &= \left( |h_1|^2 + |h_2|^2 \right) x_1 + \bar{h}_1 n_1 + h_2 \bar{n}_2\end{aligned}\tag{10}$$

De manera similar para  $x_2$  se tiene que;

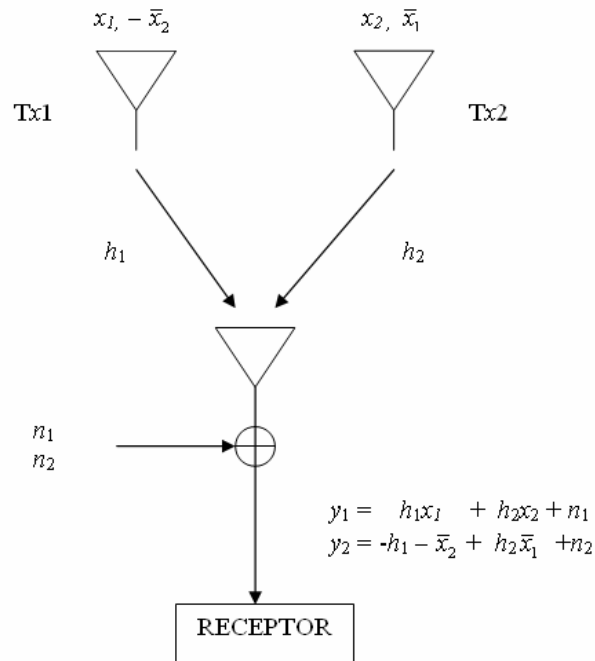
$$\begin{aligned}\tilde{x}_2 &= \bar{h}_2 y_1 - h_1 \bar{y}_2 \\ \tilde{x}_2 &= \bar{h}_2 h_1 x_1 + \bar{h}_2 h_2 x_2 + \bar{h}_2 n_1 + h_1 \bar{h}_1 x_2 - h_1 \bar{h}_2 x_1 - h_1 \bar{n}_2 \\ \tilde{x}_2 &= \left( |h_1|^2 + |h_2|^2 \right) x_2 + \bar{h}_2 n_1 - h_1 \bar{n}_2\end{aligned}\tag{11}$$

Tomando en cuenta la distancia Euclideana entre las señales combinadas  $\tilde{x}_1$ ,  $\tilde{x}_2$  y todos los posibles símbolos transmitidos, el mejor símbolo transmitido se determina por el detector de máxima probabilidad. La regla para la decisión simplificada se basa en escoger  $x_i$  si y solamente si:

$$\text{dist}(\tilde{x}_1, x_i) \leq \text{dist}(\tilde{x}_1, x_j), \forall i \neq j,\tag{12}$$

$$\text{dist}(\tilde{x}_2, x_i) \leq \text{dist}(\tilde{x}_2, x_j), \forall i \neq j,\tag{13}$$

donde  $\text{dist}(A,B)$  es la distancia Euclideana entre las señales A y B, y la señal j incluye todas las posibles señales transmitidas. De las ecuaciones 12 y 13 se puede ver que la máxima probabilidad del símbolo transmitido es uno, teniendo la mínima distancia Euclideana para la señal combinada  $\tilde{x}_1$  y  $\tilde{x}_2$ .



**Figura 7.** Representación de un código de bloque espacio-tiempo  $G_2$  de doble transmisor simple de la ecuación 3.

La recepción se puede realizar con un número arbitrario de receptores, sin embargo, esto incrementa la complejidad en la arquitectura del dispositivo receptor, ya que por cada receptor es necesario contar con una antena, un estimador de canal y un combinador con más entradas.

