

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**MEJORAMIENTO DE LAS COMUNICACIONES ANALÓGICAS
Y DIGITALES VÍA EL ELECTROCHORRO ECUATORIAL
EMPLEANDO DIVERSIDAD**

Tesis para optar por el título de Ingeniero de las Telecomunicaciones, que presenta
el bachiller:

Nadia Patricia Yoza Mitsuishi

ASESORES: Ing. David Chávez Muñoz
Dr. Jorge Luis Chau Chong-Shing

Lima, julio de 2009

RESUMEN

El Electrochorro Ecuatorial (EEJ por sus siglas en inglés) es una corriente horizontal de electrones que fluye a lo largo del ecuador magnético y está confinada a una delgada capa a 100 km de altura, en la ionósfera. Con este recurso, disponible en el Perú y otros pocos países, es posible realizar enlaces de radiocomunicaciones vía dispersión usando frecuencias de la banda VHF.

Anteriormente se han realizado pruebas de transmisión de voz y datos a través del EEJ. A partir de ellas se concluyó que la modulación FM es la que ofrece una mayor inteligibilidad de las comunicaciones, pero éstas son distorsionadas por desvanecimientos. Éstos son producidos de manera aleatoria, por lo que pueden ser contrarrestados mediante el empleo de técnicas de diversidad.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar las características del canal de comunicaciones EEJ y mejorar la calidad de la voz y datos transmitidos a través de éste. Para ello se analizan las comunicaciones en función a la variación de ciertos parámetros del EEJ y el efecto de la aplicación de la técnica de diversidad en la calidad de la voz y los datos recibidos.

Los resultados de este trabajo se dividen en dos partes. En la primera de ellas se ha desarrollado un programa que simula la transmisión de voz y datos a través del EEJ. Dicho simulador permite estudiar la calidad de las comunicaciones para distintos parámetros del sistema y del canal EEJ. Asimismo, se ha simulado el uso de diversidad sin necesidad de implementar físicamente el enlace. En la segunda parte se han realizado pruebas de campo en el enlace Jicamarca-Paracas con el objetivo de validar los resultados del simulador. En estas pruebas se transmitió voz y datos empleando diversidad a fin de comprobar la mejora de la calidad de la señal recibida respecto al caso de transmisión sin diversidad.

A mis amados padres:
Teodoro y Elena

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que me ayudaron de alguna forma a la realización de la tesis.

A mis padres (Teodoro y Elena) y mis hermanas (Natalia y Katia), por su apoyo incondicional.

Mi especial agradecimiento al Dr. Jorge Luis Chau, mi asesor, por brindarme la oportunidad de participar en este proyecto de investigación. Muchas gracias por sus enseñanzas y constante apoyo durante todo el desarrollo de la tesis, así como por toda la confianza, paciencia, motivación y consejos brindados.

A mi asesor, el Ing. David Chávez, por su confianza en mi persona y apoyo durante el desarrollo de la tesis, así como por el tiempo brindado.

A Karim Kuyeng, José Daniel Alcántara, Freddy Galindo, Iván Manay, Darwin Córdova, Henry Pinedo, Fernando Villanueva y José Francisco Quenta, quienes siempre estuvieron dispuestos a compartir sus conocimientos, brindarme el soporte necesario en el desarrollo de la tesis y guiarme con sus oportunos consejos.

A todo el personal del Radio Observatorio de Jicamarca, por su colaboración en los trabajos realizados y la amabilidad mostrada, así como por su amistad, enseñanzas y consejos.

A mis compañeros de promoción y amigos, cuyos consejos y ánimos me permitieron lograr la culminación de la tesis.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. El Electrochorro Ecuatorial.....	3
1.1.1. Definición	3
1.1.2. Geometría.....	6
1.1.3. Propagación ionosférica a través del EEJ	7
1.1.4. Parámetros del EEJ como canal de comunicaciones	9
1.1.4.1. Relación señal a ruido (SNR)	9
1.1.4.2. Ensanchamiento espectral y tiempo de coherencia del canal	9
1.1.4.3. Dispersión del retardo y ancho de banda de coherencia.....	10
1.2. Desvanecimientos.....	11
1.2.1. Clasificación de los desvanecimientos	11
1.2.2. Modelos estadísticos de los desvanecimientos: desvanecimiento de Rayleigh.....	12
1.3. Técnicas para contrarrestar el desvanecimiento: diversidad	14
1.3.1. Técnicas de diversidad	16
1.3.2. Métodos de combinación de señales en sistemas con diversidad.....	18
1.4. Tipos de modulación empleados.....	19
1.4.1. Modulación analógica	20
1.4.1.1. Modulación en amplitud (AM), Doble Banda Lateral (DSB) y Banda Lateral Única (SSB)	20
1.4.1.2. Modulación en frecuencia (PM) y Modulación de fase (FM)	23
1.4.2. Modulación digital	25
1.4.2.1. Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK)	26
1.4.2.2. Modulación por desplazamiento de fase (PSK).....	26

1.4.2.3.	Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK)	28
1.4.2.4.	Radiopaquetes	29
1.5.	Antecedentes de las comunicaciones vía el EEJ	30

CAPÍTULO 2

SIMULADOR DE COMUNICACIONES VIA EL ELECTROCHORRO ECUATORIAL32

2.1.	Antecedentes	32
2.2.	Modelo simplificado de las comunicaciones vía EEJ	33
2.2.1.	Modulación.....	34
2.2.2.	Generación del canal de comunicaciones EEJ.....	34
2.2.3.	Modulación por el EEJ	37
2.2.4.	Demodulación	37
2.3.	Variaciones del modelo.....	38
2.3.1.	Simulación del espesor de la capa del EEJ.....	38
2.3.2.	Simulación de transmisión de voz	39
2.3.3.	Simulación de transmisión de datos.....	40
2.3.3.1.	Simulación de transmisión de datos de modo directo.....	40
2.3.3.2.	Simulación de transmisión de datos de modo indirecto.....	42
2.3.4.	Simulación del empleo de diversidad	44

CAPÍTULO 3

RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES.....45

3.1.	Simulación de transmisión de voz	45
3.1.1.	Tipos de modulación	46
3.1.2.	Caracterización de los desvanecimientos	47
3.1.3.	Calidad en función de los parámetros del EEJ y del sistema de comunicaciones.....	51
3.1.3.1.	Calidad en función del SNR	51

3.1.3.2.	Calidad en función del ancho espectral del EEJ.....	52
3.1.3.3.	Calidad empleando diversidad	52
3.2.	Simulación de transmisión de datos.....	53
3.2.1.	Simulación de la transmisión de datos de modo directo.....	53
3.2.1.1.	Tipos de modulación	54
3.2.1.2.	Caracterización de los desvanecimientos	55
3.2.1.3.	Calidad en función de los parámetros del EEJ y del sistema de comunicaciones.....	56
3.2.1.3.1.	Calidad en función del SNR	56
3.2.1.3.2.	Calidad en función del ancho espectral del EEJ.....	57
3.2.1.3.3.	Calidad en función del espesor de la capa del EEJ.....	58
3.2.1.3.4.	Calidad en función de la tasa de bits.....	59
3.2.1.3.5.	Calidad empleando diversidad	60
3.2.2.	Simulación de la transmisión de datos de modo indirecto	61
3.3.	Otros resultados.....	65

CAPÍTULO 4

PRUEBAS DE CAMPO: ENLACE JICAMARCA-PARACAS.....	67	
4.1.	Introducción	67
4.2.	Geometría del enlace.....	68
4.3.	Configuración del sistema	69
4.3.1.	Configuración del hardware	69
4.3.1.1.	Configuración del sistema de transmisión	72
4.3.1.2.	Configuración del sistema de recepción.....	74
4.3.2.	Configuración del software y programas empleados	76
4.3.2.1.	Software de transmisión.....	76
4.3.2.2.	Software de modulación y demodulación de datos.....	76
4.3.2.3.	Programa de procesamiento de datos.....	77

4.3.2.4.	Programa de análisis de datos	78
4.4.	Procedimiento empleado.....	78
4.5.	Resultados de las pruebas de campo	80
4.5.1.	Resultados de la transmisión de voz.....	80
4.5.1.1.	Calidad de la voz en función del SNR	81
4.5.1.2.	Calidad de la voz en función del empleo de diversidad	82
4.5.2.	Resultados de la transmisión de datos.....	84
4.6.	Otros resultados.....	87
	CONCLUSIONES.....	89
	RECOMENDACIONES.....	92
	REFERENCIAS	94
	ANEXOS	

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Velocidad radial y perfil de potencia del EEJ en función de la altura de su capa.....	4
Figura 1.2. Declinación, componentes Horizontal y Vertical del campo magnético en Jicamarca.....	5
Figura 1.3. Caracterización temporal del EEJ durante el Año Geofísico Internacional de 1957	5
Figura 1.4. Geometría global del Electrochorro Ecuatorial	6
Figura 1.5. Geometría local del Electrochorro Ecuatorial	6
Figura 1.6. Dispersión frontal de las ondas de radio	8
Figura 1.8. Desvanecimiento de Rayleigh para un ancho espectral de 20 Hz	13
Figura 1.9. Diversidad en tiempo	16
Figura 1.10. Diversidad en frecuencia.....	16
Figura 1.11. Diversidad en espacio.....	17
Figura 1.12. Diversidad en polarización	17
Figura 1.13. Combinación por conmutación.....	18
Figura 1.14. Combinación por selección	18
Figura 1.15. Combinación por equiganancia.....	19
Figura 1.16. Combinación por tasa máxima.....	19
Figura 1.17. Señales moduladora, portadora y modulada en DSB.....	21
Figura 1.18. Espectro de las señales moduladora, portadora y modulada en DSB	21
Figura 1.19. Señal modulada en AM.....	22
Figura 1.20. Espectro de la señal modulada en AM.....	23
Figura 1.21. Espectro de la señal modulada SSB-USB.....	23
Figura 1.22. Señales moduladora, portadora, modulada en PM y modulada en FM	25
Figura 1.23. Secuencia de bits transmitidos y señal modulada en ASK	26
Figura 1.24. Señal modulada en BPSK.....	27

Figura 1.25. Señal modulada en QPSK	27
Figura 1.26. Señal modulada en FSK	29
Figura 2.1. Diagrama de bloques del simulador	33
Figura 2.2. Sistema para producir ruido gaussiano coloreado y generación del espectro del ruido coloreado.....	35
Figura 2.3. Espectro de frecuencia del canal de comunicaciones EEJ y su espectro teórico.....	36
Figura 2.4. Función del canal EEJ en el dominio del tiempo	37
Figura 2.5. Simulación del espesor de la capa del EEJ.....	38
Figura 2.6. Simulación de la transmisión de voz	40
Figura 2.7. Simulación de la transmisión de datos de modo directo.....	41
Figura 2.8. Componentes retardadas de la señal recibida y señal total recibida afectada por la dispersión del retardo.....	42
Figura 2.9. Simulación de la transmisión de datos de modo indirecto	43
Figura 2.10. Diagrama de bloques de la simulación de diversidad con dos realizaciones empleando el combinador por tasa máxima.....	44
Figura 3.1. Audio transmitido y su espectrograma	46
Figura 3.2. Desvanecimientos de la señal para un valor alto de SNR. Gráficas de la voz recibida y su espectrograma.	48
Figura 3.3. Desvanecimientos de la señal para un valor alto de SNR. Gráficas de la potencia de la señal recibida respecto del ruido (sin amplificar y amplificada cerca del nivel de ruido)	49
Figura 3.4. Desvanecimientos de la señal para un valor bajo de SNR. Gráficas de la voz recibida y su espectrograma	49
Figura 3.5. Desvanecimientos de la señal para un valor bajo de SNR. Gráficas de la potencia de la señal recibida respecto del ruido (sin amplificar y amplificada cerca del nivel de ruido)	50
Figura 3.6. Espectrogramas de los audios recibidos considerando dos realizaciones independientes del canal EEJ con los mismos parámetros de transmisión.....	51
Figura 3.7. Índice de correlación en función del SNR y el ancho espectral	52
Figura 3.8. Índice de correlación en función del SNR y la diversidad	53
Figura 3.9. Secuencia de bits transmitidos, señal conformada, secuencia de bits recibidos y señal demodulada para un SNR bajo	55

Figura 3.10. Gráfico similar al de la figura 3.9 para un SNR alto	56
Figura 3.11. BER vs SNR considerando la variación del ancho espectral.....	57
Figura 3.12. BER vs tasa de bits considerando la variación del espesor del canal EEJ.....	58
Figura 3.13. BER vs SNR considerando la variación de la tasa de bits.....	59
Figura 3.14. BER vs SNR considerando distintos números de realizaciones para la simulación de diversidad.....	61
Figura 3.15. Tasa de caracteres errados vs SNR considerando la variación de la tasa de bits	59
Figura 3.16. Tasa de caracteres errados vs SNR considerando el uso de diversidad para el modo PSK31.....	61
Figura 4.1. Locus de perpendicularidad entre las estaciones de Jicamarca y Paracas	69
Figura 4.2. Plano de elevación del enlace Jicamarca-Paracas	69
Figura 4.3. Diagrama de bloques de la configuración para las pruebas entre Jicamarca y Paracas	70
Figura 4.4. Disposición de los equipos para la transmisión	73
Figura 4.5. Arreglo de antenas para la transmisión desde Jicamarca	73
Figura 4.6. Disposición de los equipos para la recepción en Paracas	75
Figura 4.7. Arreglo de antenas para la recepción en Paracas.....	75
Figura 4.8. Interfaz gráfica del programa para transmisión ROJ Beacon	76
Figura 4.9. Interfaz del software de modulación digital Fldigi	77
Figura 4.10. Gráfica de la variación de la diferencia de las componentes del campo magnético medidas entre Jicamarca y Piura.....	79
Figura 4.11. Audio recibido y su espectrograma para un SNR de 11 dB.....	81
Figura 4.12. Audio recibido y su espectrograma para un SNR de 21 dB.....	82
Figura 4.13. Audio recibido empleando diversidad y su espectrograma para un SNR de 11 dB	83
Figura 4.14. Audio recibido empleando diversidad y su espectrograma para un SNR de 21 dB	83

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Tasa de caracteres errados obtenidos de las simulaciones de comunicaciones de datos de modo indirecto sin el uso de diversidad.....	63
Tabla 3.2. Tasa de caracteres errados obtenidos de las simulaciones de comunicaciones de datos de modo indirecto con el uso de diversidad	63
Tabla 4.1. Características del enlace de comunicaciones.....	68
Tabla 4.2. Parámetros básicos del sistema de comunicaciones	70
Tabla 4.3. Características de los radios transceptores empleados en la transmisión desde Jicamarca.....	72
Tabla 4.4. Mensaje transmitido y mensajes recibidos usando modulación PSK250 para valores de SNR bajo y medio considerando el uso de diversidad.....	85
Tabla 4.5. Tasa de caracteres errados obtenidos de las pruebas de comunicaciones de datos sin el uso de diversidad.....	87
Tabla 4.6. Tasa de caracteres errados obtenidos de las pruebas de comunicaciones de datos con el uso de diversidad.....	87

INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones desempeñan un rol fundamental en la sociedad actual. El intercambio de información favorece el desarrollo económico, social y cultural de los pueblos y permite un mejoramiento de la calidad de vida de la población. Los últimos años se han caracterizado por una revolución en los sistemas y servicios de comunicaciones, acompañada por un significativo incremento del volumen de información. Por tal motivo, las tecnologías actuales buscan brindar una mayor velocidad de transferencia de datos para satisfacer los requerimientos de las nuevas aplicaciones, las cuales están mayormente orientadas a los usuarios de las grandes ciudades.

Sin embargo, en países como el nuestro los servicios básicos de comunicaciones en muchas zonas rurales y de difícil acceso aún no han sido cubiertos. Debido a la difícil geografía de nuestro territorio, muchas veces no es posible llegar a aquellos lugares a través de enlaces microondas, los cuales requieren de línea de vista, y, además, resulta poco viable económicamente implementar y mantener enlaces satelitales. Por esta razón, se opta en estos casos por el empleo de comunicaciones por reflexión ionosférica en la banda de HF, con lo cual se logra alcanzar mayores distancias a bajo costo, aunque con menor calidad que las anteriores.

El Electrochorro Ecuatorial (EEJ, *Equatorial Electrojet*) se presenta como un medio alternativo de comunicaciones para atender a zonas de difícil acceso utilizando la banda de VHF. Consiste en una corriente horizontal de electrones ubicada a 100 km de altura en la ionósfera, a lo largo del ecuador magnético, el cual atraviesa el territorio central del Perú y otros pocos países. Esta posición privilegiada favorece el estudio de este fenómeno, el cual, desde la década de 1950, ha sido objeto de experimentos que confirman su potencial como medio de comunicación por dispersión frontal, pero que hasta la fecha no se ha logrado explotar de manera sistemática.

El presente trabajo tiene como objetivo **estudiar las características del canal de comunicaciones EEJ y mejorar la calidad de las comunicaciones analógicas y digitales transmitidas a través de éste**, con la finalidad de que pueda promoverse su uso como medio alternativo de comunicaciones en el país.

Para ello se analiza la variación de ciertos parámetros del EEJ empleado como canal de comunicaciones (ancho espectral y relación señal a ruido) y el efecto de la aplicación de la técnica de diversidad en la calidad de la voz y datos transmitidos vía el EEJ.

Para lograr este fin, este trabajo consta de dos partes principales. En la primera de ellas se desarrolla un programa que simula la transmisión de voz y datos a través de un EEJ modelado sin necesidad de implementar físicamente el enlace. Además, se simula el uso de diversidad para la transmisión y se realiza el procesamiento respectivo para lograr una mejor calidad de la señal recibida. En la segunda parte se realizan pruebas de campo sobre el enlace punto a punto entre Jicamarca y Paracas con la finalidad de validar los resultados de las simulaciones. En estas pruebas se transmite voz y datos empleando diversidad a fin de comprobar el mejoramiento de la calidad de la señal recibida respecto al caso de transmisión sin diversidad.

La tesis se ha organizado en cuatro capítulos. El capítulo 1 desarrolla el marco teórico, el cual comprende una introducción teórica del EEJ y sus características como canal de comunicaciones, así como la definición de los conceptos de desvanecimiento y diversidad. Se describen también brevemente los tipos de modulación analógica y digital empleados y se realiza una breve referencia a los experimentos de comunicaciones realizados anteriormente. El capítulo 2 describe el modelo del simulador de comunicaciones analógicas y digitales vía EEJ, en el cual se incluye la simulación de diversidad. Los resultados de las simulaciones se presentan en el capítulo 3. En este capítulo se incluye además estadísticas de la calidad de la voz y datos en función de la variación de los parámetros del EEJ. El capítulo 4 describe las pruebas de campo de comunicaciones de voz y datos realizadas en el enlace Jicamarca-Paracas aplicando diversidad. Se presentan los resultados de dichas pruebas y el análisis de las mismas. Finalmente, se detallan las principales conclusiones y recomendaciones referentes a este trabajo.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se abordarán los conceptos necesarios para el desarrollo de la tesis, como son la definición del EEJ y sus características como canal de comunicaciones. Se define el concepto de desvanecimiento de la señal y se mencionan algunas técnicas empleadas para el mejoramiento de la calidad de la misma, entre las cuales se destaca la técnica de diversidad. Finalmente, se describen los tipos de modulación analógica y digital empleadas para la transmisión y se da una breve reseña de los antecedentes de las comunicaciones a través del EEJ.

1.1. El Electrochorro Ecuatorial

1.1.1. Definición

Se conoce como Electrochorro Ecuatorial (EEJ, *Equatorial ElectroJet*) a una gran corriente horizontal de electrones que fluye a lo largo del ecuador magnético. Se encuentra en la ionósfera, dentro de la región E, entre los 95 y los 110 km de altitud. Comprende un ancho de 600 km en la dirección norte-sur centrado en el ecuador magnético, lo que equivale a $\pm 3^\circ$ de latitud magnética [1].