## **Capítulo 5.**

### **Simulaciones en computadora.**

#### **5.1 Introducción.**

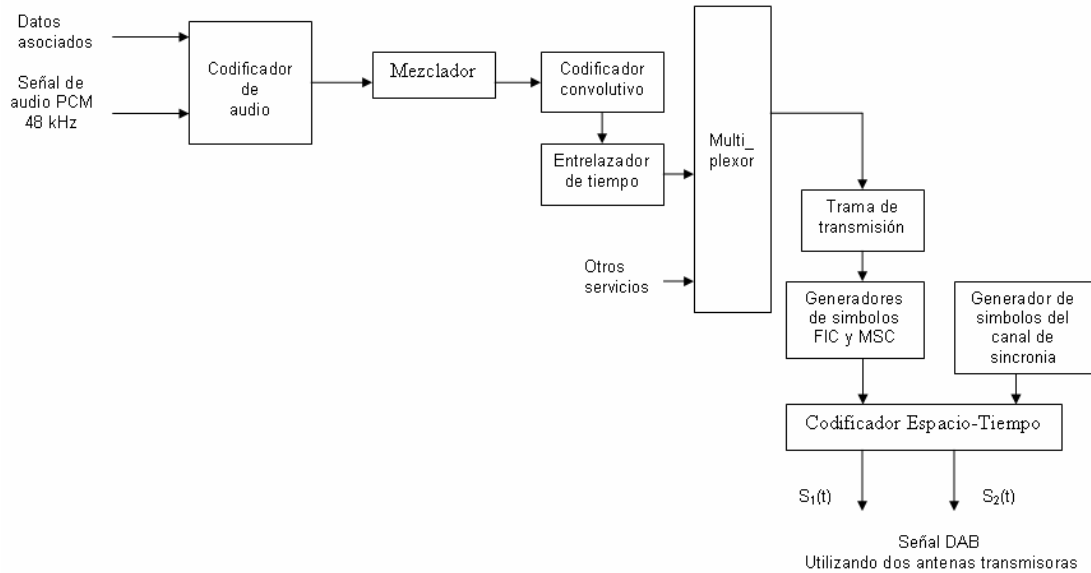
Como se menciona en el capítulo 2, la radio digital es ya una realidad en parte del mundo. En México, se han hecho pruebas de estos sistemas, aunque no se ha tomado ninguna decisión aun. Los sistemas que han sido aprobados son el estándar estadounidense IBOC y el europeo Eureka-147. Este trabajo a elegido a Eureka-147, ya que es posible su uso en México, debido a que se tiene espectro de frecuencia disponible para su implantación. Otro hecho que presupone su uso en México, son las siguientes ventajas mencionadas en el capítulo 1.

El otro sistema, el llamado IBOC se descarta ya que ha tenido algunos problemas en su transición como por ejemplo: interferencia cruzada entre las señales analógicas y las digitales [21]

#### **5.2 Descripción del modelo.**

El objetivo de esta investigación es evaluar el desempeño de un código de bloque espacio-tiempo. Esto se logró por medio de simulaciones por computadora. La investigación se dividió en tres fases que en este mismo capítulo se describirán. El escenario de las simulaciones también se describen en este capítulo. En la figura 8, aparece el modelo propuesto.

En las simulaciones de este trabajo, el transmisor considero el uso de dos antenas, esto es, el esquema G2 de Alamouti. En relación al equipo receptor, se hicieron pruebas para una y dos antenas respectivamente. La potencia de transmisión para cada antena es de  $\frac{1}{2}$ , esto para normalizar la potencia total a 1.



**Fig. 8** Diagrama a bloques de un sistema DAB, incluyendo un codificador espacio tiempo.

La simulación de un sistema DAB (figura 9) parte de la generación de bits, un sistema real, estos son el resultado de una compresión del audio, mediante el modelo psicoacústico, mismo que se describió en el capítulo 2, para nuestro caso, el tren de símbolos de entrada se genera mediante la técnica de simulación conocida como Monte Carlo, esta es una aplicación particular de un método general. Este puede ser aplicado a problemas determinísticos o probabilísticos. Se puede definir este método como un procedimiento computacional en el cual se generan cantidades aleatorias que son producto de bosquejar muestras de una población de valores de los cuales se tiene previsto sus propiedades estadísticas. Esto se logra construyendo un apropiado generador de números aleatorios. Estas muestras aleatorias pueden ser señales, ruido, interferencia o incluso canales. Para nuestro caso de estudio, los símbolos aleatorios generados tenían una distribución uniforme. El flujo de entrada de bits, se dividió en bloques de longitud  $B=2bs$ , formando símbolos ( $B=2bs$ )

Ya que se tuvo la información de entrada, esta información se envía modulando estos sistemas. Los esquemas de modulación empleados fueron BPSK, QPSK, 8PSK y DQPSK. Entendiendo por modulación el conjunto de técnicas para transportar

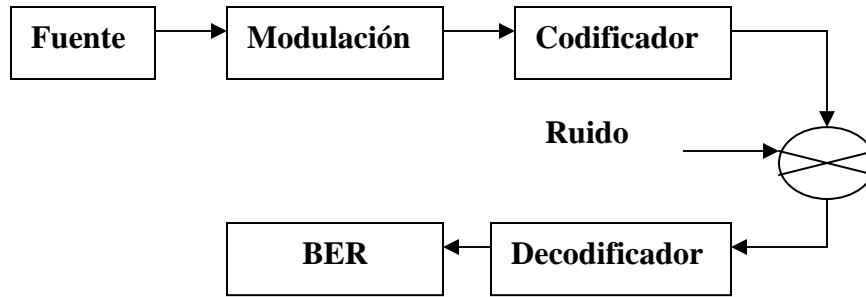
información sobre una onda portadora, típicamente una onda sinusoidal. Estas técnicas permiten un mejor aprovechamiento del canal de comunicación lo que posibilita transmitir más información en forma simultánea, protegiéndola de posibles interferencias y ruidos. El sistema DAB utiliza la modulación DQPSK, si hicieron pruebas con otros esquemas solo para probar la eficiencia del código.

Otro aspecto importante para la simulación fue el tipo de canal, en el capítulo 1 se mencionó los problemas en la transmisión de la señal de audio. Se utilizó el modelo de propagación a escala corta. En canales móviles se utiliza generalmente la distribución Rayleigh para describir estadísticamente las variaciones en el tiempo de una señal envolvente. Esta distribución tiene una función de densidad como a continuación se muestra.

$$p(r) \equiv \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) & (0 \leq r \leq \infty) \\ 0 & r < 0 \end{cases} \quad (14)$$

Como se mencionó, el canal se considera Rayleigh, pero también AWGN, con un perfil de potencia uniforme. En la vida real, este no es el comportamiento, pero para nuestro fin, este modelo de canal es útil, ya que permite investigar si realmente el esquema propuesto puede aminorar las interferencias. El canal entre la antena transmisora y la receptora se considera cuasiestático. Esta propiedad significa que el canal permanece constante en un cierto período de tiempo. Las ganancias de canal se modelan como variables aleatorias Gaussianas, independientes, media cero, y con varianza igual a uno. Se asumen otras características de tal forma que se facilite el análisis. Se asume que el receptor tiene conocimiento de los coeficientes de propagación. También, se considera éste perfectamente sincronizado con el transmisor. El ruido en el receptor, es no correlacionado en espacialmente y temporalmente, y se generó con el mismo procedimiento empleado para los coeficientes del canal.

DAB utiliza un código convolutivo con corrección de errores, este también se incluyo en la simulación. Finalmente se aplicó el código de bloque espacio tiempo G2, mismo que se explico en el capítulo 3, que era la meta final de este proyecto.



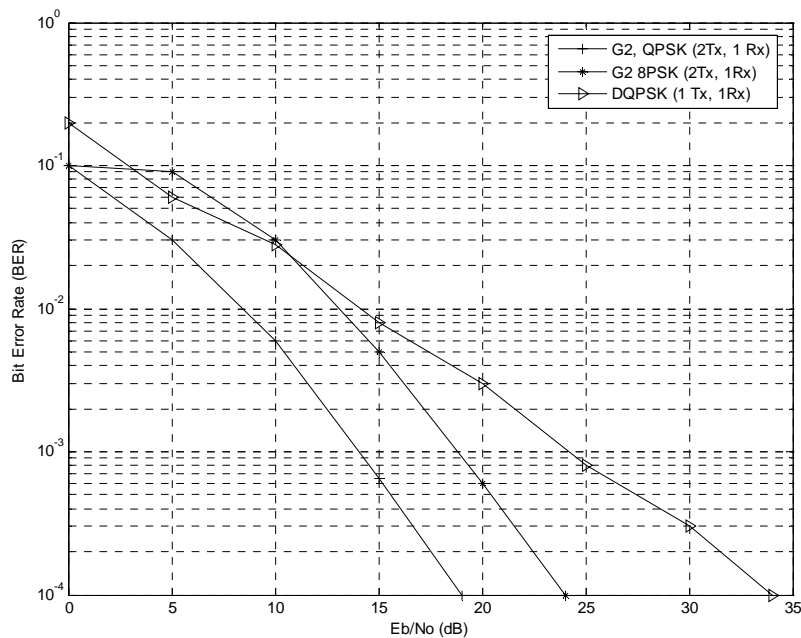
**Fig. 9** Diagrama a bloques de la simulación utilizada en este trabajo.