El EEJ presenta irregularidades que se encuentran en constante movimiento, las cuales son causadas por la acción de las turbulencias y la variación de la densidad electrónica en la ionósfera. El promedio de los desplazamientos de estas irregularidades provoca un movimiento de todo el EEJ, que genera un campo eléctrico que se desplaza en dirección este en el día y hacia el oeste durante la noche. En la figura 1.1 se muestran las gráficas del espectrograma (velocidad radial

vs. rango) y el perfil de potencia de los ecos del EEJ en función de la altura de la capa de éste. Del primer gráfico se observa que la dispersión radial del EEJ aumenta con la altura y puede alcanzar la velocidad del sonido (360 m/s). Además, se aprecia que el espesor del EEJ es de aproximadamente 15 km. En la segunda gráfica se aprecia que los ecos de EEJ son más intensos a medida que se incrementa la altura dentro del rango del EEJ.

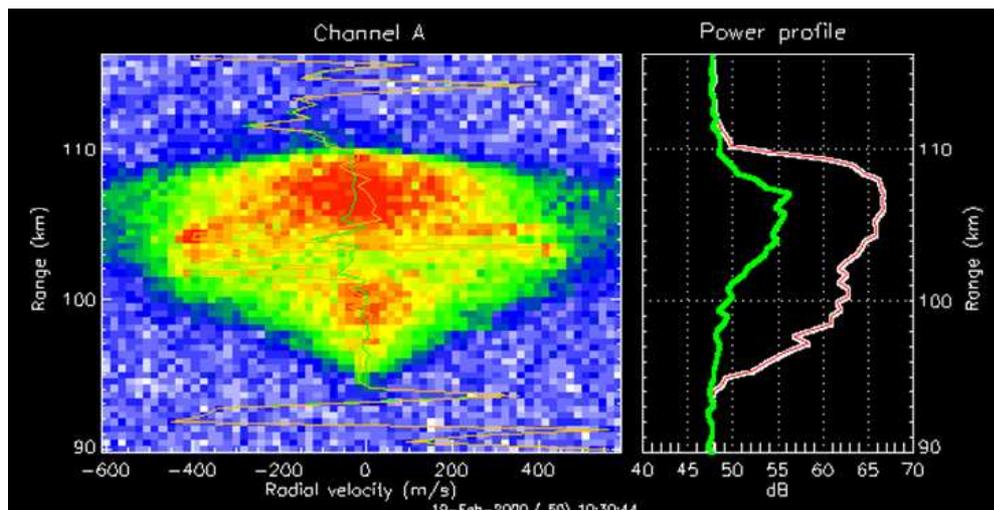


Figura 1.1. Espectrograma (izquierda) y perfil de potencia (derecha) del EEJ en función de la altura de su capa (imagen proporcionada por el Dr. Chau)

La intensidad de los ecos del EEJ está determinada por la conductividad del EEJ, la cual es proporcional al campo eléctrico y al campo magnético de éste [2]. Una medida aproximada de la intensidad del EEJ es la magnitud de la diferencia de la componente horizontal del campo magnético medida en dos estaciones, una dentro del área cubierta por el EEJ y otra fuera de ésta (ΔH). En la figura 1.2 se muestra una gráfica de la variación temporal de las tres cantidades que permiten describir la intensidad del campo magnético medidas en Jicamarca, las cuales están en función de su proyección horizontal (H) y vertical (Z), además del ángulo de declinación, formado entre H y el norte geográfico. Se observa en la gráfica que H alcanza su mayor magnitud en horas diurnas (las horas se encuentran en escala UT, *Universal Time*), lo cual indica que la intensidad de los ecos del EEJ es mayor durante estas horas, alcanzando su pico alrededor del mediodía.

La figura 1.3 presenta estadísticas de la variación temporal y estacional de la intensidad del EEJ durante el Año Geofísico Internacional (1957-1958). Se comprueba que, en efecto, el EEJ es más intenso durante el día, entre las 8 a.m. y

3 p.m., aproximadamente, y disminuye considerablemente en las noches. Respecto a su variación estacional, las observaciones efectuadas muestran que la intensidad diurna del EEJ registrada para los meses de Noviembre de 1957 y Enero y Febrero de 1958 fue más baja que para los demás meses [3].

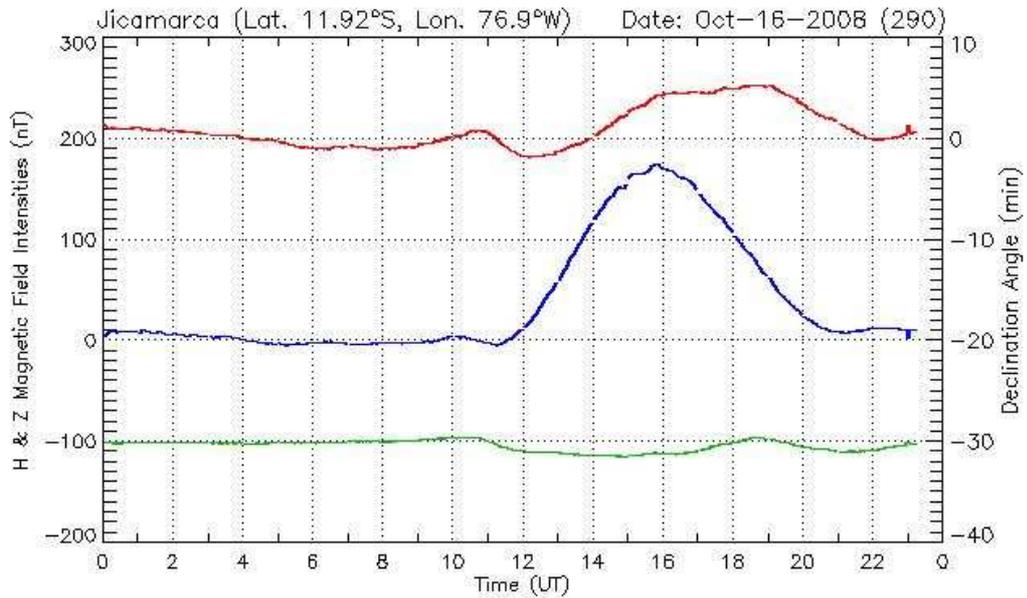


Figura 1.2. Ángulo de Declinación (línea roja), expresado en minutos (eje Y a la derecha), y componentes Horizontal (línea azul) y Vertical (línea verde), expresadas en Teslas (eje Y a la izquierda), del campo magnético en Jicamarca. [4]

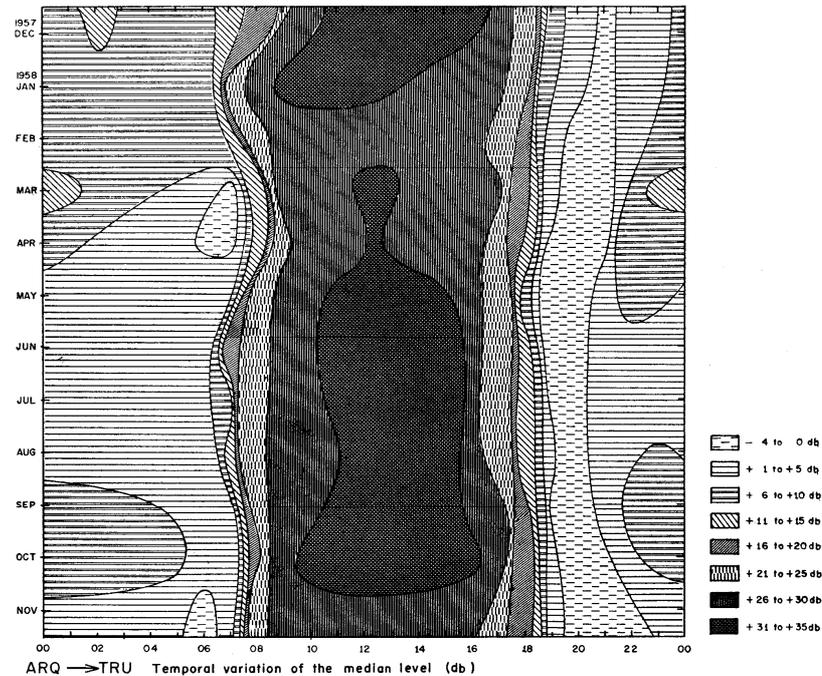


Figura 1.3. Caracterización temporal de la intensidad de la señal dispersada en el EEJ durante el Año Geofísico Internacional de 1957-1958 [3]

1.1.2. Geometría

El gráfico de la geometría global del EEJ se muestra en la figura 1.4. Como se mencionó, el EEJ se presenta a lo largo del ecuador magnético (línea roja), el cual no coincide con el ecuador geográfico (línea verde). En la figura 1.5 se observa que, a nivel local, el EEJ atraviesa el territorio del Perú en la región centro-sur y comprende un ancho de $\pm 3^\circ$ de latitud magnética.

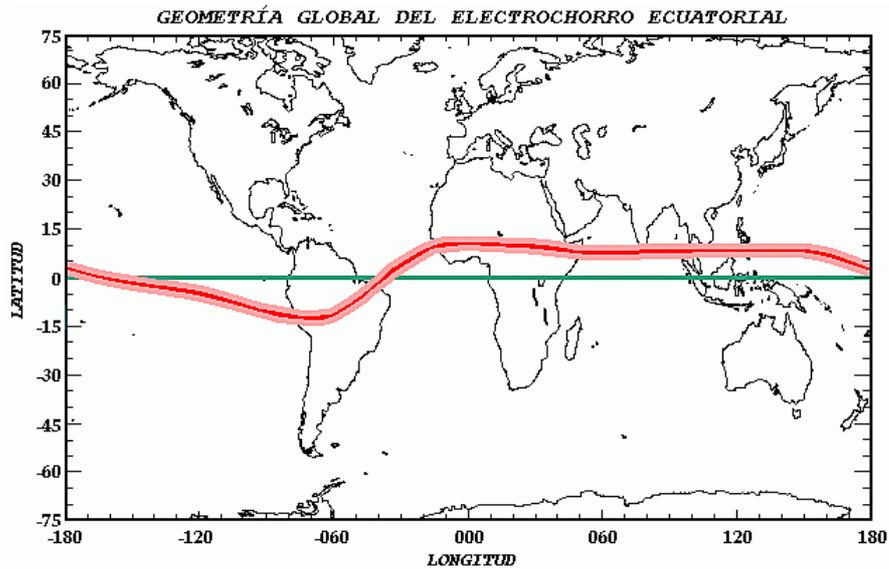


Figura 1.4. Geometría global del Electrochorro Ecuatorial [5]

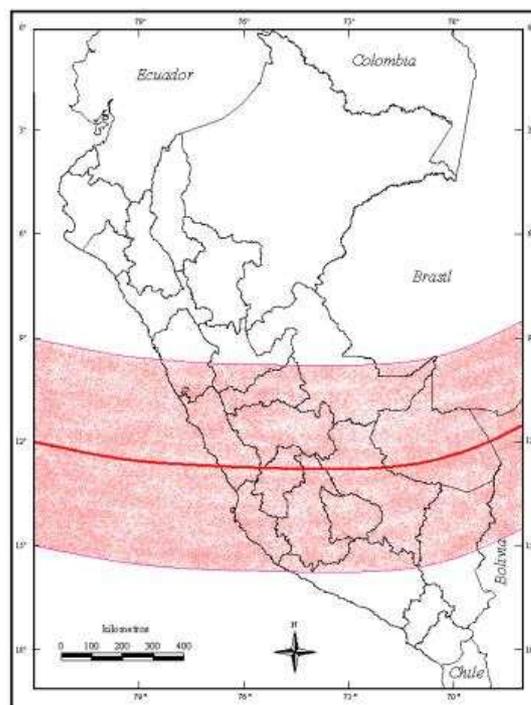


Figura 1.5. Geometría local del Electrochorro Ecuatorial [5]

1.1.3. Propagación ionosférica a través del EEJ

La propagación ionosférica consiste en la reflexión, dispersión y refracción de las ondas radioeléctricas en la ionósfera, situada entre los 60 y los 600 km de altura. Este tipo de propagación está determinado por el nivel de ionización de la ionósfera y la frecuencia utilizada. El nivel de ionización define la Frecuencia Máxima Utilizable (MUF, *Maximum Usable Frequency*) que puede ser empleada para establecer comunicaciones entre dos puntos determinados por propagación ionosférica. Para frecuencias mayores al MUF, las ondas incidentes escapan de la atmósfera y ya no retornan a la tierra. [6]

Típicamente se emplea la propagación ionosférica para comunicaciones en la banda de HF (3 a 30 MHz) [7]. La calidad de este tipo de comunicaciones se caracteriza por ser ruidosa e incierta, producto de la distorsión provocada por la ionósfera y las condiciones cambiantes de ésta [8]. A pesar de ello, es ampliamente usada debido a que permite alcanzar largas distancias (hasta miles de km) a bajo costo, con lo cual es posible comunicar lugares alejados. Para frecuencias en las bandas de VHF (30 a 300 MHz) y UHF (300 MHz a 3 GHz) se opta normalmente por la propagación por onda de espacio, la cual permite una mayor calidad de comunicaciones. Sin embargo, debido a que requiere de línea de vista entre el transmisor y el receptor, las distancias cubiertas son cortas, por lo que serían necesarios múltiples repetidores para comunicar dos puntos distantes entre sí, lo cual resulta caro y poco viable. Otros mecanismos de propagación en bandas de VHF y UHF, aunque menos utilizados que el anterior, son por propagación troposférica y propagación ionosférica por dispersión en irregularidades en el medio, como en el caso del EEJ.

El EEJ puede ser empleado como medio de dispersión para establecer enlaces de comunicaciones punto a punto por propagación ionosférica en la banda de VHF. Dichas comunicaciones se realizan a través de la dispersión frontal o hacia adelante (*Forward Scatter*) de las ondas de radio en las irregularidades del EEJ. La dispersión frontal consiste en que las ondas de radio pasan de un medio no ionizado a una capa ionizada en la cual se dispersa y sigue su trayectoria hacia adelante, como se observa en la figura 1.6. Para ello se requiere que las ondas dispersadas se interfieran constructivamente entre sí, es decir, que se encuentren desfasadas un número entero de longitudes de onda. Esto se resume en la condición de Bragg, la cual, aplicada a la dispersión por EEJ, establece que la

diferencia entre los vectores incidente (k_i) y dispersado (k_r), denominado vector número de onda (k_s), debe ser perpendicular al campo magnético, el cual está alineado con el plano que contiene las irregularidades del EEJ [9]. Estos vectores y el campo eléctrico (E) se grafican en la figura 1.7. El lugar geométrico determinado por todos aquellos puntos que cumplen la condición de dispersión de Bragg en el campo magnético se denomina locus de perpendicularidad. Éste depende de la altura del EEJ (100 km en promedio), las coordenadas de ambas estaciones y las características del campo magnético.

De lo expuesto en el párrafo anterior se deduce que la aplicación de la ley de Bragg requiere la existencia de línea de vista entre cada estación y el EEJ. Por este motivo, la geometría del enlace establece una separación máxima de 2000 km entre las dos estaciones [5], distancia que se ve limitada por la altura promedio del EEJ (de 100 km) y la curvatura de la Tierra.

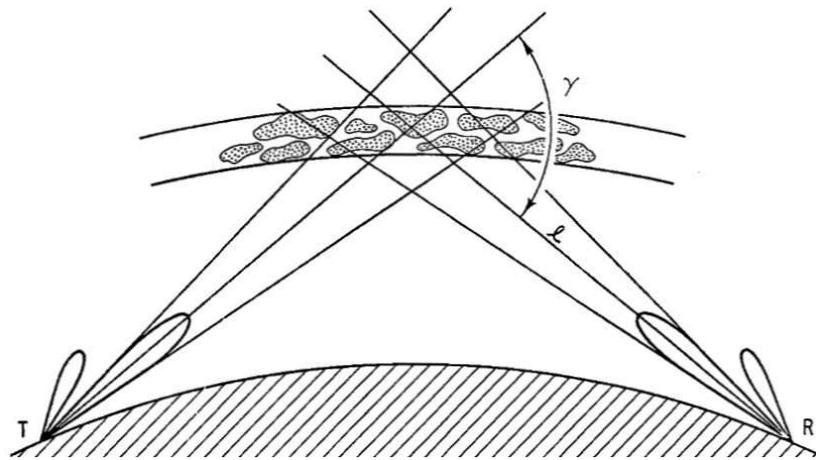


Figura 1.6. Dispersión frontal de las ondas de radio [10]

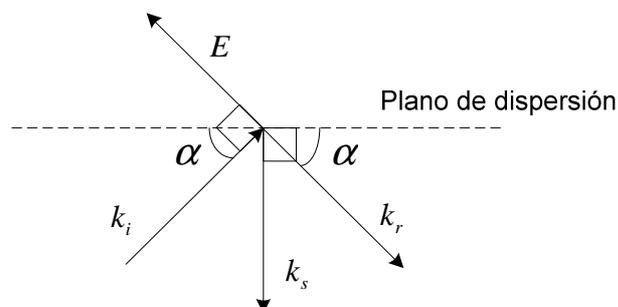


Figura 1.7. Condición de Bragg para la dispersión de las ondas de radio (adaptado de [11])

1.1.4. Parámetros del EEJ como canal de comunicaciones

El EEJ se puede caracterizar como un canal variante en el tiempo, debido a que su respuesta a una determinada señal no será la misma para distintos instantes de tiempo. Entre sus principales parámetros podemos mencionar la relación señal a ruido (SNR), el ensanchamiento espectral, el cual está asociado al tiempo de coherencia del canal, y la dispersión del retardo, relacionada al ancho de banda de coherencia del canal. [5][12][13][14]

1.1.4.1. Relación señal a ruido (SNR)

La relación señal a ruido (SNR o S/N, *Signal to Noise Ratio*) se define como el cociente de la potencia de la señal entre la potencia del ruido medidas en un mismo punto de un sistema. Cuanto menor sea el SNR, el efecto del ruido será más perjudicial. Está expresado por la ecuación 1.1 en función de la potencia (P) o el voltaje (A):

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{señal}}{P_{ruido}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{señal}}{A_{ruido}} \right) \quad \dots 1.1$$

En las comunicaciones vía el EEJ con sistemas VHF el ruido es causado principalmente por el ruido galáctico (o temperatura del cielo) y, en menor grado, por el ruido de los equipos.

1.1.4.2. Ensanchamiento espectral y tiempo de coherencia del canal

El ensanchamiento espectral o ensanchamiento Doppler (*Doppler spread*) y el tiempo de coherencia (*coherence time*) son inversamente proporcionales y constituyen una medida de la dispersión en frecuencia del canal.

En el caso de comunicaciones vía EEJ, el desplazamiento Doppler consiste en el cambio en frecuencia de la señal debido al movimiento turbulento de las irregularidades que producen los ecos del EEJ. La varianza de los diferentes valores de desplazamiento Doppler que sufren las componentes de la señal al ser dispersadas en estas irregularidades provoca una dispersión en frecuencia de dicha señal, lo cual se denomina ensanchamiento espectral. El máximo desplazamiento

en frecuencia debido a este ensanchamiento se conoce como ancho espectral (D_s), el cual, para el EEJ, toma valores en el rango de 20 a 100 Hz [15].

El tiempo de coherencia del canal (T_c) es el tiempo durante el cual la respuesta al impulso del canal es considerada invariante. Este parámetro determina la máxima separación en tiempo para que dos señales estén correlacionadas, por lo que se le denomina también tiempo de correlación. Para tiempos de separación mayores a T_c , el canal afectará las señales de manera distinta, por lo que éstas no estarán correlacionadas y serán independientes entre sí.

El tiempo de coherencia indica también el período de ocurrencia de los desvanecimientos en la señal. El valor de este parámetro es aproximadamente el inverso del ancho espectral:

$$T_c \cong \frac{1}{D_s} \quad \dots 1.2$$

1.1.4.3. Dispersión del retardo y ancho de banda de coherencia

La dispersión del retardo (*delay spread*) y el ancho de banda de coherencia (*coherence bandwidth*) son inversamente proporcionales y constituyen medidas de la dispersión temporal del canal de comunicaciones.

Debido al espesor del EEJ, las contribuciones de la señal transmitida llegan al receptor en diferentes instantes de tiempo, lo cual provoca retardos distintos que producen una dispersión temporal de la señal. La diferencia entre los instantes de tiempo en los que se reciben la primera y la última componente de la señal se conoce como dispersión del retardo (T_m).

El ancho de banda de coherencia del canal (B_c) es inversamente proporcional a la dispersión del retardo. Este parámetro indica la máxima separación en frecuencia para la cual dos señales pueden estar correlacionadas. Si la separación entre las frecuencias de dos señales es menor que este parámetro, ambas sufrirán desvanecimientos similares y, por tanto, guardarán cierto grado de

correlación. De lo contrario, las señales no estarán correlacionadas y serán independientes entre sí.

El valor del ancho de banda de coherencia es el inverso de la dispersión del retardo:

$$B_c \cong \frac{1}{T_m} \quad \dots 1.3$$

En el caso del EEJ, este parámetro está determinado por el espesor de la capa del EEJ, la cual abarca 15 km.

1.2. Desvanecimientos

Los desvanecimientos (*fading*) se refieren a la reducción de la potencia que sufre una señal a través de un medio de propagación. Se producen como consecuencia de la refracción, reflexión, difracción y atenuación de las ondas de radio, lo cual provoca la suma constructiva o destructiva de las distintas componentes de la señal transmitida [16].

1.2.1. Clasificación de los desvanecimientos

Los desvanecimientos pueden clasificarse de acuerdo a dos criterios [14]:

- Según la velocidad con la que cambia el canal en comparación a las variaciones de la señal, pueden clasificarse en desvanecimientos lentos (*slow fading*) y rápidos (*fast fading*). Los primeros se producen cuando el tiempo de coherencia del canal es mayor que la variación en tiempo de la señal transmitida, lo cual provoca que la amplitud y fase de la señal impuestas por el canal sean consideradas más o menos constantes. Caso contrario, se producen desvanecimientos rápidos, caracterizados por su corta duración, durante la cual la amplitud y la fase impuestas por el canal varían considerablemente.
- De acuerdo a la forma cómo afectan los desvanecimientos al espectro de frecuencias de señal, pueden clasificarse en desvanecimientos planos (*flat*

fading) y desvanecimientos selectivos en frecuencia (*frequency selective fading*). Los primeros provocan que todas las componentes frecuenciales de la señal experimenten el mismo desvanecimiento y se producen cuando el ancho de banda de la señal transmitida es menor que el ancho de banda de coherencia del canal. Si el ancho de banda de la señal es mayor, ésta sufrirá desvanecimiento selectivo en frecuencia, el cual provoca la distorsión de la señal.

1.2.2. Modelos estadísticos de los desvanecimientos: desvanecimiento de Rayleigh

Los desvanecimientos producen una variación temporal de la amplitud y fase de la señal transmitida, por lo que suelen modelarse como procesos aleatorios. Según su distribución estadística, se clasifican en los siguientes tipos: desvanecimiento normal, Rayleigh, Nakagami, Rice, log-normal, Weibull, etc.

El desvanecimiento de Rayleigh es un modelo estadístico usado en la propagación de señales en ambientes en los cuales existen muchos obstáculos entre el transmisor y el receptor que atenúan, reflejan, refractan y difractan las ondas de radio [16][17]. Por este motivo, suele emplearse para modelar la propagación en ambientes urbanos, así como en la propagación a través de la tropósfera e ionósfera, en las cuales se presentan pequeñas partículas (como en el caso del EEJ) que provocan la dispersión de la señal.

Si existe suficiente dispersión, de acuerdo con el teorema del límite central, la respuesta al impulso del canal puede ser modelada como un proceso gaussiano, independientemente de la distribución de sus componentes individuales. Si no existe una componente dominante en la dispersión, entonces ese proceso tendrá media cero y fase distribuida uniformemente entre 0 y 2π radianes. La envolvente de la respuesta del canal presentará una distribución de Rayleigh, cuya función de densidad de probabilidad para una variable aleatoria x está dada por la siguiente ecuación:

$$p(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\left(\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)} & , (0 < x \leq \infty) \\ 0 & , (x \leq 0) \end{cases} \quad \dots 1.4$$

donde σ es el valor RMS del voltaje recibido de la señal antes de la detección de la envolvente.

La amplitud de la respuesta del canal suele representarse como un número complejo. En este caso, las partes real ($I(t)$) e imaginaria ($Q(t)$) son modeladas como procesos gaussianos independientes e idénticos de media cero, de modo que la envolvente de la respuesta está dada por $\sqrt{I(t)^2 + Q(t)^2}$.

La figura 1.8 muestra la variación en potencia de una señal después de pasar por un canal con desvanecimiento de Rayleigh y con un ancho espectral de 20 Hz. En esta gráfica observamos la presencia de desvanecimientos, con caídas de potencia de hasta 35 dB, aproximadamente.

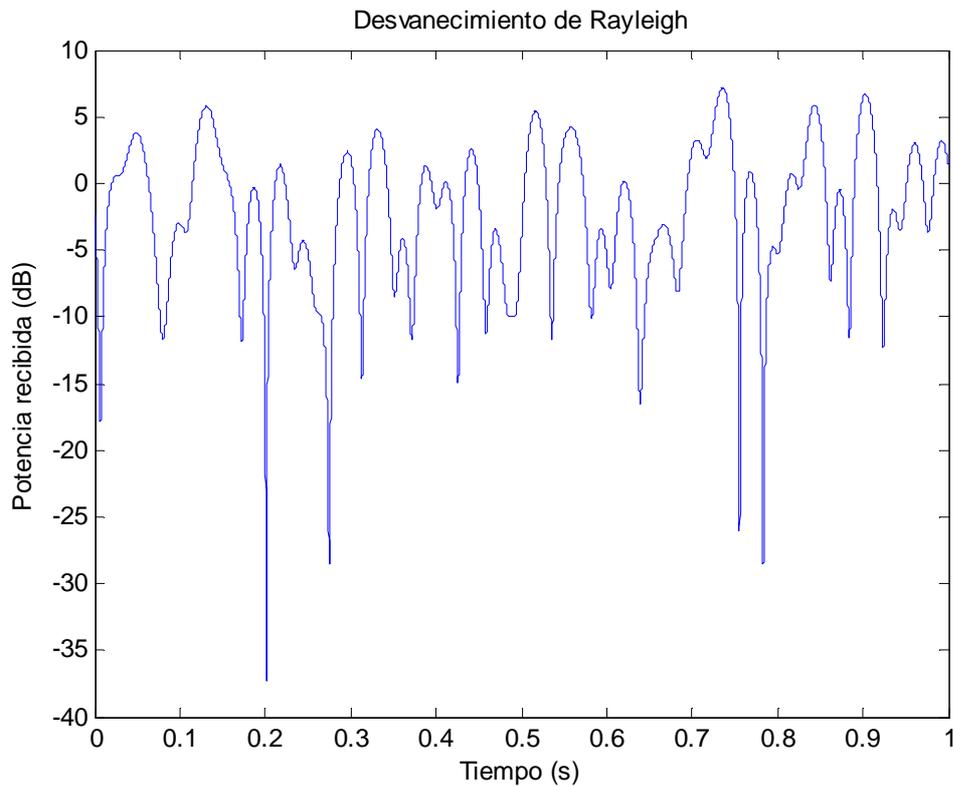


Figura 1.8. Desvanecimiento de Rayleigh para un ancho espectral de 20 Hz

En el caso de las comunicaciones vía el EEJ, los desvanecimientos son producto del movimiento turbulento de las irregularidades que ocasiona el eco. Debido al movimiento de estas irregularidades, las distintas componentes dispersadas de la señal sufren un desplazamiento en frecuencia cuya varianza

provoca ensanchamiento espectral de la señal, como se mencionó en la sección 1.1.4.2. La señal recibida sufrirá un desvanecimiento con un tiempo característico inversamente proporcional al ancho espectral de los ecos del EEJ. Ello provoca desvanecimientos profundos durante períodos muy cortos de tiempo, cuya aparición se origina a una razón de 20 a 100 Hz. Si las irregularidades del EEJ permanecieran estáticas, el ancho espectral debido al EEJ sería cero, por lo que no ocurrirían desvanecimientos en la misma.

1.3. Técnicas para contrarrestar el desvanecimiento: diversidad

Los efectos de los desvanecimientos pueden combatirse de distintas formas. Para reducir los desvanecimientos es posible sobredimensionar el enlace, lo cual se logra a través de las siguientes opciones: empleando antenas de mayor ganancia, usando receptores de mayor sensibilidad, disponiendo de mayor potencia de transmisión, entre otras formas.

Si no es posible reducir el desvanecimiento, puede emplearse un *squelch* o silenciador [18] para disminuir sus efectos en la percepción de la voz recibida. Este *squelch* suprimirá el audio durante el tiempo en el que la potencia de la señal se encuentre debajo de un umbral de recepción establecido. Se silenciará la señal en los momentos en los que se producen los desvanecimientos, con lo cual se percibirá una voz menos ruidosa, pero no se logrará una mejora real de la calidad de la misma. En el caso de la transmisión de datos, tampoco se espera ninguna mejora producto de la aplicación de esta técnica.

Una forma efectiva de mitigar los desvanecimientos en la señal consiste en emplear técnicas alternativas de transmisión y recepción, entre las cuales se destacan las siguientes:

- Técnicas de diversidad, las cuales serán explicadas en la sección siguiente.
- *Interleaving*, técnica que permite proteger la información frente a errores de tipo ráfaga (*burst errors*), los cuales afectan bits consecutivos de información. Aplicando *interleaving*, los errores se distribuyen en distintos *codewords* o palabras, tras lo cual se aplican técnicas de detección y corrección de errores, como códigos de paridad, cíclicos, de bloques (Hamming, Reed Solomon) y convolucionales (Trellis, Viterbi, Turbo códigos).

- OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), técnica de modulación digital que consiste en la transmisión de los datos divididos en múltiples canales, cada uno de los cuales está modulado por una subportadora. Estas subportadoras son ortogonales entre sí y son moduladas digitalmente a una tasa de símbolos menor (por lo cual resulta robusta frente a los desvanecimientos), manteniendo así la tasa de transmisión total obtenida en los esquemas típicos con una sola portadora.
- MIMO (*Multiple-Input, Multiple-Output*), esquema que consiste en emplear múltiples antenas tanto en la transmisión como en la recepción, con lo cual se logra mejorar la calidad de las comunicaciones sin la necesidad de ancho de banda adicional o mayor potencia de transmisión. Algunos ejemplos de esta tecnología son: *beamforming*, la cual consiste en direccionar la transmisión o recepción de la señal mediante el desfase de distintas antenas; multiplexación espacial, que consiste en dividir una señal de mayor ancho de banda en señales de menor ancho de banda, las que serán transmitidas usando múltiples antenas a través de diferentes canales espaciales; y diversidad de código, que se basa en el envío de múltiples copias de la información, las cuales son codificadas empleando códigos de espacio-tiempo y transmitidas a través de distintas antenas.

Este trabajo de tesis se enfocará en el uso de la técnica de diversidad. Diversidad consiste en la transmisión de la misma información a través de dos o más caminos radioeléctricos distintos con la finalidad de combatir las degradaciones del canal de comunicaciones [19]. Cada uno de dichos trayectos radioeléctricos se ve afectado de forma independiente por los desvanecimientos, por lo que se busca proporcionar al receptor distintas versiones no correlacionadas de la misma señal transmitida, las cuales serán combinadas para finalmente conseguir una señal de mayor calidad que las originales. De esta manera, se obtiene una ganancia por diversidad, con la cual se logra disminuir la tasa de error del sistema y mejorar la calidad de las comunicaciones.

Las técnicas de diversidad son de suma utilidad para contrarrestar los efectos del canal en presencia de los desvanecimientos rápidos (como los presentados en las comunicaciones vía EEJ), debido a la aleatoriedad y corta duración de los mismos y la independencia entre los distintos canales. No es provechoso emplear estas técnicas en el caso de desvanecimientos lentos debido a

su mayor duración, por lo cual, al producirse una caída de potencia, el receptor solo vería una realización del canal en el tiempo.

1.3.1. Técnicas de diversidad

Existen distintos esquemas de diversidad [13], entre los cuales destacan los siguientes:

a) Diversidad en tiempo.- Consiste en enviar varias veces la misma señal en distintos instantes de tiempo (t_1 y t_2), como se observa en la figura 1.9. El tiempo de separación entre una transmisión y la siguiente debe ser mayor que el tiempo de coherencia del canal ($\Delta t > T_c$). De esta manera, el canal habrá variado significativamente y los desvanecimientos producidos en ambas transmisiones no estarán correlacionados.

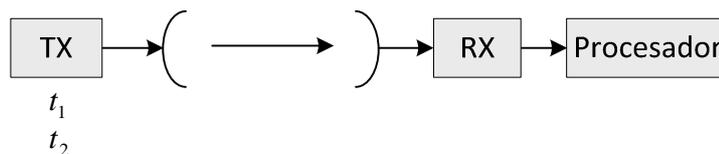


Figura 1.9. Diversidad en tiempo

b) Diversidad en frecuencia.- Se transmite la misma señal usando dos o más portadoras en frecuencias distintas (f_1 y f_2) separadas entre sí por lo menos el ancho de banda de coherencia del canal ($\Delta f > B_c$), de modo que las condiciones del canal sean estadísticamente distintas. El equipo mínimo por estación incluye una antena, dos transmisores y dos receptores, como se muestra en la figura 1.10. La desventaja de esta técnica es que requiere de un canal adicional para transmitir el mismo volumen de información.

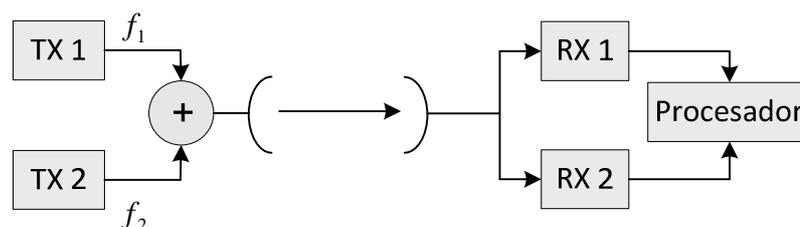


Figura 1.10. Diversidad en frecuencia

c) Diversidad en espacio.- La señal se transmite a través de dos trayectos radioeléctricos distintos, como se observa en la figura 1.11, lo cual puede lograrse empleando múltiples antenas para la transmisión (diversidad en transmisión), múltiples antenas para la recepción (diversidad en recepción) o ambos. La separación física entre dichas antenas (Δd) debe ser una cantidad apreciable de longitudes de onda, de modo que pueda asegurarse condiciones de propagación estadísticamente independientes para cada una de las señales recibidas en las antenas [20]. La ventaja de este tipo de diversidad es que proporciona un empleo eficiente del espectro de frecuencias, además de proporcionar una redundancia de ruta.

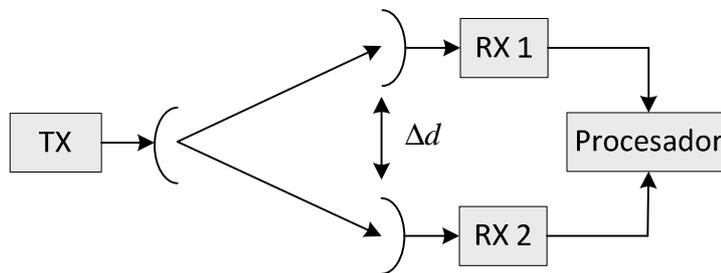


Figura 1.11. Diversidad en espacio

d) Diversidad en polarización.- Se propaga simultáneamente la misma portadora de radiofrecuencia con dos polarizaciones electromagnéticas distintas, con lo cual cada señal queda sometida a degradaciones de propagación independientes. En la figura 1.12 se muestra un par de antenas polarizadas en sentido vertical y otro par polarizadas en sentido horizontal, con lo cual finalmente se obtienen dos señales con desvanecimientos no correlacionados.

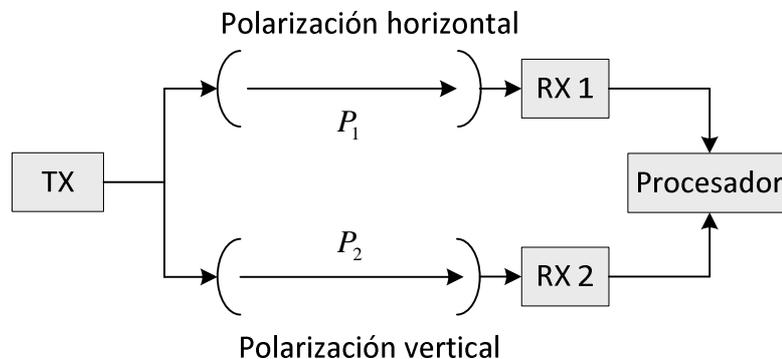


Figura 1.12. Diversidad en polarización

1.3.2. Métodos de combinación de señales en sistemas con diversidad

Una vez obtenidas las señales que contienen la misma información, es necesario combinarlas para finalmente conseguir una señal resultante que requiere de la aplicación de una o más de las siguientes técnicas [13][21]:

a) Combinación por conmutación.- Consiste en conmutar entre señales cuando el voltaje se halla debajo de un umbral predefinido. El diagrama de bloques se presenta en la figura 1.13. Una de las señales pasa por el receptor, se mide su potencia, se adapta a un nivel a través un CAG (Control Automático de Ganancia) y finalmente se demodula. Si este nivel se encuentra debajo del umbral, se conmuta a la otra señal. Puede originar errores en la detección debido a que la conmutación produce transitorios de amplitud y fase.

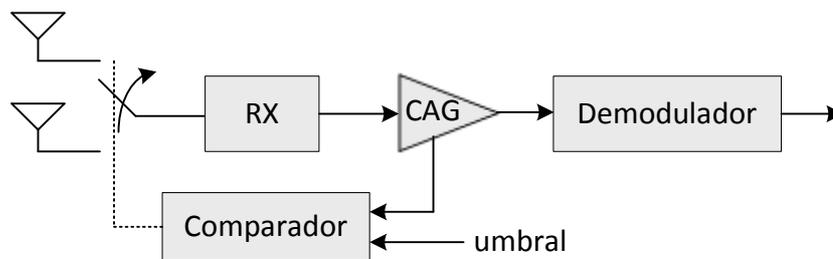


Figura 1.13. Combinación por conmutación (adaptado de [21])

b) Combinación por selección.- En este caso, el número de receptores empleado es igual al orden de la diversidad. Se monitorea la potencia de cada señal y se escoge aquella que tenga el mayor nivel en cada instante, como se aprecia en la figura 1.14. Al igual que en el caso del combinador por conmutación, produce transitorios de amplitud y fase, por lo que puede ocasionar errores en la detección.

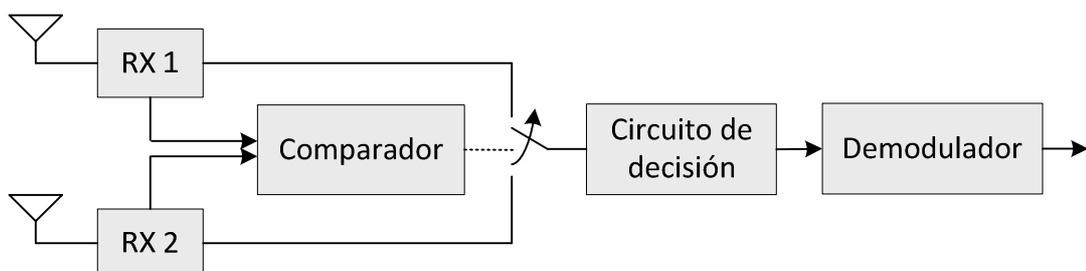


Figura 1.14. Combinación por selección (adaptado de [21])

c) Combinación por equiganancia.- Se otorga el mismo peso a cada una de las señales recibidas, las cuales son sumadas coherentemente para obtener una señal resultante de mayor calidad que las originales, como se muestra en la figura 1.15. Tiene como ventaja que no produce transitorios y es fácil de implementar.