### 5.3 Resultados numéricos.

El sistema Eureka-147 fue probado parte por parte para asegurar que todos sus componentes funcionaran tal y como se esperaba. Primero se probaron los componentes básicos incluyendo el codificador y decodificador de audio, el código convolutivo con corrección de error y el código de bloque espacio tiempo. Para confirmar que se desempeñaran correctamente, se utilizó un modelo básico sin ruido, sin entrelazador ni ecualizador, esto con el único fin de validar los resultados simulados con los teóricos. El sistema básico tenía como entrada 3 Mbps de datos, y se considera solamente un canal radio AWGN. Consideramos un canal de comunicación móvil con una estación base equipada con dos antenas transmisoras y el receptor móvil con solo una antena.

La figura 10 muestra los resultados del desempeño de un sistema básico con un código G2 para distintos esquemas de modulación (QPSK, 8PSK y DQPSK) de acuerdo con el número de antenas (2 Tx o 1 Tx y un Rx). Los símbolos se introducen al código espacio tiempo, haciendo un mapeo en tiempo y espacio de acuerdo con (3). Como se esperaba, la ganancia de codificación es de aproximadamente 11 dB que se puede observar para un BER de  $10^{-3}$  para G2 QPSK y DQPSK. La figura 10 confirma los resultados teóricos. Conforme la relación  $E_b/N_0$  decrece, el desempeño BER cae ligeramente pero no significativamente. Mientras 8-PSK puede proveer mayor eficiencia de ancho de banda que QPSK, no es tan confiable como QPSK ya que muestra mayor degradación que el caso en que QPSK utiliza el código G2.

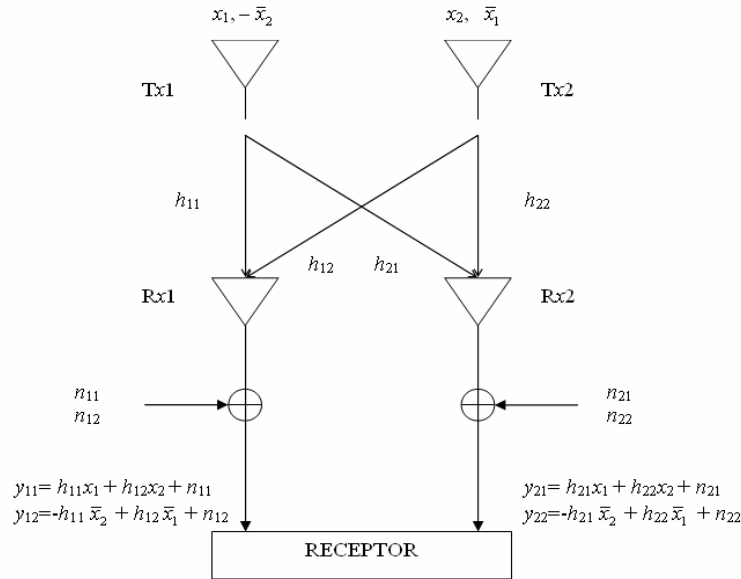
El esquema propuesto por Alamoutti, se puede generalizar para  $n$  transmisores y  $n$  receptores. Elegimos hacer pruebas con un receptor (Fig. 7) y dos receptores (Fig. 11). Las condiciones de simulación fueron las mismas para ambos sistemas. La figura 12 muestra los resultados del sistema DAB utilizando una y dos antenas receptoras. Se consideraron solamente la modulación QPSK. Como medida del desempeño del sistema, utilizamos la tasa de error de bit (BER, Bit Error Rate).



**Figura 10.** Desempeño de Eureka-147 utilizando un canal AWGN.

El resultado de esta concordó con lo que se esperaba en la hipótesis, es decir, al aumentar la diversidad espacial (con el uso de dos receptores) se logró disminuir la tasa de error, es decir probabilidad de perder información durante la transmisión. Para el fin de este proyecto, se optó por tan solo utilizar una antena en el receptor, ya que el aumento en el número de antenas es proporcional a la complejidad de los componentes del sistema. Tomando en consideración los resultados previos, al utilizar solamente una antena en el receptor, se obtiene una mejora considerable en el desempeño del sistema, y esto, para efecto de esta tesis es suficiente. El código G2 con un receptor, se simuló también con varios esquemas de simulación, esto con el único propósito de observar el desempeño de código. Figura 13.

Sin embargo, se probó el código G2 con 2 receptores con diversos esquemas de modulación, con el mismo propósito de la simulación pasada. Estos resultados se muestran en la figura 14. En estas simulaciones, se consideró el efecto del canal radio, para tal efecto, se modeló el canal con las características de desvanecimiento Rayleigh.

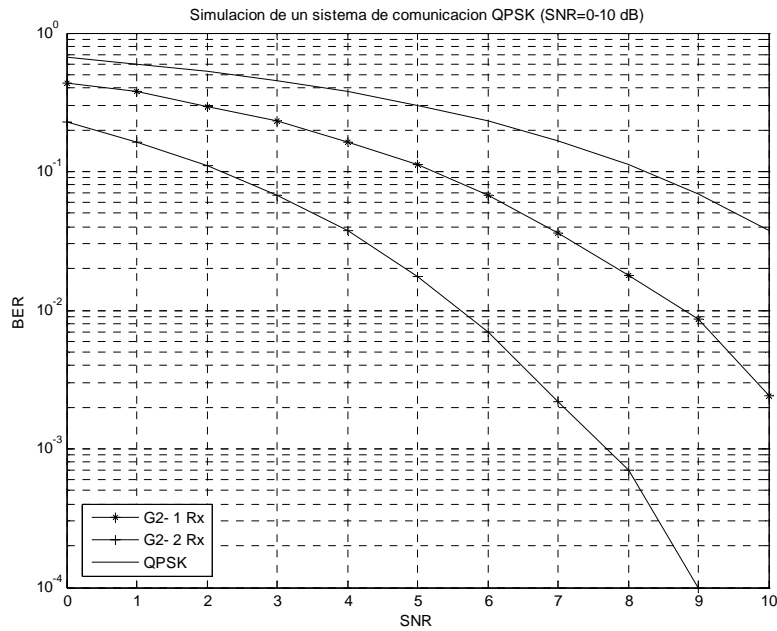


**Fig.11** Código de bloque espacio-tiempo G2 con dos receptores.

Igual que en los resultados anteriores, se tomo la tasa de error de bit (BER) como medida de desempeño. En esta gráfica se puede observar que es un hecho que la diversidad espacial y temporal del código proporciona ventajas al sistema, y esto se nota en la pendiente de las curvas para la tasa de error de bit. El resultado de la simulación indica que hay mejor en desempeño con niveles más altos de Eb/No. En esta figura, también se incluye el la respuesta del sistema sin incluir el código G2. Estos resultados revelan, que se puede llegar a tener ganancias de codificación significativas en el sistema DAB, aun con solo dos antenas transmisoras. Por ejemplo, para un valor de 0.001 de BER, hay más de 6 dB de ganancia, comparando con un sistema que no incluye un código espacio-tiempo.

Como si mencionó en el capítulo 3, Eureka-147 utiliza en su transmisión la modulación DQPSK (tabla 2). Para conseguir los resultados de la figura 15, utilizamos un canal con desvanecimiento Rayleigh y modulación DQPSK. El sistema de radio digital, también utiliza un código convolutivo con corrección de error adelantada (FEC), para suministrar una protección robusta contra errores. La tasa de codificación fue de 1/4 y se simularon bloques de 1024 bits. En la figura 15, podemos ver que para 10 db, se tienen un BER= 10<sup>-5</sup>, esta respuesta es muy significativa, ya que la tasa transmitida para