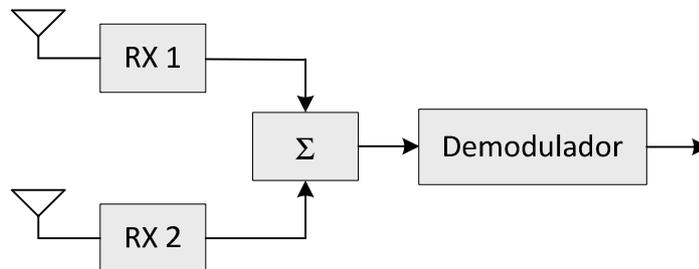


Figura 1.15. Combinación por equiganancia (adaptado de [21])

d) Combinación por tasa máxima (Maximum Ratio Combining, MRC).- Opera de manera similar al esquema anterior, con la diferencia de que cada rama se pondera proporcionalmente a su propio SNR, como se aprecia en la figura 1.16. La ventaja que ofrece es que se le da mayor peso a las señales que posean mayor potencia, de manera que se evita sumarlas independientemente de su calidad, como en el caso anterior. Este tipo de procesamiento de diversidad es el más difícil de implementar, pero es el que ofrece mejores resultados.

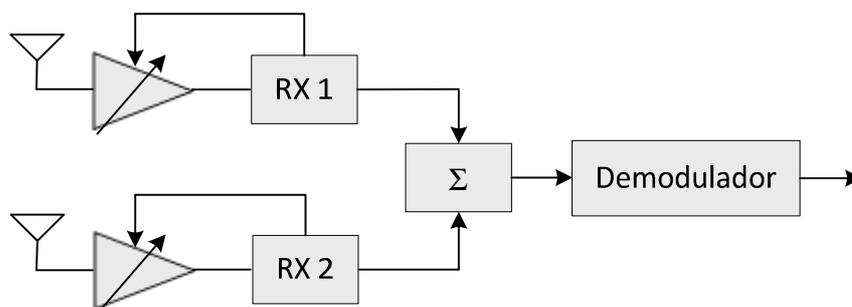


Figura 1.16. Combinación por tasa máxima (adaptado de [21])

1.4. Tipos de modulación empleados

Por lo general, no es posible transmitir las señales de información directamente a través del canal de comunicaciones. Por este motivo, es necesario modificar algunos de sus parámetros. Este proceso se conoce como modulación y consiste en modificar el valor de algún parámetro de la señal portadora de alta

frecuencia en función de las variaciones de la señal moduladora que se desea transmitir. La señal resultante se denomina señal modulada. Para recuperar el mensaje en el receptor se realiza el proceso inverso, el cual recibe el nombre de demodulación.

A continuación se describen los tipos de modulación analógica y digital empleados en el presente trabajo.

1.4.1. Modulación analógica

Los tipos de modulación analógica empleados en las simulaciones y pruebas del presente trabajo son los siguientes:

1.4.1.1. Modulación en amplitud (AM), Doble Banda Lateral (DSB) y Banda Lateral Única (SSB)

En estos tipos de modulación lineales se varía la amplitud de la portadora en función de la señal moduladora.

Se considera una señal moduladora expresada de la siguiente forma:

$$x(t) = A_m \cos(2\pi f_m t) \quad \dots 1.5$$

donde A_m y f_m son la amplitud y frecuencia de la señal moduladora, respectivamente

La señal portadora es la siguiente:

$$v_c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) \quad \dots 1.6$$

donde A_c y f_c son la amplitud y frecuencia de la portadora, respectivamente

En el caso de la **modulación en Doble Banda Lateral** (DSB, *Double Side Band*), la señal modulada presenta la siguiente forma:

$$y(t) = x(t)A_c \cos(2\pi f_c t) \quad \dots 1.7$$

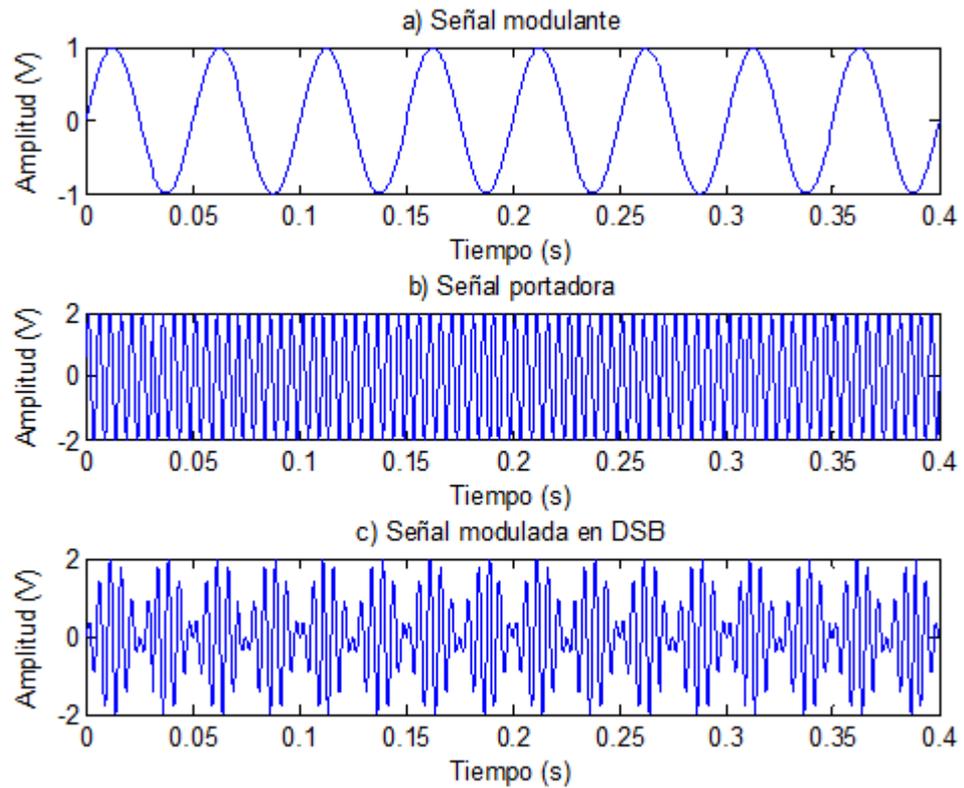


Figura 1.17. Señales a) moduladora, b) portadora y c) modulada en DSB

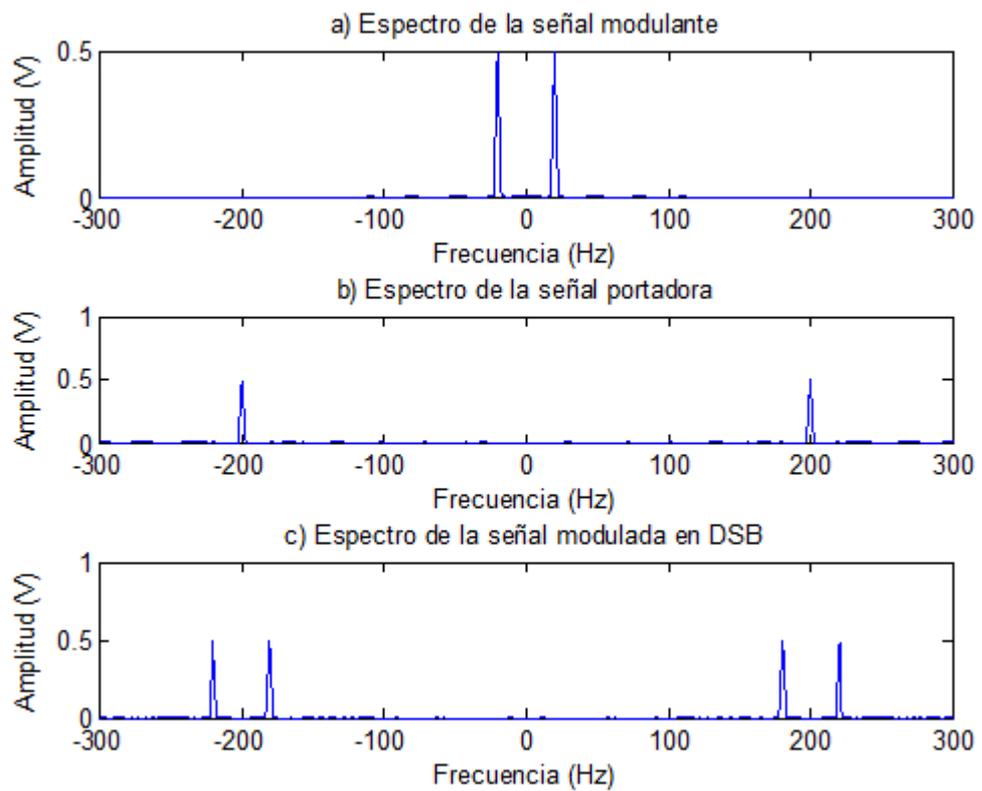


Figura 1.18. Espectro de las señales a) moduladora, b) portadora y c) modulada en DSB

La forma de onda de las señales moduladora, portadora y modulada en DSB se muestran en la figura 1.17. El espectro de cada una de estas señales se aprecia en la figura 1.18. En ésta se observa que el espectro de la señal de información se encuentra duplicado, por lo que se emplea el doble del ancho de banda original.

La **modulación AM** (*Amplitude Modulation*) se distingue de la modulación DSB en que incorpora una portadora piloto, por lo que se requiere mayor potencia de transmisión. Esta portadora es insertada con la finalidad de facilitar la recuperación de la señal y reducir así la complejidad de los circuitos en la recepción, por lo cual es usado en la radiodifusión AM comercial. La señal modulada en AM tiene la siguiente forma:

$$y(t) = A_c [1 + m \cdot x_N(t)] \cos(2\pi f_c t) \quad \dots 1.8$$

donde

$x_N(t) = x(t) / A_m$ es la señal moduladora normalizada

$m = A_m / A_c$ es el índice de modulación (menor que 1)

A_c y f_c son la amplitud y frecuencia de la portadora, respectivamente

En la figura 1.19 se muestra la señal modulada AM para un índice de modulación de 0.5 considerando la misma señal moduladora y portadora del ejemplo para DSB. Su espectro se grafica en la figura 1.20. En ésta se observa que, a diferencia de la figura 1.18, el espectro de la señal modulada incluye la presencia de una gran portadora, para cuya transmisión se emplea dos tercios de la potencia total. El otro tercio se reparte en las dos bandas laterales, las cuales transportan la misma información.

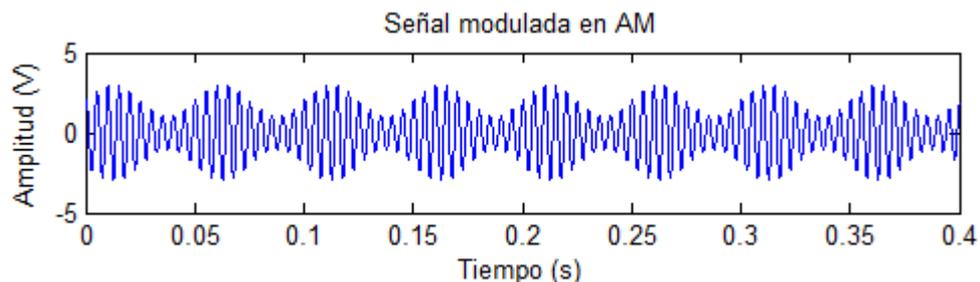


Figura 1.19. Señal modulada en AM

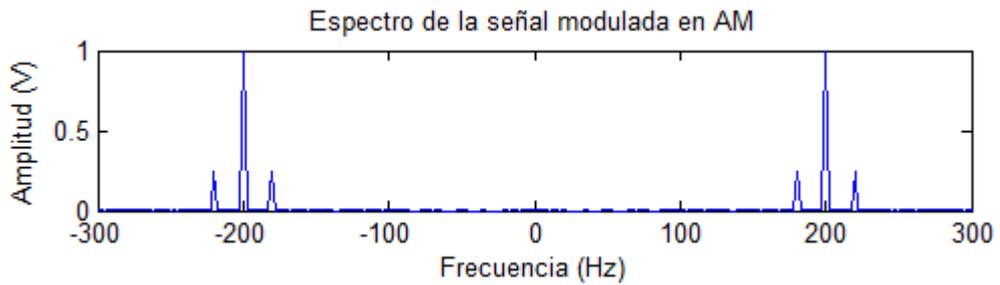


Figura 1.20. Espectro de la señal modulada en AM

Finalmente, la **modulación en Banda Lateral Única** (SSB, *Single Side Band*) es similar a la DSB, con la diferencia de que solo se transmite ya sea la Banda Lateral Superior (USB, *Upper Side Band*) o la Banda Lateral Inferior (LSB, *Lower Side Band*) debido a que éstas contienen la misma información. De esta forma, a comparación de los dos tipos de modulación descritos anteriormente y como se muestra en la gráfica de su espectro en la figura 1.21, permite lograr una mayor eficiencia de potencia (la totalidad de la potencia de transmisión se aprovecha en el envío de la información) y una mayor eficiencia espectral (el ancho de banda de la señal modulada es el mismo que el de la moduladora). La desventaja es que requiere de circuitos más complejos y costosos.

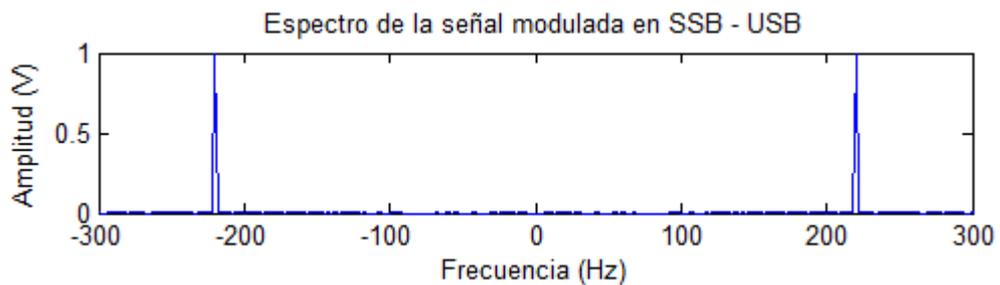


Figura 1.21. Espectro de la señal modulada SSB - USB

1.4.1.2. Modulación en frecuencia (PM) y Modulación de fase (FM)

En estos tipos de modulación se varía el ángulo de la portadora en función de la señal de información, por lo que son considerados tipos de modulación angular.

La **modulación PM** (*Phase Modulation*) consiste en variar la fase de la portadora en función de la amplitud de la señal de información, mientras que en la **modulación FM** (*Frequency Modulation*) la información va contenida en la variación

instantánea de la frecuencia. En la figura 1.22 se observa el gráfico de las señales moduladora, portadora, modulada en PM y modulada en FM.

Para la misma señal moduladora y portadora consideradas en los casos de modulación en amplitud, la señal modulada en fase se caracteriza por su máxima desviación de fase o índice de modulación (β) y se expresa de la siguiente manera:

$$y(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \beta x_N(t)) \quad \dots 1.9$$

Por otro lado, la señal modulada en frecuencia se caracteriza por su máxima desviación de frecuencia (Δf) y se define de la siguiente forma:

$$y(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + 2\pi \Delta f \int_{-\infty}^t x_N(\tau) d\tau) \quad \dots 1.10$$

El índice de modulación para FM se define como $m_p = \frac{\Delta f}{f_m}$, donde f_m es la frecuencia máxima de la señal moduladora. Si $m_p < 0.2$, se considera FM de banda angosta (FM-NB), en el cual el ancho de banda puede considerarse el mismo que en AM ($2f_m$). En el caso contrario, se considera como FM de banda ancha.

Las modulaciones angulares crean un conjunto de bandas laterales cuya extensión depende de su índice de modulación. Como consecuencia, el ancho de banda requerido es más grande que en el caso de modulación en amplitud. Este ancho de banda puede ser aproximado mediante la regla de Carson.

Para PM: $B = 2(\beta + 1) f_m$

Para FM: $B = 2(m_p + 1) f_m$ ó $B = 2(\Delta f + f_m)$...1.11

La ventaja de las modulaciones angulares sobre las modulaciones de amplitud es que las primeras se ven menos afectadas ante variaciones en el nivel de la señal, lo que las hace menos vulnerables frente al ruido e interferencias, debido a que la información se transporta en la fase o frecuencia de la señal. Por

este motivo, las señales así moduladas presentan una mejor calidad y un mayor nivel de SNR. La desventaja de estos tipos de modulación es que suelen ocupar un mayor ancho de banda que las modulaciones de amplitud y, además, requieren de circuitos más complejos.

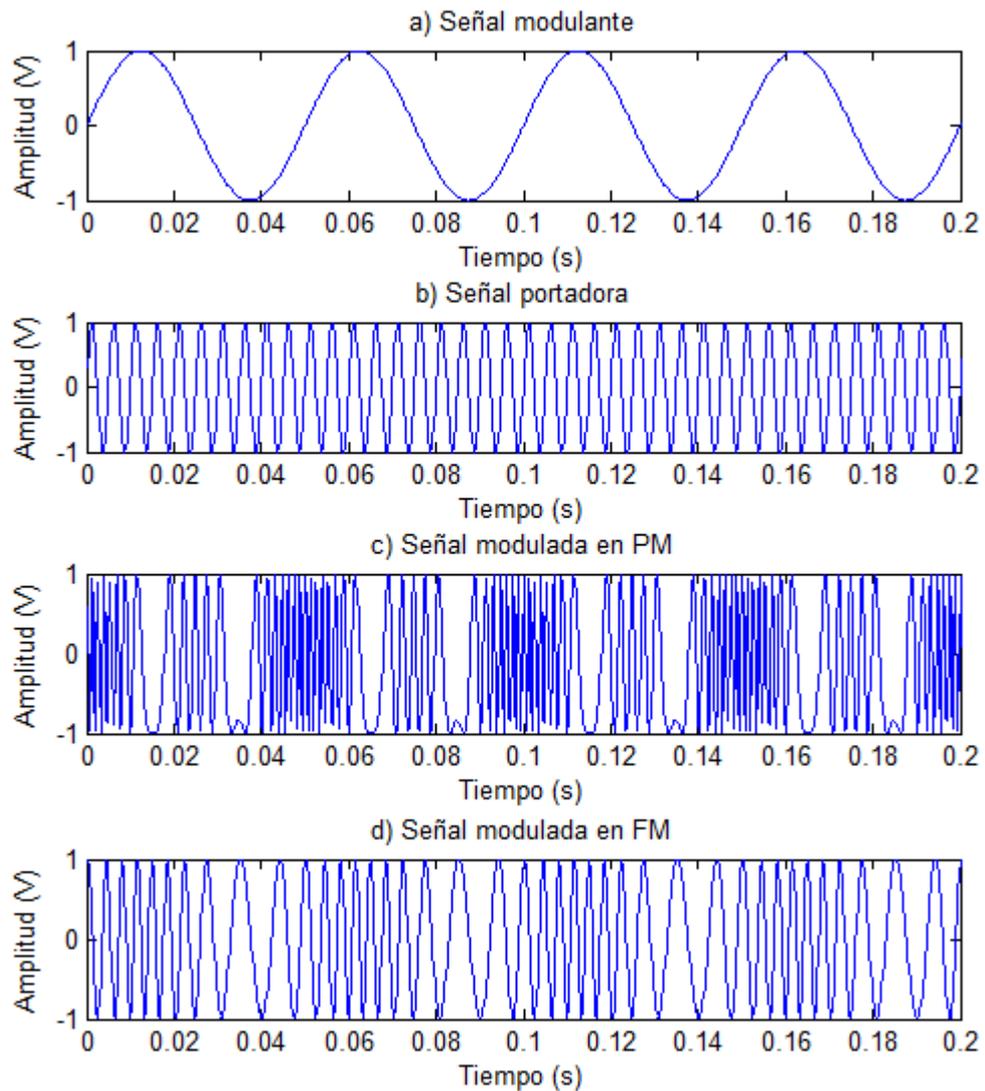


Figura 1.22. Señales a) moduladora, b) portadora, c) modulada en PM y d) modulada en FM

1.4.2. Modulación digital

Los esquemas de modulación digital empleados en las simulaciones y pruebas de campo son las siguientes:

1.4.2.1. Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK)

La modulación ASK (*Amplitude Shift Keying*) consiste en la transmisión de los datos en la variación de la amplitud de la portadora. De manera similar a los tipos de modulación analógica de amplitud, la desventaja de ASK reside en que es sensible frente al ruido e interferencias, pero presenta la ventaja de que requiere de circuitos simples y económicos. En la figura 1.23 se muestra la gráfica de una secuencia de bits enviada (a) y la señal modulada en ASK (b). Se observa que la amplitud de la modulada toma dos posibles niveles dependiendo del dato ingresado.

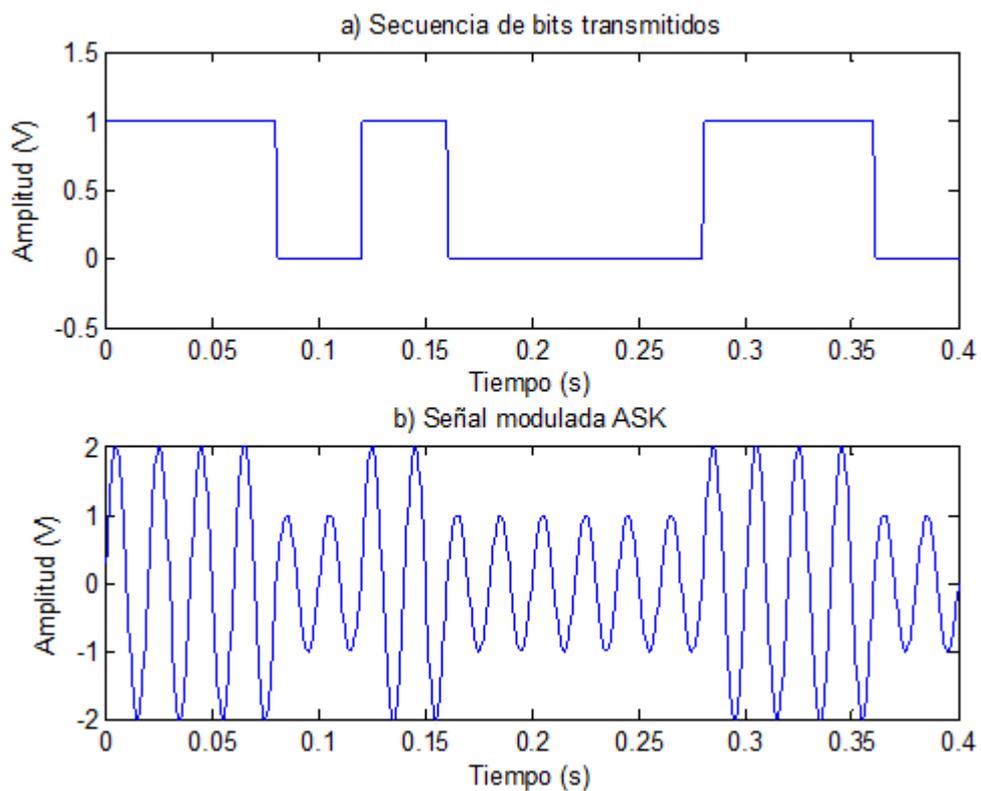


Figura 1.23. a) Secuencia de bits transmitidos y b) señal modulada en ASK

1.4.2.2. Modulación por desplazamiento de fase (PSK)

La modulación PSK (*Phase Shift Keying*) consiste en enviar los datos cambiando la fase de la portadora.

El número de fases se denota como M y debe ser una potencia de dos, de modo que $M = 2^k$, donde k es el número de bits necesarios para representar la

información de fase. Para 2 fases se denomina BPSK (*Binary Phase Shift Keying*); para 4 fases, QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*); para 8 fases, 8-PSK, etc. A mayor número de fases, se podrá transmitir mayor cantidad de bits por símbolo, pero la señal será más sensible a ruidos e interferencias debido a la menor separación entre las fases.

En la figura 1.24 se muestra la secuencia de bits del ejemplo anterior modulados en BPSK. Aquí se observa que las fases empleadas para representar cada uno de los estados lógicos son 0 y 180°.

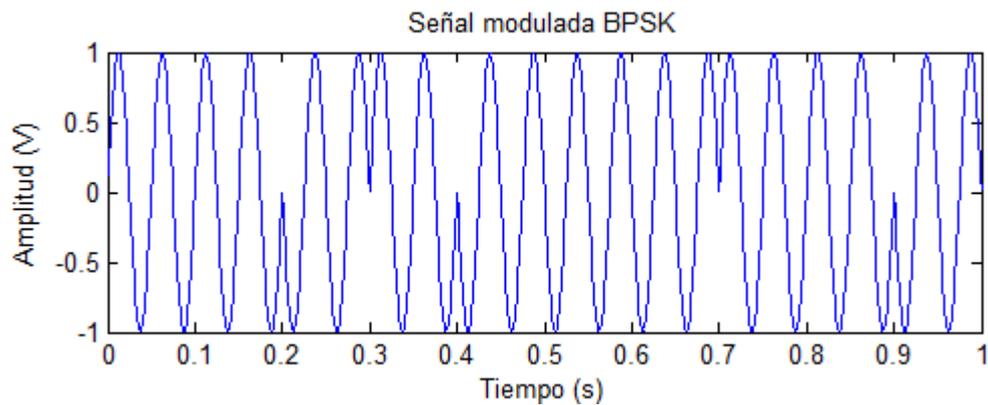


Figura 1.24. Señal modulada en BPSK para la secuencia de bits de entrada mostrada en la figura 1.23 a)

En la figura 1.25 se presenta el ejemplo de una señal modulada en QPSK. Se observa que cada símbolo representa dos bits, con lo cual se dispone de cuatro fases distintas para transmitir la información. En el ejemplo, la secuencia de bits '00' corresponde a una fase de 45°, la secuencia '01', a una fase de 135°, la secuencia '10', a una fase de 225°, y la secuencia de bits '1 1', a una fase de 315°.

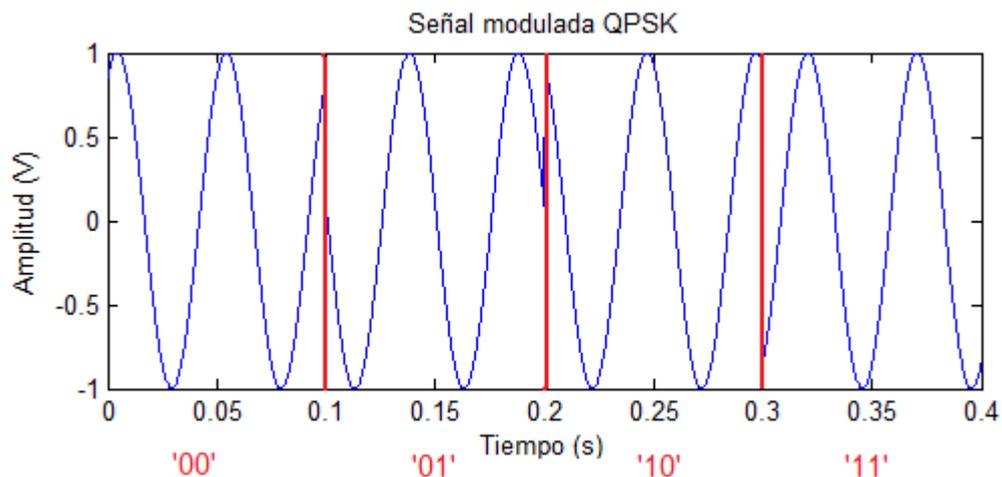


Figura 1.25. Señal modulada en QPSK

PSK31 (*Phase Shift Keying, 31 Baud*) es un tipo de modulación digital por cambio de fase ampliamente usado por los radioaficionados para realizar comunicaciones en tiempo real de teclado a teclado.

Para el empleo de este tipo de modulación es necesario contar con un software de radioaficionados instalado en una PC. Los caracteres ingresados por teclado son modulados por dicho software en tonos dentro del canal de voz que se transmiten por la tarjeta de sonido a la radio. En la recepción se realiza el proceso inverso: el software demodula el tono recibido y muestra en pantalla los caracteres recibidos.

PSK31 trabaja a una velocidad de 31.25 baudios y emplea un ancho de banda de 31.25 Hz. Emplea códigos de longitud variable (*Varicode*), los cuales representan los caracteres usados con mayor frecuencia con códigos más cortos, con lo que se logra transmitir la información usando una menor cantidad de bits. La ventaja de PSK31 reside en su eficiencia y reducido ancho de banda, por lo que resulta adecuada para enlaces con reducido espectro disponible y entornos con condiciones de propagación pobres, motivo por el que es el modo digital más ampliamente usado por los radioaficionados. Ofrece una tasa de transmisión media de 50 palabras por minuto, la cual es adecuada para comunicaciones tipo chat, pero resulta demasiado lenta para transferencia de archivos.

El modo QPSK31 (*Quadrature Phase Shift Keying, 31 Baud*) emplea 4 fases para la transmisión de la información. A diferencia de PSK31, que no provee control de errores, QPSK31 emplea la codificación Viterbi para la corrección de errores. Por este motivo, bajo condiciones de SNR moderado o alto, con QPSK31 se recibe una señal de mejor calidad, mientras que, para SNR bajo, es más conveniente el uso de PSK31.

1.4.2.3. Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK)

La modulación FSK (*Frequency Shift Keying*) permite enviar los datos a través de la frecuencia de la portadora. Este tipo de modulación se caracteriza por poseer un gran ancho de banda y alta inmunidad frente al ruido aditivo del canal, pero presenta como desventaja que la señal modulada ocupa un mayor ancho de banda que ASK.

La forma más simple de FSK se denomina BFSK (*Binary Frequency Shift Keying*) y transmite la información en un par de frecuencias que representan '0' y '1'. En la figura 1.26 se muestra la señal modulada considerando la misma secuencia de bits que en la gráfica 1.23. a).

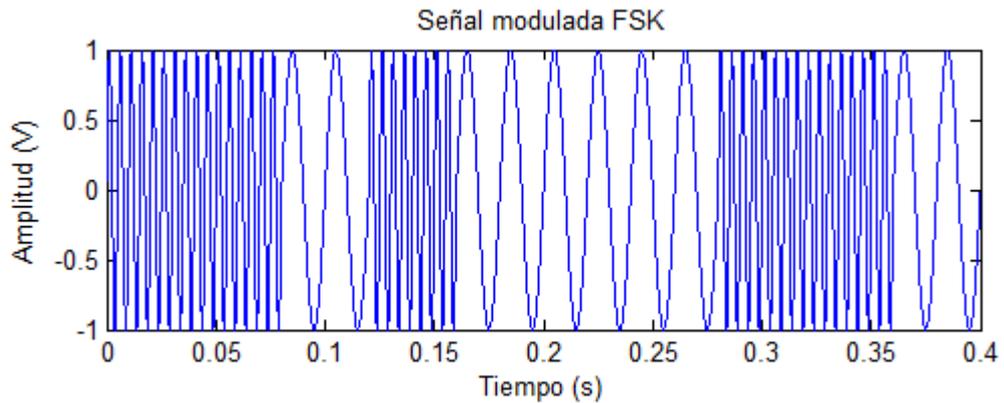


Figura 1.26. Señal modulada en FSK para la secuencia de bits de entrada mostrada en la figura 1.23 a)

1.4.2.4. Radiopaquetes

El modo de transmisión digital por radiopaquetes (*Packet Radio*) consiste en enviar datos a través de ráfagas de paquetes que serán luego reensamblados en el destino final. Emplea el protocolo de enlace de datos AX.25 (*Amateur X.25*), el cual consiste en la adaptación del protocolo X.25 para la radioafición. AX.25 permite la transmisión de paquetes entre dos nodos empleando técnicas de corrección de errores.

La configuración de la estación para la transmisión por radiopaquetes requiere un TNC (*Terminal Node Controller*), el cual consta principalmente un módem y un procesador. El TNC recibe los datos provenientes del puerto serial de la PC, verifica si hay errores en los mismos, los modula y finalmente los transmite en forma de paquetes a la radio. Es posible también emular este terminal empleando software para radioaficionados.

Comúnmente se emplea este modo de transmisión con las siguientes velocidades: 300 (para HF), 1200, 2400 y 9600 baudios. Para velocidades de hasta 1200 baudios se emplea la modulación AFSK (*Audio Frequency Shift Keying*), que consiste en modular los datos empleando frecuencias audibles y luego realizar una

segunda modulación sobre una portadora de RF para la transmisión por el canal. Para tasas superiores se emplea la modulación FSK, en la cual se modulan los datos directamente en la portadora de RF.

1.5. Antecedentes de las comunicaciones vía el EEJ

El Electrochorro Ecuatorial fue identificado y caracterizado en el observatorio de Huancayo a partir de los primeros registros de la variación diaria de la componente horizontal del campo magnético realizados desde 1922, los cuales revelaban que la magnitud de esta componente era superior en latitudes cercanas al ecuador magnético. No fue sino hasta 1957, durante el año Geofísico Internacional, que Cohen y Bowles [3] lograron establecer las primeras comunicaciones a través del EEJ usando como mecanismo la dispersión ionosférica en frecuencias de VHF. A partir de ese momento, se realizaron distintos experimentos, los cuales estaban orientados a estudiar las condiciones de propagación y transmisión más adecuadas para la comunicación a través de este fenómeno.¹

En 1966, Romero, Giesecke y Pérez [22] emplearon la transmisión de una onda continua (CW) y determinaron finalmente que la intensidad de la señal recibida es máxima en horas diurnas y mínima en la noche. Sin embargo, la calidad se ve afectada por desvanecimientos en la señal o *cracks*, los cuales son mínimos durante el día (a razón de 20 Hz) y máximos para las horas de mínima intensidad de la señal, llegando a alcanzar valores de 100 Hz [15]. Posteriormente, Romero realizó experimentos utilizando un equipo comercial de Banda Lateral Única (SSB), con lo cual obtuvo una señal "llorosa" de baja calidad debido a los desvanecimientos [15]. En 1971, Heraud realizó la primera transmisión empleando la modulación FM de banda angosta, con la cual se obtuvo una mayor inteligibilidad de la voz [23], pero afectada por los desvanecimientos.

En 1975, Valladares y Woodman [15], desarrollaron una técnica de simulación análogo-digital de comunicaciones de voz vía EEJ basada en un modelo matemático del canal y del sistema de comunicaciones. Esta técnica permitió estudiar la calidad de los comunicados sin necesidad de implementar físicamente el

¹ En [5] se encuentra una descripción más detallada de los antecedentes de las comunicaciones vía EEJ.

enlace. Se simuló exitosamente la transmisión de voz modulada en FM, con lo cual se generaron audios caracterizados por presentar desvanecimientos, de manera similar a los experimentos previos. Se comprobó que la frecuencia e intensidad de éstos se encuentran determinados por el nivel de SNR y el ancho espectral del EEJ.

Recientemente, Chocos [5] estableció un enlace de comunicaciones vía EEJ entre Jicamarca y Paracas, mediante el cual se comprobó que un buen indicador de la intensidad del EEJ y, por lo tanto, de la calidad de las comunicaciones, lo constituye la diferencia de la componente horizontal del campo magnético medida una fuera y otra dentro de la zona cubierta por el EEJ. Se transmitió voz con distintos tipos de modulación analógica: AM, SSB y FM, con lo cual se comprobó que con esta última es posible alcanzar una mejor calidad, aunque distorsionada por los desvanecimientos. Además, se transmitió datos con el modo PSK31, con el que fue posible obtener una buena inteligibilidad de los comunicados aun en condiciones de bajo SNR.

CAPÍTULO 2

SIMULADOR DE COMUNICACIONES VÍA EL ELECTROCHORRO ECUATORIAL

En este capítulo se presenta un simulador de comunicaciones analógicas y digitales a través del EEJ. Se describen cada uno de los bloques que componen el simulador y se explica el modelo para la generación del EEJ. Se precisan además algunas variaciones del modelo para simular el espesor de este canal de comunicaciones y estudiar algunos de sus parámetros. Finalmente, se detalla el algoritmo para la simulación de diversidad en las comunicaciones.

2.1. Antecedentes

En 1975, C. Valladares y R. Woodman propusieron una técnica de simulación análogo-digital de comunicaciones por dispersión en el EEJ. Dicha técnica empleaba componentes analógicos, tales como amplificadores, integradores, filtros, micrófonos, grabadores y reproductores de cinta magnética, además de incorporar partes hechas digitalmente, como la simulación del canal de comunicaciones y el procesamiento de la voz por computadora, de modo que finalmente se tenía simulado el sistema completo [15].

El objetivo de esta simulación era determinar la calidad de la voz usando distintos tipos de modulación y técnicas no convencionales de recepción (como diversidad) con la finalidad de compararlos e implementar posteriormente el sistema de comunicación con el que se obtenga la mejor calidad de la voz. Para ello, se formuló un modelo matemático del EEJ y se logró modelar el sistema de comunicaciones sin necesidad de implementarlo físicamente. Las simulaciones

efectuadas permitieron analizar la inteligibilidad de las comunicaciones de voz para distintos valores de SNR, para lo cual se empleó la modulación FM de banda angosta. Los audios generados se caracterizaban por presentar desvanecimientos, de manera similar a lo observado en los experimentos de comunicaciones anteriores.

2.2. Modelo simplificado de las comunicaciones vía EEJ

En el presente trabajo se desarrolla un programa de simulación totalmente digital basado en el modelo desarrollado por Valladares y Woodman [15]. La grabación del audio, la simulación del sistema de comunicaciones, el procesamiento de la señal y la evaluación de la calidad de la misma se realizan íntegramente en el computador.

En la figura 2.1 se muestra el diagrama de bloques simplificado del modelo, sobre el cual se basan las simulaciones de comunicaciones analógicas y digitales a través del EEJ.

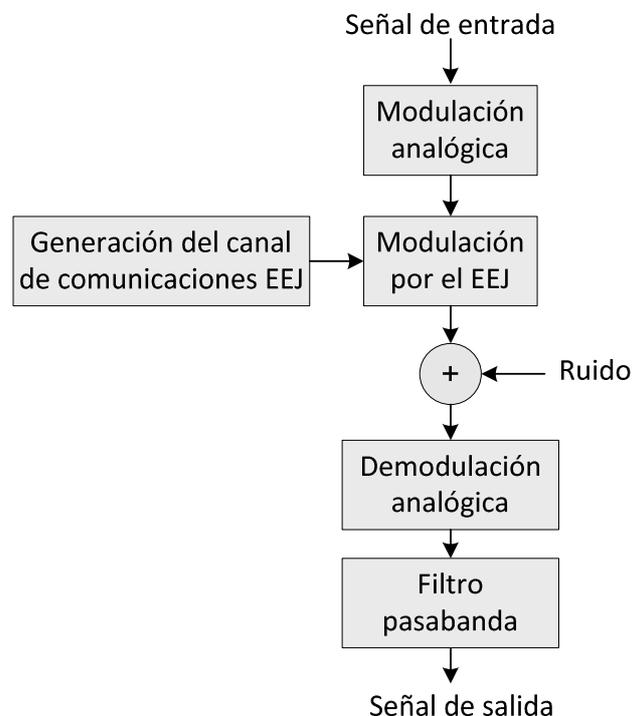


Figura 2.1. Diagrama de bloques del simulador

A continuación se describen los principales bloques empleados en el modelo:

2.2.1. Modulación

Inicialmente, la señal de entrada es muestreada, de modo que cumpla con el criterio de Nyquist, el cual establece que la frecuencia de muestreo debe ser como mínimo el doble de la frecuencia máxima de la señal de entrada.