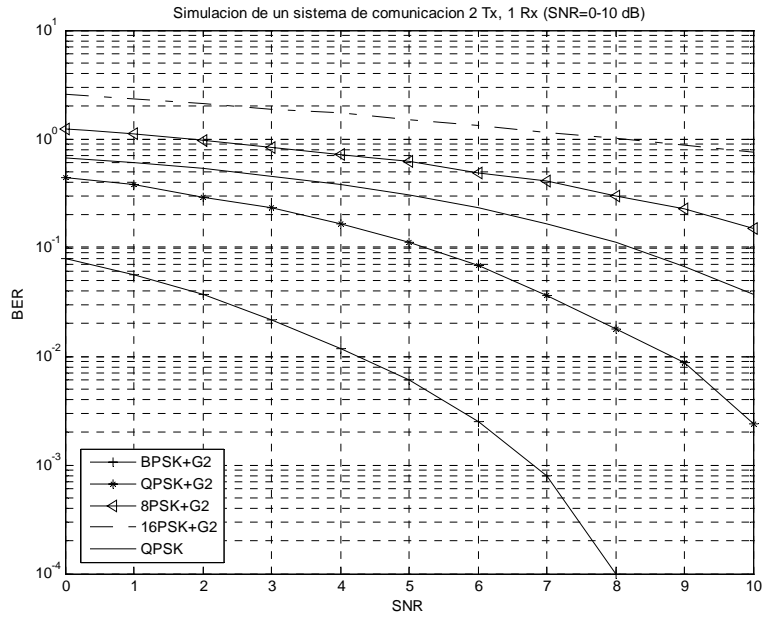
audio digital ideal es de  $10^{-4}$ . Otro dato importante que arroja esta gráfica es que para un BER de  $10^{-4}$  se tiene una ganancia de 2 dB, hecho que es bastante significativo, ya que con un menor EB/No, puede tenerse una misma calidad en el sonido.



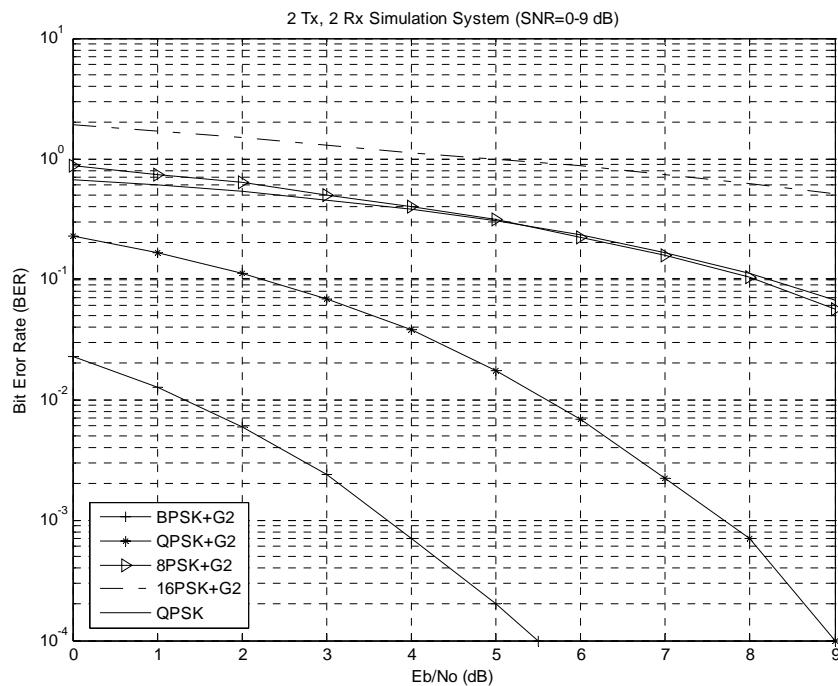
**Fig. 12** Resultados gráficos de un sistema de comunicación modulado QPSK utilizando un código G2 para uno y dos receptores.

Sistema	Codificación de fuente	Modulación	Codificación de canal	Tasa de transmisión	Ancho de banda	Técnica de Acceso múltiple	Servicios
Eureka 147	MUSICAM	DQPSK	FEC	Hasta 3 Mbit/s	1.54 Mhz	COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexin)	Audio, datos