Una vez muestreada, se realiza la modulación analógica de la señal. En el simulador se implementan distintos tipos de modulación analógica para la transmisión por el canal EEJ, tales como AM (Modulación de Amplitud), DSB (Doble Banda Lateral), SSB-USB (Banda Lateral Única - Banda Lateral Superior), SSB-LSB (Banda Lateral Única - Banda Lateral Inferior) y FM (Modulación de Frecuencia). Además, para los propósitos de las simulaciones, se optó por trabajar con modulación en banda base (dentro del ancho de banda del canal de voz). Si la frecuencia de la portadora fuese mayor, se requeriría incrementar la frecuencia de muestreo para que se siga cumpliendo el criterio de Nyquist, lo cual finalmente provocaría que se sobrecargue el procesamiento en el computador.

2.2.2. Generación del canal de comunicaciones EEJ

A partir de las estadísticas observadas en las transmisiones a través del EEJ, Valladares y Woodman [15] concluyen que es posible modelar el canal de comunicaciones EEJ como un proceso aleatorio gaussiano de espectro gaussiano. Matemáticamente, este proceso está compuesto por dos componentes independientes en fase y cuadratura, estadísticamente idénticos y modelados como procesos gaussianos, los cuales determinan una distribución uniforme en la fase. Debido a estas características, la potencia de la señal puede ser modelada como una distribución de Rayleigh. La representación matemática del proceso de generación del canal de comunicaciones EEJ se detalla en [15].

El modelo matemático mencionado para la simulación del canal EEJ se basa en la generación del canal EEJ como un proceso aleatorio gaussiano de espectro gaussiano. Este puede entenderse como ruido coloreado, es decir, como una señal aleatoria caracterizada por presentar una densidad espectral de potencia (DEP) que, a diferencia del ruido blanco, no es plana en frecuencia. Para generar el ruido coloreado $y[n]$ se genera primero ruido blanco $x[n]$, el cual se pasa a través de un filtro lineal con respuesta al impulso $h[n]$ y respuesta en frecuencia $H(w)$, la cual

tendrá forma gaussiana para el caso del EEJ, tal como se muestra en el diagrama de la figura 2.2 a). En las simulaciones, el espectro gaussiano se genera a partir de la transformada de Fourier de su función de autocorrelación [24]. En el dominio de la frecuencia, como se observa en la figura 2.2. b), la convolución en el tiempo equivale a una multiplicación del espectro en frecuencia del ruido blanco por la respuesta en frecuencia del filtro gaussiano, con lo cual se obtiene el espectro del ruido coloreado, el cual representa el espectro del EEJ. El espectro así generado se presenta en la figura 2.3, al que se le ha superpuesto la gráfica de su espectro teórico o valor esperado del espectro. Finalmente, se calcula la transformada inversa de Fourier de dicho espectro para simular el canal EEJ, cuyas componentes real e imaginaria se muestran en la figura 2.4. De esta forma, la señal resultante será un proceso aleatorio gaussiano en el tiempo y tendrá un espectro con forma gaussiana [24]. Con ello se logra modelar el EEJ como un medio dispersivo de comunicación y simular sus efectos en la transmisión de voz y datos.

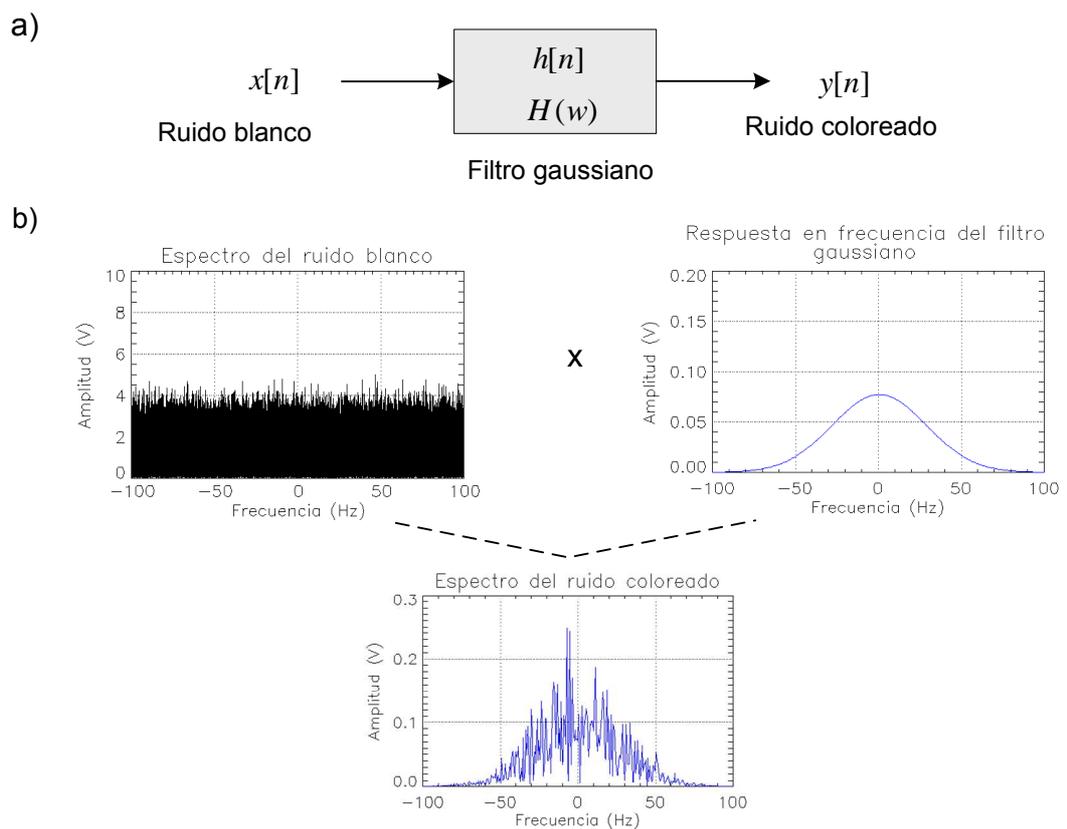


Figura 2.2. a) Sistema para producir ruido gaussiano coloreado [24], b) Generación del espectro del ruido coloreado

En el modelo de simulación del canal se consideran además tres parámetros del EEJ que influyen en la calidad de la señal transmitida:

- a) **Ancho espectral.-** Como se indicó en la sección 1.1.4.2, está asociado al movimiento de las irregularidades que producen el eco, lo cual origina variaciones en el desplazamiento Doppler de la señal transmitida. La varianza de estos desplazamientos en frecuencia de la señal determina el ancho espectral de los ecos del EEJ. Dicho ancho espectral se encuentra en el rango de 20 a 100 Hz [15]. El incremento del ancho espectral provoca una mayor frecuencia de los desvanecimientos de la señal, pero éstos durarán menos tiempo, lo cual origina un efecto compensatorio en la calidad de la voz y datos recibidos.
- b) **Amplitud del EEJ.-** Indica la intensidad del EEJ. Cuanto mayor sea la intensidad del EEJ, mejor será la calidad de la señal recibida.
- c) **Desplazamiento Doppler del EEJ.-** Se origina debido al movimiento del EEJ. Debido a que la velocidad radial promedio de éste es pequeña (aproximadamente 30 Hz), no afecta significativamente a la calidad de la transmisión, por lo que se desprecia su valor en los cálculos en el programa.

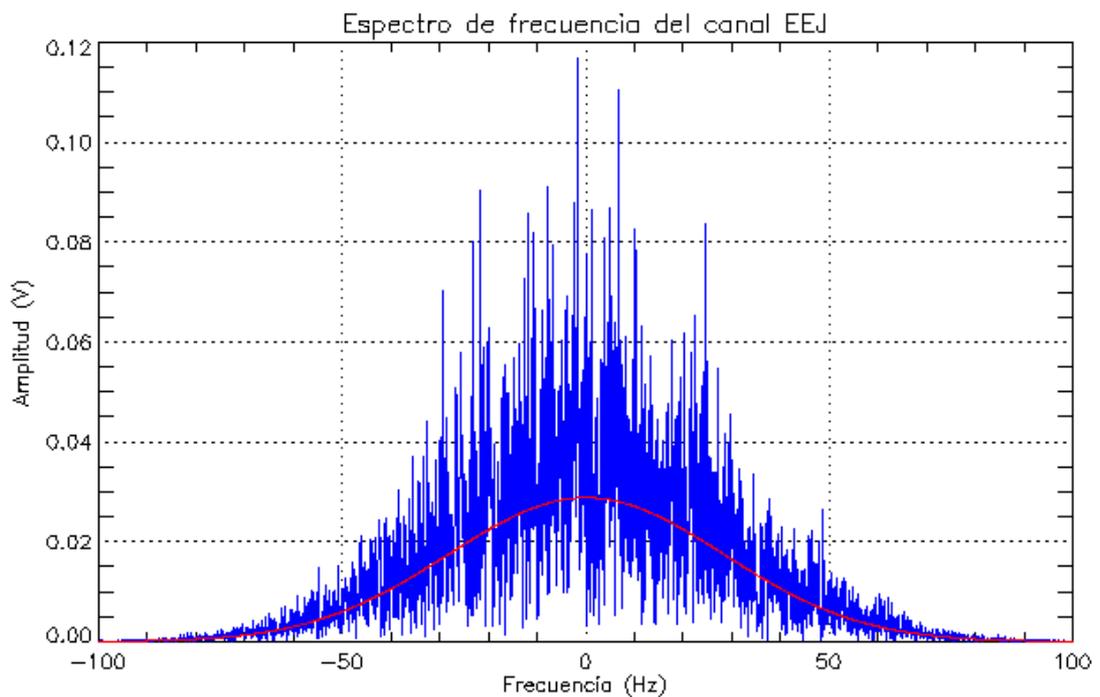


Figura 2.3. Espectro de frecuencia del canal de comunicaciones EEJ (azul), modelado como un proceso aleatorio gaussiano con espectro gaussiano, y su espectro esperado (rojo) para un ancho espectral de 20 Hz

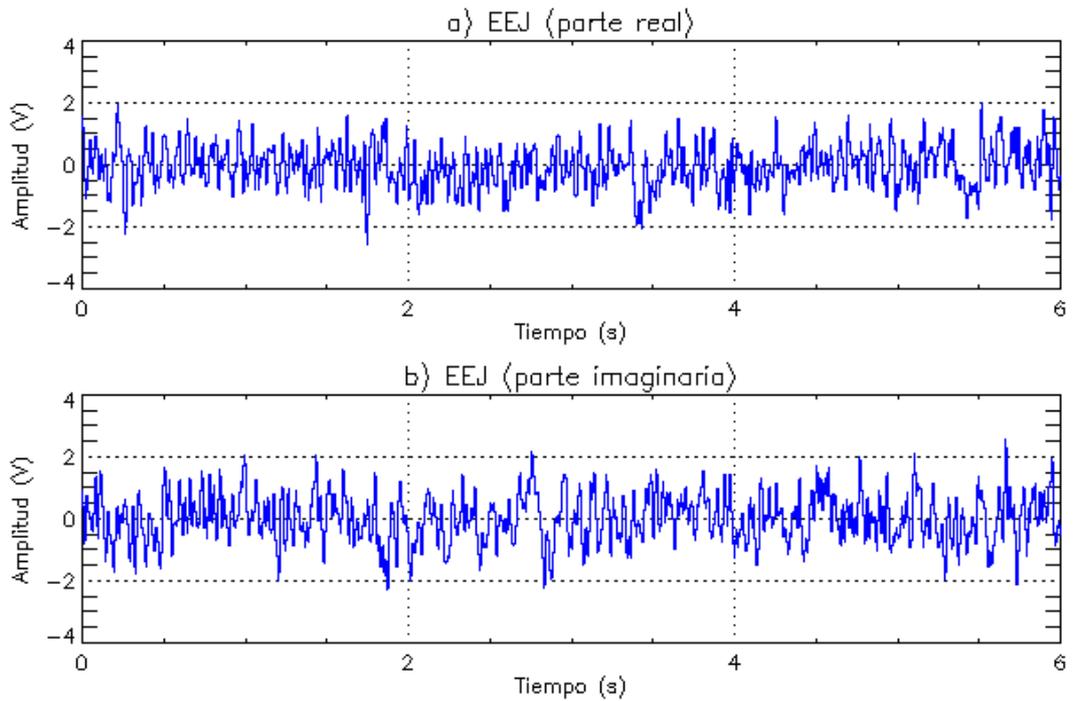


Figura 2.4. Función del canal EEJ en el dominio del tiempo considerando sus partes a) real y b) imaginaria para un ancho espectral de 20 Hz

2.2.3. Modulación por el EEJ

Una vez generado el canal, se modula la señal modulada en banda base por la función del canal de comunicaciones EEJ. Para ello, la señal modulada se multiplica por la función del canal EEJ, como se observa en las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 s(t)_{\text{mod}} &= I(t) + jQ(t) \\
 f(t)_{\text{EEJ}} &= A(t) + jB(t) \quad \dots 2.1 \\
 s(t)_{\text{mod}} f(t)_{\text{EEJ}} &= [A(t)I(t) - B(t)Q(t)] + j[A(t)Q(t) + B(t)I(t)]
 \end{aligned}$$

2.2.4. Demodulación

La señal transmitida a través del EEJ llega con ruido al receptor debido al medio de propagación y al ruido del sistema de recepción. Este ruido se caracteriza por ser de tipo aditivo blanco gaussiano (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*), el cual se le añade a la señal. Finalmente, la señal recibida se demodula en banda base y se le aplica un filtro pasabanda para eliminar el ruido y limitar la señal en espectro.

2.3. Variaciones del modelo

2.3.1. Simulación del espesor de la capa del EEJ

En el programa se simula el espesor de la capa del canal EEJ, el cual comprende aproximadamente 15 km. Este espesor se simula mediante la generación de múltiples capas de EEJ con distintos parámetros para cada una, las cuales representan las diferentes alturas que éste abarca.

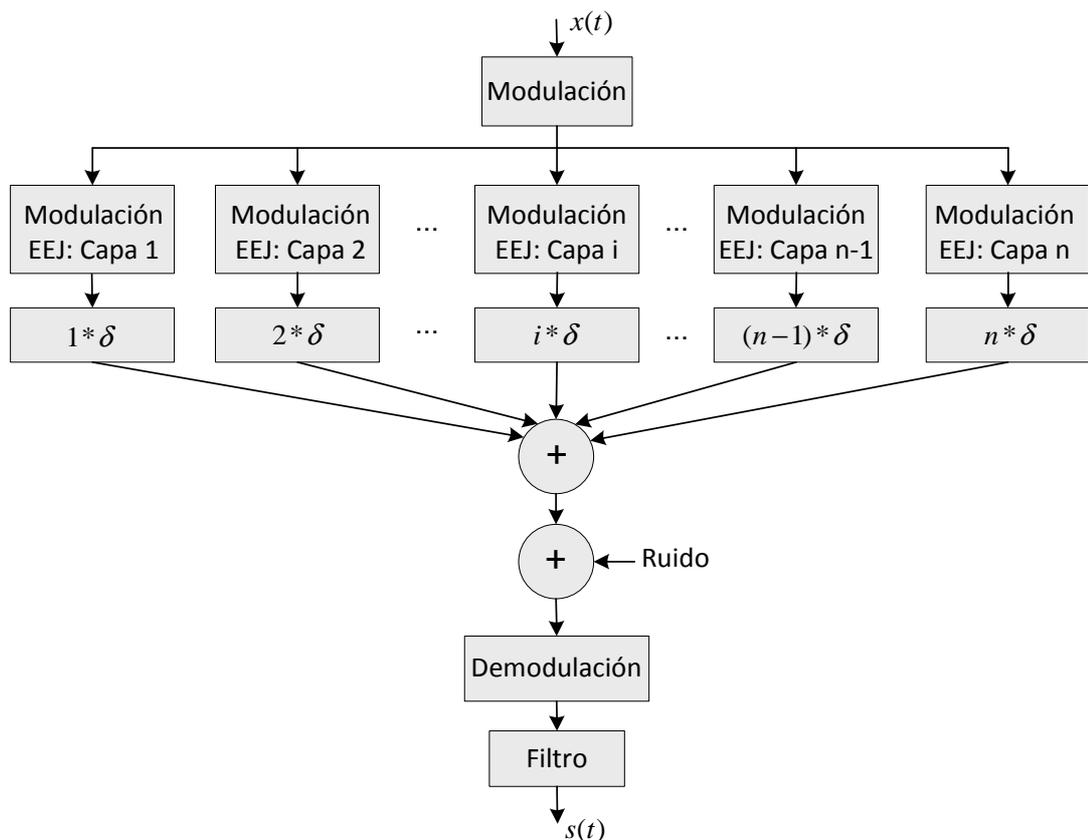


Figura 2.5. Simulación del espesor de la capa del EEJ (adaptado de [25])

En la figura 2.5 se muestra el diagrama de bloques de la simulación de un EEJ multicapas. Para simular el espesor del canal se generan distintos EEJ, cada uno con diferentes parámetros de ancho espectral y amplitud de acuerdo con la altura de la capa. La señal modulada para la transmisión se modula a través de cada uno de estos EEJ. Debido al espesor del canal, la dispersión en las distintas capas provoca que las contribuciones de la señal lleguen al receptor con distintos retardos según su distancia recorrida. Dichos retardos se extraen de la fórmula $i * \delta$, donde δ es el retardo unitario por cada capa recorrida e ' i ' indica el índice de

la capa. A continuación, se suman todas las componentes recibidas y su resultante se trabaja de acuerdo con el diagrama de bloques detallado en la sección anterior.

El modelo multicapas del EEJ permite hallar la dispersión del retardo y el ancho de banda de coherencia del canal, los cuales constituyen parámetros de la dispersión temporal del canal, como se indicó en la sección 1.1.4.3. La dispersión del retardo (T_m) se calcula a partir de la diferencia entre los retardos mínimo (τ_1) y máximo (τ_n), producidos por la dispersión de la señal en la capa más baja y más alta del EEJ, respectivamente. La distancia total recorrida para alcanzar la capa más alta excede a la recorrida para la capa más baja en 15 km para la ida y 15 km para el regreso, es decir, el doble del espesor del EEJ. Esta diferencia entre ambas distancias se emplea para calcular la dispersión del retardo. El inverso de este parámetro es el ancho de banda de coherencia del canal (B_c), el cual determina el ancho de banda del canal de comunicaciones EEJ. El cálculo de estos parámetros se presenta en la ecuación 2.2.

$$T_m = \tau_n - \tau_1 = \Delta d * c = (2 * 15 \text{ km}) \left(\frac{1 \text{ seg}}{3 \times 10^5 \text{ km}} \right) = 100 \mu s \quad \dots 2.2$$

$$B_c = (T_m)^{-1} = (100 \mu s)^{-1} = 10 \text{ KHz}$$

De los cálculos anteriores se observa que la dispersión del retardo del canal EEJ es de 100 us y, por lo tanto, su ancho de banda de coherencia es de 10 kHz. Este último parámetro indica el ancho de banda del canal de comunicaciones dentro del cual su función de transferencia permanece constante y, por lo tanto, existe cierto grado de correlación de la señal. Su valor determina también la separación mínima en frecuencia para que dos señales transmitidas vía el EEJ no estén correlacionadas, es decir, que sean independientes entre sí.

2.3.2. Simulación de transmisión de voz

Para la simulación de la transmisión de voz se emplea el esquema descrito en la figura 2.6. Se muestrea la voz y luego se realiza la modulación analógica en banda base. Posteriormente se modula esta señal a través del EEJ, se le añade ruido aditivo blanco gaussiano y, finalmente, se realiza la demodulación analógica de la señal.

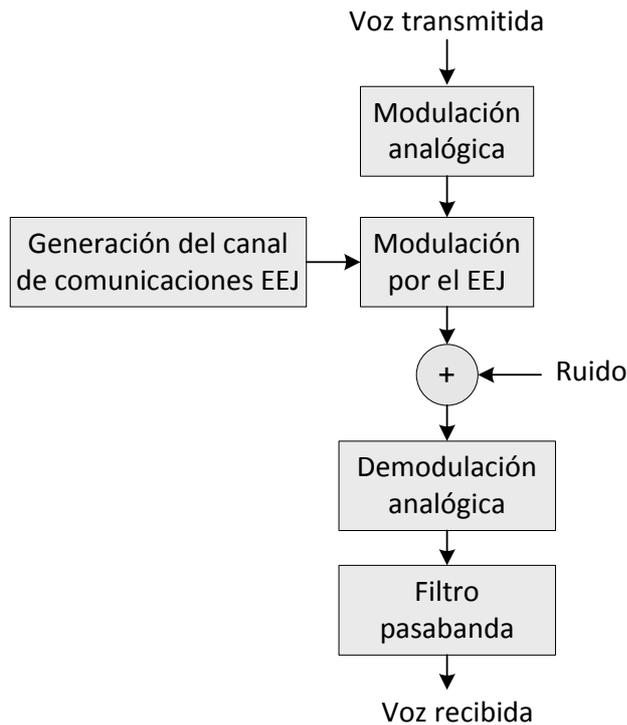


Figura 2.6. Simulación de la transmisión de voz

2.3.3. Simulación de transmisión de datos

La simulación de la transmisión de datos a través del EEJ se realiza de dos maneras. Una de ellas utiliza exclusivamente el simulador y la otra forma requiere además el empleo de un software de modulación digital empleado por radioaficionados. Ambos métodos se detallarán a continuación.

2.3.3.1. Simulación de transmisión de datos de modo directo

La simulación de transmisión de datos de modo directo permite realizar el íntegro de la simulación directamente en el simulador. El diagrama de bloques del procedimiento se ilustra en la figura 2.7. Se genera una secuencia de bits ('1's y '0's lógicos), a partir de los cuales se conforman pulsos rectangulares o gaussianos. Los pulsos conformados son luego modulados para su transmisión a través del canal, para lo cual se implementan tres tipos de modulación digital: ASK, PSK y FSK. Posteriormente, se modula la señal a través del EEJ, se le añade ruido y se la demodula. Finalmente, se implementa un detector, el cual está conformado por un filtro adaptado a la forma del pulso con el objetivo de disminuir el ruido, y un algoritmo que detecta los bits recibidos en base a un nivel de umbral de la señal.

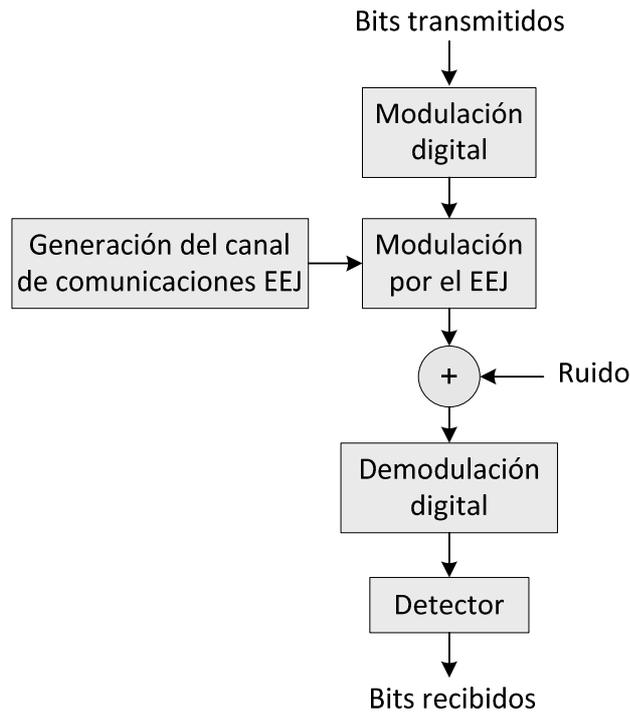


Figura 2.7. Simulación de la transmisión de datos de modo directo

A partir de la simulación de la transmisión de datos de modo directo es posible estudiar las características del canal EEJ y calcular algunos de sus parámetros, como la capacidad máxima del canal (C), la cual está determinada por la dispersión del retardo. Si el tiempo de símbolo transmitido es menor que dicha dispersión del retardo, se producirá una interferencia intersímbolos producto del retraso variable de las distintas componentes de la señal, como se aprecia en la figura 2.8 a). Ello provoca que los símbolos transmitidos interfieran en los símbolos subsiguientes, lo cual distorsiona considerablemente la señal recibida, mostrada en la figura 2.8 b).

Con la finalidad de evitar la interferencia intersímbolos, el tiempo de símbolo transmitido (T_s) debe ser mayor o igual a la dispersión del retardo (T_m), con lo cual se logra disminuir la tasa de error de bits. La inversa del tiempo de símbolo mínimo determina la tasa de símbolos teórica máxima que se puede transmitir a través del canal EEJ, cuyo cálculo se muestra en la ecuación 2.3. Aquí se indica que esta tasa se encuentra limitada por el espesor del canal a 10 kbaudios para un buen nivel de SNR. Si se transmitiera a mayores tasas, el tiempo de símbolo sería menor que la dispersión del retardo, con lo que se produciría interferencia intersímbolos que afectaría significativamente la calidad de la señal.

$$T_s \geq T_m$$

$$T_{s\min} = T_m = 100\mu s / \text{símbolo} \quad \dots 2.3$$

$$C = 1/T_{s\min} = 10\text{Kbaud}$$

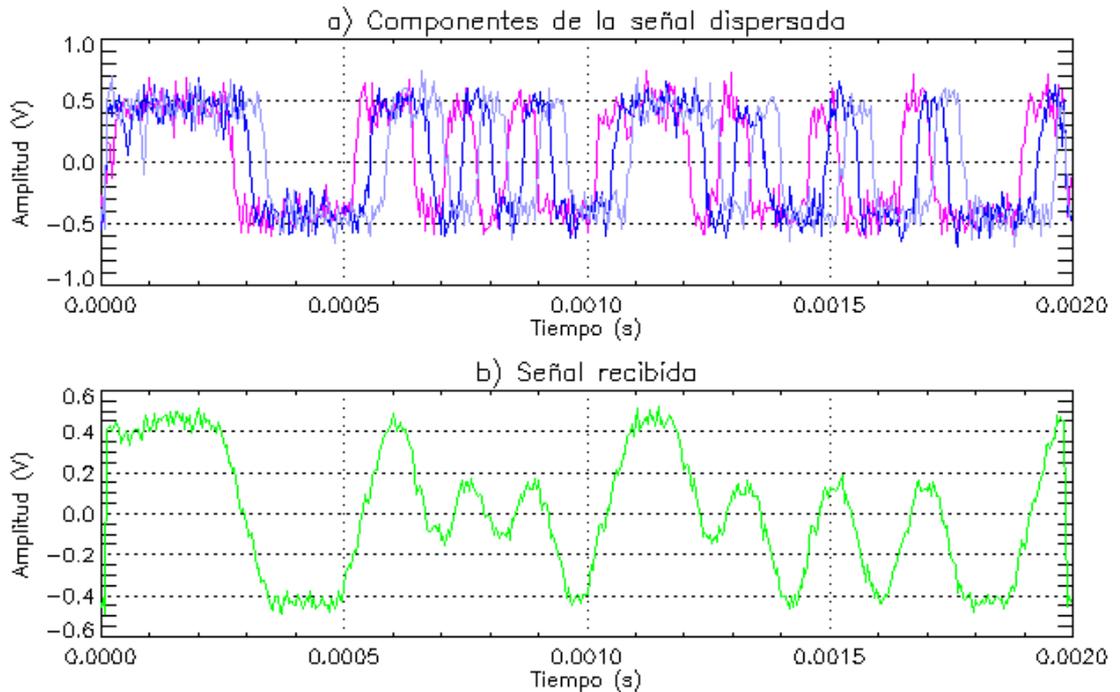


Figura 2.8. a) Componentes retardadas de la señal recibida y b) señal total recibida afectada por la dispersión del retardo

2.3.3.2. Simulación de transmisión de datos de modo indirecto

La simulación de la transmisión de datos de modo indirecto requiere del empleo de un software de modulación y demodulación digital usado por radioaficionados. Este software permite aplicar distintos tipos de modulación digital, entre las cuales destacan PSK31, QPSK, MFSK, radiopaquetes y muchos otros modos empleados por radioaficionados.

En la figura 2.9 se muestra el diagrama de bloques del procedimiento empleado para la simulación. Aquí se emplea como datos los caracteres ingresados por teclado. A éstos se los modula digitalmente dentro del ancho de banda del canal de voz, con la finalidad de generar una secuencia de tonos audibles. El audio así generado es grabado en la PC y luego ingresado en el simulador, donde se realiza un procedimiento similar al empleado para la simulación de transmisión de voz. El audio resultante del simulador es reproducido en la computadora con el

software de radioaficionados instalado, en el cual se muestran los caracteres obtenidos después de la demodulación digital. Estos caracteres son finalmente comparados con los caracteres transmitidos, con lo cual es posible obtener estadísticas del porcentaje de caracteres errados.

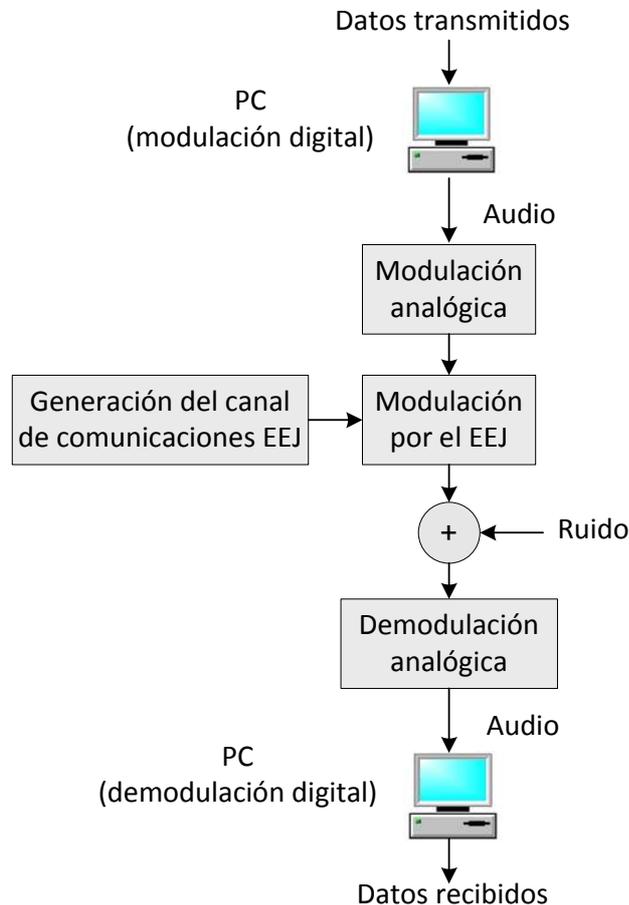


Figura 2.9. Simulación de la transmisión de datos de modo indirecto

La ventaja del empleo de este tipo de transmisión indirecto es que el software de radioaficionados permite experimentar con distintos modos ya implementados, con lo cual se aprovechan las herramientas ya existentes. Sin embargo, presenta la desventaja de que el audio generado está limitado por el ancho de banda del canal de voz para el cual están diseñados los radio transceptores de radioaficionados que se emplearán en las pruebas (300 a 3000 Hz, aproximadamente). Debido a esta limitación, no se logra explotar el ancho de banda del canal EEJ para la transmisión de datos a más altas tasas. Por este motivo, no es conveniente emplear este tipo de transmisión para determinar la capacidad máxima del canal de comunicaciones, lo cual sí se logró en el modo de transmisión directa, modulando directamente los pulsos en el simulador.

2.3.4. Simulación del empleo de diversidad

Para la simulación de la diversidad se considera dos o más transmisiones independientes de la misma señal, lo cual, para efectos prácticos, equivale a modular la señal a través de dos o más EEJ distintos. De este modo, se aprovecha la naturaleza aleatoria del EEJ para simular transmisiones independientes entre sí.

En este caso, se generan tantos EEJ distintos como número de realizaciones se emplee para diversidad, como se observa en el diagrama de bloques de la figura 2.10. A través de cada uno de estos EEJ se modula el mismo audio para obtener señales independientes. Ello equivale a transmitir por diferentes caminos radioeléctricos, por lo cual este modelo puede ser aplicado para simular los distintos tipos de diversidad (diversidad en tiempo, espacio, frecuencia, polarización, etc).

Para el procesamiento de la señal resultante se implementan en el simulador las técnicas basadas en el modelo del combinador por equiganancia y el de tasa máxima o MRC, descritos en la sección 1.3.2. Este último combinador pondera las señales demoduladas en función a la potencia de la señal recibida de cada canal. De esta forma, para cada instante de tiempo se le otorga mayor peso a la señal con mayor potencia, con lo cual se logra contrarrestar el efecto de los desvanecimientos. De la comparación de los resultados de las simulaciones para cada uno de los métodos implementados, se comprueba que este último es el que permite obtener la mejor calidad de las comunicaciones, de acuerdo con lo previsto teóricamente, por lo cual constituye la técnica seleccionada para el procesamiento de diversidad en las simulaciones futuras.

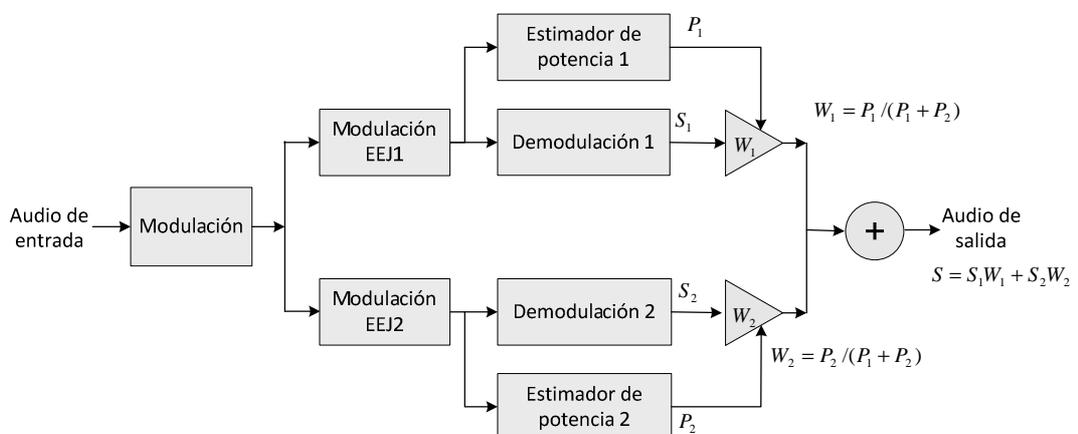


Figura 2.10. Diagrama de bloques de la simulación de diversidad con dos realizaciones empleando el combinador por tasa máxima

CAPÍTULO 3

RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

En este capítulo se muestran los resultados de las simulaciones de comunicaciones a través del EEJ. Estos resultados permiten caracterizar los desvanecimientos presentes en las transmisiones de voz y datos vía el EEJ y estudiar las características del canal. Además, su empleo hace posible hallar estadísticas de la variación de la calidad de la comunicación en función de los parámetros del EEJ y estudiar el efecto del uso de la técnica de diversidad.

3.1. Simulación de transmisión de voz

En el programa se simula la transmisión de un audio a través del EEJ. El audio recibido es comparado con el original para determinar la calidad de la comunicación. Por tal motivo, se optó por emplear un audio que permita excitar una amplia porción del canal de voz. El audio seleccionado consta de una porción de voz, seguida por silencio y un tono. La frase empleada es 'Buenos días. Good morning', la cual presenta una amplia gama de frecuencias.

Para cuantificar la calidad de las comunicaciones a través del EEJ, se emplea como parámetro de comparación el índice de correlación. Éste expresa el grado de similitud entre la voz recibida y la voz original. Un índice de correlación de 1 indica que ambas voces son idénticas.

La figura 3.1 a) presenta una gráfica del audio transmitido, en el cual se observa que la señal de voz es variante en el tiempo, mientras que el silencio posee voltaje cero y el tono presenta una amplitud constante.

La figura 3.1 b) muestra el espectrograma del audio transmitido, el cual representa una variación de la intensidad de cada una de las componentes frecuenciales presentes en el espectro de la señal a lo largo del tiempo. El color azul indica un menor nivel de potencia, por lo que en el espectrograma se observa un bloque azul durante el intervalo de silencio. El color rojo señala la presencia de mayor potencia para una determinada frecuencia en un instante de tiempo, como en el caso de la transmisión del tono.

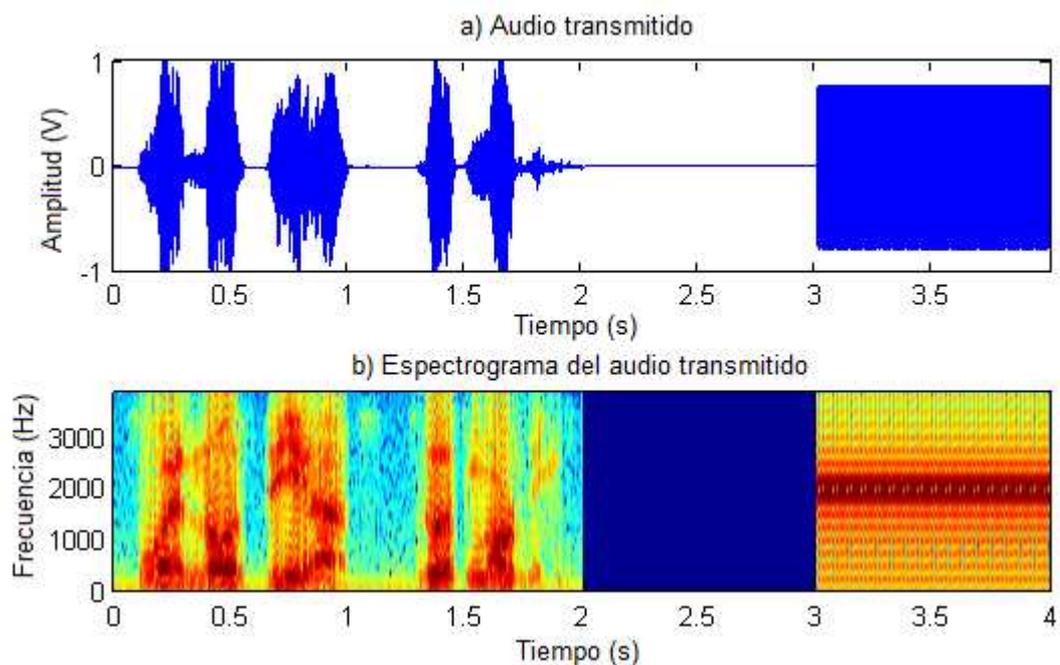


Figura 3.1. (a) Audio transmitido y (b) su espectrograma

3.1.1. Tipos de modulación

Para la simulación de la transmisión de voz vía EEJ se emplearon distintos tipos de modulación, tales como Modulación en Amplitud (AM), Doble Banda Lateral (DSB), Banda Lateral Única (SSB), tanto Banda Lateral Superior (USB) como Banda Lateral Inferior (LSB) y Modulación en Frecuencia (FM). Para cada uno de estos tipos de modulación, la calidad de los audios recibidos se asemeja a la de los obtenidos de los experimentos realizados anteriormente [5][23].

Empleando la modulación AM, se obtuvo una voz apenas audible debido a que se aprovecha solo la tercera parte de la potencia en transmitir la señal de información, mientras que el resto es empleado en el envío de la portadora. Por este motivo, no resulta conveniente el uso de esta modulación en las comunicaciones vía EEJ [5].

Para el caso de la modulación DSB, los audios se reciben con mayor potencia que en el caso de AM, debido a que se evita la transmisión de la portadora. Con ello, se dedica toda la potencia al envío de la señal de información, con lo cual se logra una mayor eficiencia de potencia respecto a la modulación AM. Sin embargo, los audios son aún poco inteligibles, debido a que se transmiten las dos bandas laterales, las cuales son simétricas y, por lo tanto, redundantes.

Los audios obtenidos usando la modulación SSB, tanto en LSB como en USB, se caracterizan por presentar temblores o "lloqueos". Éstos tienen su origen en las variaciones de fase de la señal y en los desvanecimientos que ésta experimenta debido a la modulación por el EEJ [5][23].