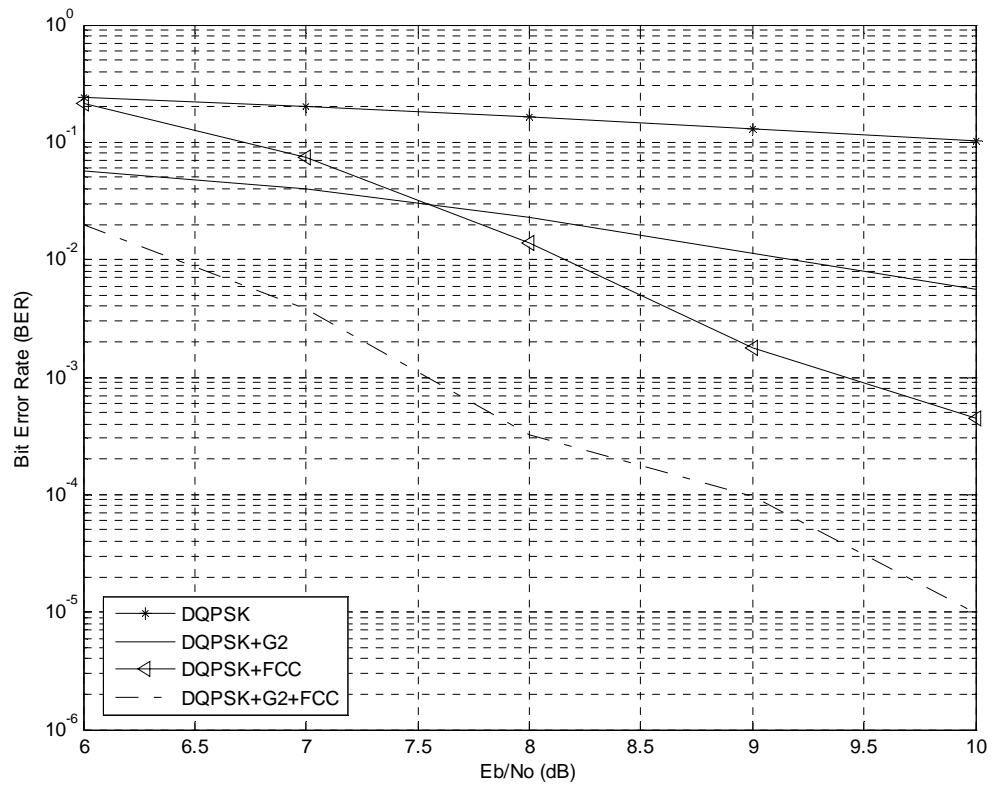
**Tabla 2.** Características del sistema de radio digital Eureka-147



**Fig. 13** Resultados de un código G2 con un receptor para diversos esquemas de modulación



**Fig. 14** Resultados de un código G2 con dos receptores para diversos esquemas de modulación



**Fig. 15** Desempeño de Eureka-147 con el código de bloque G2.

## **Capítulo 6.**

### **Conclusiones.**

Desde 1985, se han hecho pruebas a lo largo y ancho del mundo con la radio digital, es sus distintos estándares (capítulo 2). En 1987, como se mencionó surge en Europa el sistema de radio digital Eureka-147. Para 1992, este sistema se recomendó como sistema de audio digital a nivel mundial, ya que cumple con los requisitos establecidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). En diciembre de 1994 se consiguió la categoría de estándar mundial.

Con lo que respecta a nuestro país, México, la Comisión Federal de Telecomunicaciones se encuentra estudiando el tema del estándar de radio digital que se utilizará en nuestro país, así como de la Política para favorecer su pronta implementación.

Los empresarios de la radio en México, han manifestado que desean Eureka 147 como estándar obligatorio. Sin embargo, la Cofetel ya propuso una política de radio digital terrestre, para la frontera norte se considera la adopción voluntaria del IBOC y Eureka 147 para el resto del país.

Teniendo como marco de referencia esta información, y considerando los requisitos para una buena transmisión y recepción DAB, este trabajo muestra una herramienta para lograr todas esas bondades que se manejan sobre este sistema digital de radio.

El empleo de un código de bloque espacio tiempo, como se demostró en el capítulo anterior, permite que un sistema de comunicación pueda tener una disminución en la tasa de error BER (Bit Error Rate), para un mismo nivel de  $E_b/N_0$ , comparándolo con un sistema el cual no utiliza esta técnica. Por ende, Eureka-147 al utilizar esta

codificación puede lograr mayor calidad en sus transmisiones para niveles de Eb/No comúnmente utilizadas durante sus transmisiones (generalmente 7 dB).

Este trabajo, propuso el código de bloque espacio tiempo más sencillo, así que los elementos que logran esta codificación añadidos al sistema Eureka-147, no serán muy complejos en cuanto a diseño e implementación.

La pronta emigración de la radio analógica a la digital, dependerá en gran medida de la calidad de las transmisiones de audio y de los servicios digitales extras. Si la sociedad no percibe esta calidad difícilmente viviremos la era digital en la radio.

## Bibliografía

- [1] Alamouti, Siavash, M.; “A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications”; IEEE Journal on Select Areas in Communications; Vol. 16; No. 8; pp. 1451-1458; 1998.
- [2] Becker Torsten C., Kuchen Frederik, Wiesbeck Werner; “A New Network Planning Approach for Digital Audio Broadcasting” ; IEEE Transactions on Vehicular Technology; Vol. 48; pp.619-625; 1999.
- [3] Vélez Manuel M., Angueira Pablo, et al.; “L-Band DAB Eureka 147 Field Trails and Coverage Measurements in Urban Areas”; IEEE Transactions on Broadcasting; Vol. 48, pp. 71-75; 2002
- [4] Baek Myung-Sun, Kim Mi-Jeong, et al.; “Design and Performance Evaluation of DAB System with Multiple Antennas”; IEEE 2004; pp. 4663-4667
- [5] Y. (G.) Li, Jack H. Winters, and Nelson R. Sollenberger, “Signal detection for MIMO-OFDM wireless Communications,” *Proc. IEEE Int.Conf. Commun.*, vol.10,pp.3077-3081, June 2001.
- [6] Y. (G.) Li, “Simplified channel estimation for OFDM systems with multiple transmit antennas,” *IEEE Trans. Wireless Communications*, vol. 1, no. 1, pp. 67-75, January 2002.
- [7] T.Marzetta and B.Hochwald, “Capacity of a mobile multiple antenna communication link in Rayleigh flat fading,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 45, no. 1, pp. 139–157, 1999.
- [8] G. J. Foschini, “Layered space-time architecture for wireless communications in a fading environment when using multi-element antennas,” *Bell System Technology Journal.*, vol.1, no.2, pp.41-59, Autumn 1996.
- [9] Tarokh, V.; Jafarkhani, H.; Calderbank, A.; “Space-time block codes from orthogonal designs”; IEEE Transactions on Information Theory; Vol. 45; pp. 1456-1467; 1999.
- [10] Layer David H. ; “Digital Radio Takes to the Road”; IEEE Spectrum; pp. 40-46; July 2001.
- [11] Tuttlebee W. H. W., Hawkins D.A.; “Consumer Digital Radio: from Concept to Reality”; Electronics & Communications Engineering Journal; pp. 263-276; December 1998.
- [12] Anglin Richard L. Jr.; “Digital Audio Broadcasting: U.S. Technologies and Systems, Terrestrial and Satellite” ; International Topical Symposium; WM1-2; pp. 149-154; 1995.

- [13] Witherow D.M.L., Laven P.A.; "Digital Audio Broadcasting- The Future or Radio." International Broadcasting Convention; Conference Publication 143; pp. 57-61; 14-18 September 1995.
- [14] Tecnología al día. Revista electrónica de la CIRT. Mayo de 2004.
- [15] Christof Faller, Biing-Hwang Juang, et.al. "Technical Advances in Digital Audio Radio Broadcasting," Proceeding of the IEEE, Vol. 90 N° 8, August 2002.
- [16] ETSI ES-201980
- [17] P. Shelswell, G. Gandy, J.L. Riley, M. Maddocks. "Digital Audio Broadcasting". IEEE Colloquium on Vehicle Audio Systems.
- [18] A.J. Bower. "Digital Radio -The Eureka 147 DAB System" Electronic Engineering Magazine, April 1998, pp. 55-56 .
- [19] Sklar, Benard; "Digital Comunciations: Fundamentals and applications"; Editorial Prentice Hall; 2001.
- [20] Xiong, Fuquin; "Digital Modulation Techniques"; Editorial Artech House; 2000.
- [21] Peñafiel Carmen; "Cara y cruz de la radio ditial en España"; Quaderns del CAC; Número 18.
- [22] Hoeg, Wolfgang; Lauterbach, Thomas; "Digital Audio Broadcasting: Principles and Applications of Digital Radio"; John Wiley and Sons; 2003.