Con el empleo de FM se consiguió una voz más inteligible que las obtenidas con los tipos de modulación mencionados anteriormente, por lo que a partir de éste se obtendrán las estadísticas para el estudio del canal de comunicaciones. La voz recibida, no obstante, se ve afectada por desvanecimientos rápidos y profundos, los cuales serán caracterizados en la sección siguiente.

3.1.2. Caracterización de los desvanecimientos

Las comunicaciones vía EEJ empleando modulación FM se ven afectadas por desvanecimientos, provocados por la caída brusca de la potencia de la señal debajo del nivel de ruido. Durante los breves instantes de tiempo en los que ocurren dichos desvanecimientos, se produce una irrupción impulsiva de ruido en el sistema. Por esta razón, este tipo de comunicaciones se caracteriza por la presencia de ruido impulsivo, cuya frecuencia de ocurrencia está determinada por el ancho espectral del EEJ. Estos desvanecimientos pueden ser observados con mayor claridad tanto en el espectrograma como en el gráfico de potencia de la señal recibida respecto del ruido.

Se muestra a continuación la caracterización gráfica de los desvanecimientos para un SNR alto y un SNR bajo, además de una comparación entre dos realizaciones del canal de comunicaciones EEJ con parámetros iguales.

Las figuras 3.2 y 3.3 corresponden a la señal recibida en una simulación con un SNR alto. En la figura 3.2 a) se observa la presencia de los desvanecimientos (encerrados en una circunferencia), los cuales se muestran como ruido impulsivo presente durante toda la señal. En el espectrograma mostrado en la figura 3.2 b) se observa la presencia de distintas frecuencias para el intervalo que corresponde al silencio, el cual originalmente tenía una potencia cero, como se muestra en la figura 3.1 b). Esto indica la presencia de ruido en la voz recibida, que resulta más notorio en la gráfica en los momentos de silencio, aunque se encuentra presente durante toda la señal. Los desvanecimientos se muestran en el espectrograma de la señal recibida como líneas rojas verticales delgadas que indican el amplio rango de frecuencias presentes en la señal para ciertos instantes de tiempo.

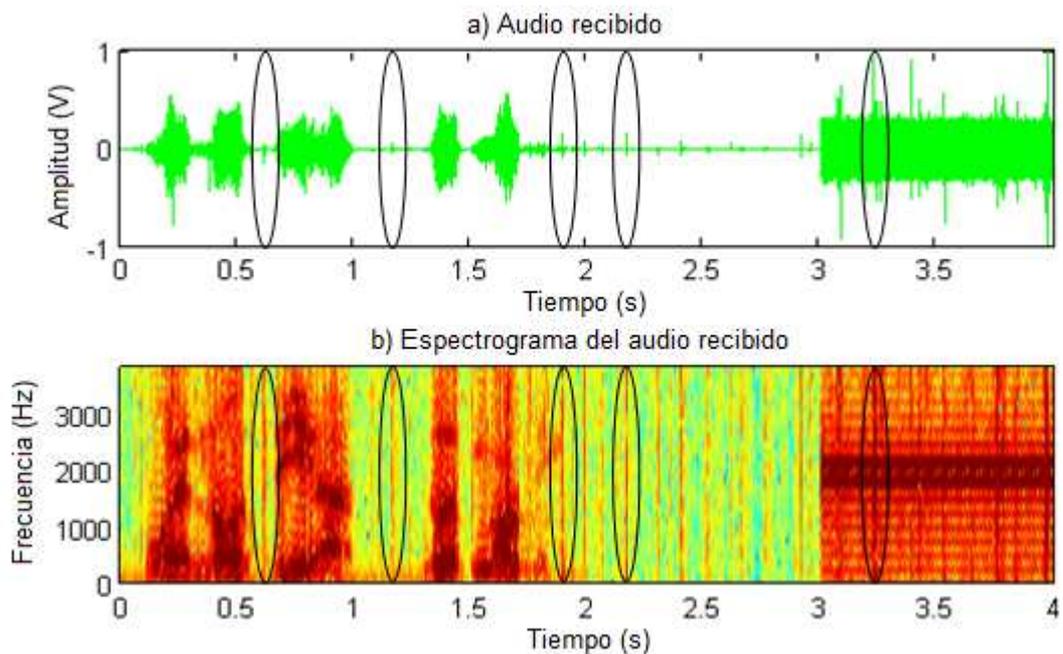


Figura 3.2. Desvanecimientos de la señal para un valor alto de SNR. Gráficas de (a) la voz recibida y (b) su espectrograma.

La figura 3.3 permite caracterizar los desvanecimientos como caídas rápidas y profundas de la potencia de la señal debajo del nivel del ruido.

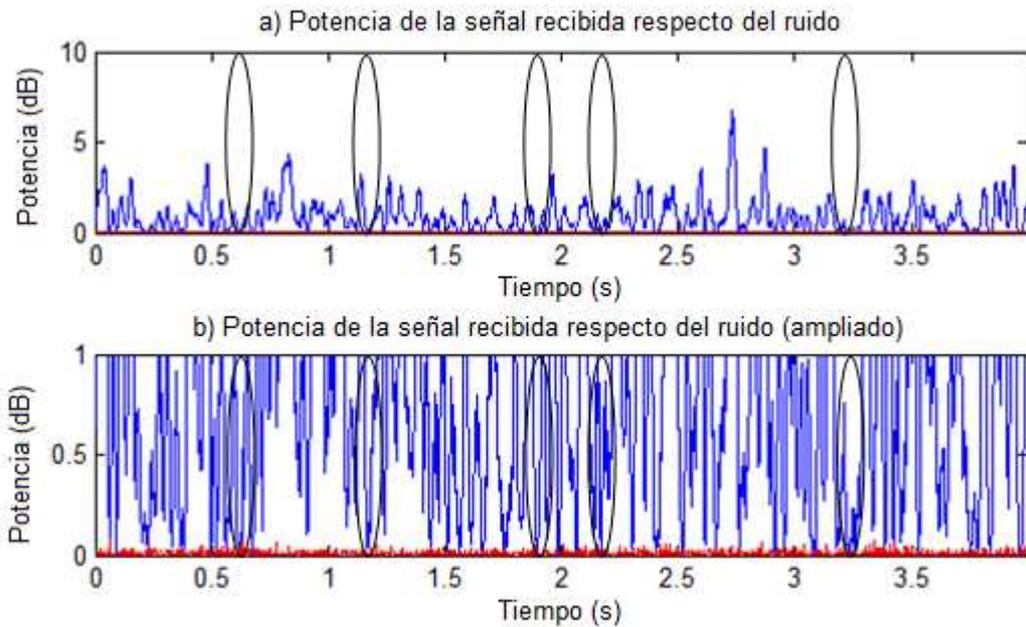


Figura 3.3. Desvanecimientos de la señal para un valor alto de SNR. Gráficas de la potencia de la señal recibida respecto del ruido (sin amplificar (a) y amplificada cerca del nivel de ruido (b)).

Por otro lado, las figuras 3.4 y 3.5 corresponden a la simulación de una transmisión con un SNR bajo. Esto equivale a una disminución de la potencia de la señal transmitida o una menor intensidad del EEJ, por lo cual los desvanecimientos serán mayores que para valores altos de SNR.

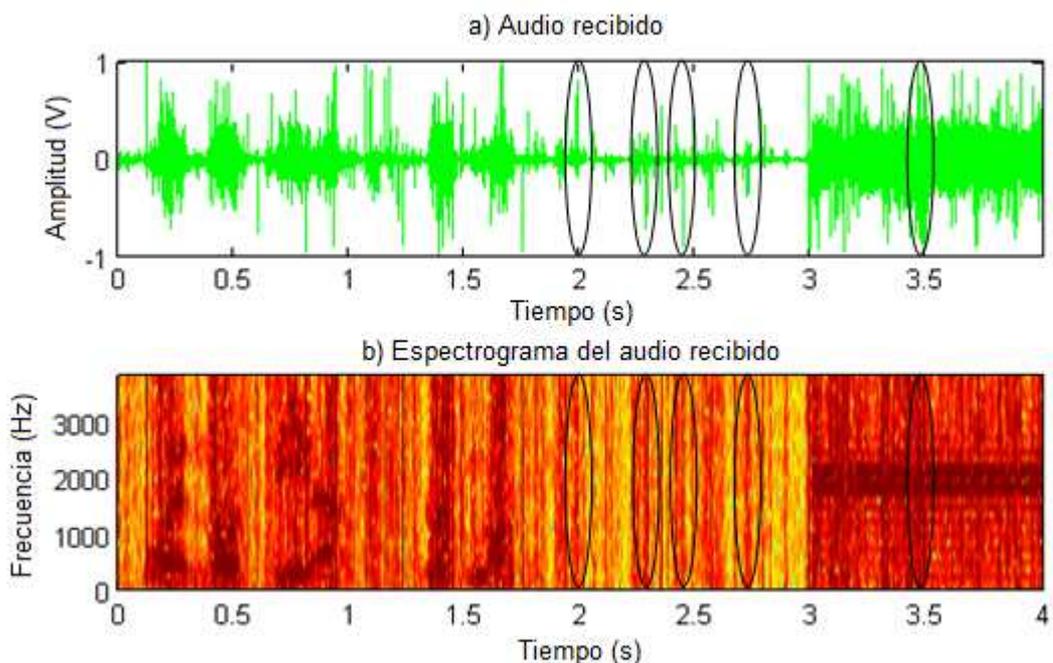


Figura 3.4. Igual que en la figura 3.2, pero para un valor bajo de SNR

En la figura 3.4 se muestra la señal recibida y su correspondiente espectrograma. Se observa la presencia de una mayor cantidad de líneas verticales rojas delgadas, las cuales indican el aumento de la cantidad de desvanecimientos. Además, se percibe de manera cualitativa una disminución de la calidad de la voz, la cual se torna menos inteligible.

En la figura 3.5 se observa que la señal recibida sufre un mayor número de desvanecimientos para un SNR menor. De aquí es posible deducir la existencia de una dependencia del número de desvanecimientos respecto del nivel de SNR.

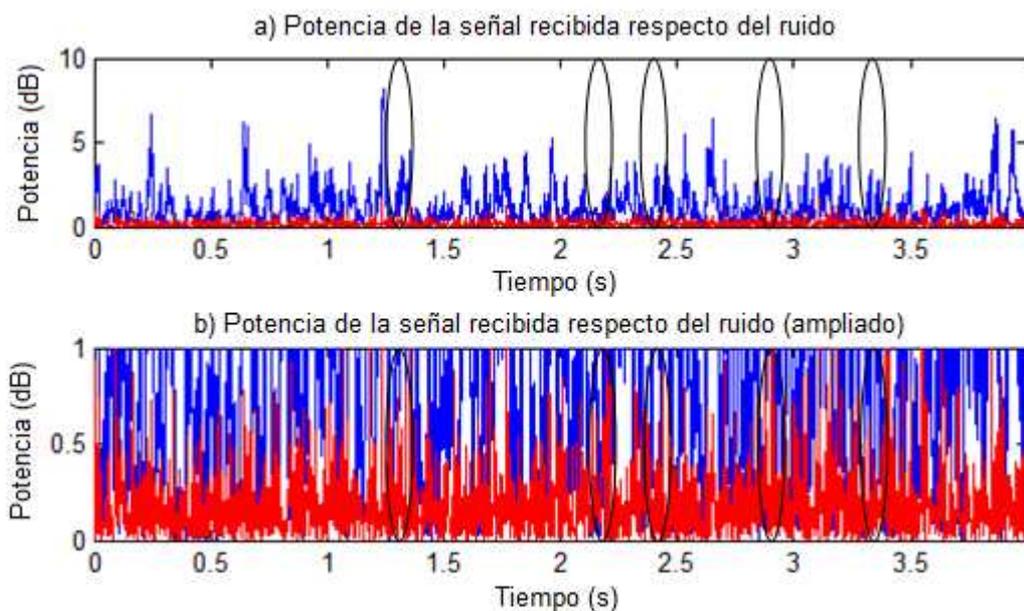


Figura 3.5. Igual que en la figura 3.3, pero para un valor bajo de SNR

Finalmente, la figura 3.6 presenta una comparación entre los espectrogramas obtenidos de dos señales recibidas con dos realizaciones distintas del EEJ considerando los mismos parámetros de transmisión. Se observa que los desvanecimientos ocurren en distintos instantes de tiempo y es poco probable que coincidan entre sí debido a que éstos se encuentran asociados a la naturaleza aleatoria del EEJ. Esta aleatoriedad será aprovechada para la mejora de la calidad de la señal usando diversidad.

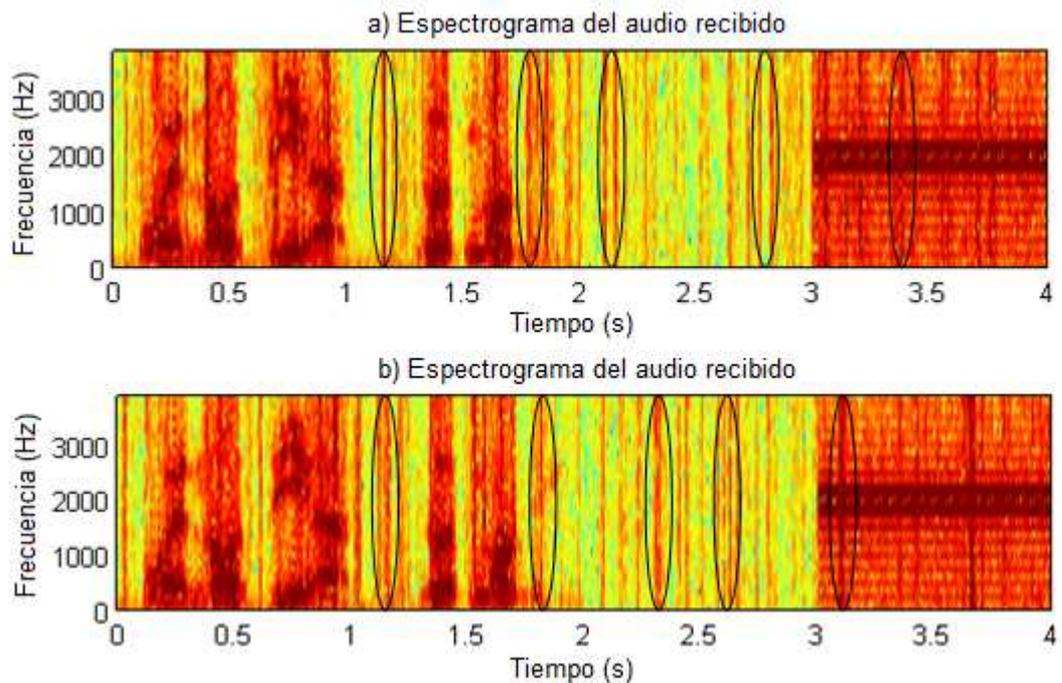


Figura 3.6. Espectrogramas de los audios recibidos considerando dos realizaciones independientes del canal EEJ con los mismos parámetros de transmisión.

3.1.3. Calidad en función de los parámetros del EEJ y del sistema de comunicaciones

La calidad de las comunicaciones de voz se ve influenciada por los parámetros del EEJ y del sistema de comunicaciones, tales como el SNR y el ancho espectral del EEJ. El simulador permite realizar curvas estadísticas de la calidad de la voz recibida respecto a la variación de cada uno de estos parámetros. Para las estadísticas se considera la naturaleza aleatoria del canal EEJ, por lo que resulta necesaria la realización de muchos eventos para determinar la tendencia de la curva al valor esperado (media estadística) y su desviación estándar, la cual se indica también en las gráficas presentadas en las secciones siguientes.

3.1.3.1. Calidad en función del SNR

Aumentar el SNR equivale a incrementar la potencia de transmisión o disminuir la atenuación debido al EEJ, con lo cual se logra un menor número de desvanecimientos en la señal y, de esta forma, se obtiene un audio más inteligible. En la figura 3.7 se muestra la variación de la calidad de la voz respecto del SNR. Debido a la disminución de los desvanecimientos, el índice de correlación aumenta a medida que se incrementa el SNR.

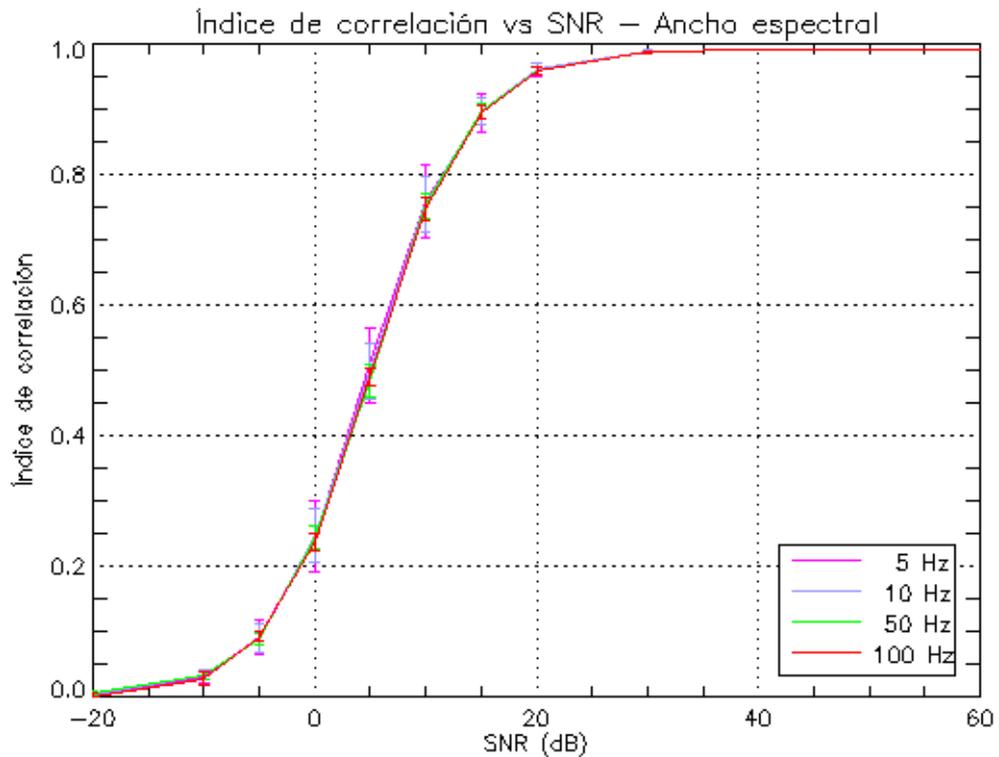


Figura 3.7. Índice de correlación en función del SNR y el ancho espectral

3.1.3.2. Calidad en función del ancho espectral del EEJ

El EEJ provoca desvanecimientos de la señal a una repetición que varía entre 20 y 100 Hz en el transcurso del día [9][23]. Esta frecuencia está asociada al ancho espectral del EEJ. A medida que el ancho espectral se incrementa, se producirá un mayor número de desvanecimientos, pero éstos durarán menos tiempo. Esto origina un efecto compensatorio que provoca que la inteligibilidad de la señal no se vea afectada por la variación del ancho espectral del canal EEJ en este rango de frecuencias. Por este motivo, en la figura 3.7 mostrada anteriormente se observa que, para distintos niveles de SNR, la calidad de la voz es independiente del ancho espectral del canal de comunicaciones EEJ.

3.1.3.3. Calidad empleando diversidad

El uso de diversidad permite obtener una mayor inteligibilidad de la voz, con lo cual se consigue una significativa mejora cualitativa de la misma. En la figura 3.8 se aprecia de manera cuantitativa que el uso de dos realizaciones para la transmisión (diversidad 1) incrementa considerablemente el valor del índice de correlación respecto al caso de transmisión con solo una realización (diversidad 0).

Se observa también que es posible obtener la misma calidad de la voz transmitiendo con aproximadamente 6 dB menos respecto al caso sin diversidad. Para más de dos realizaciones, esta mejora es solo incremental. Por ejemplo, en el gráfico se aprecia que con el uso de 4 realizaciones (diversidad 3) se logra el mismo índice de correlación que en el caso de 3 realizaciones transmitiendo con 1 dB menos, aproximadamente.

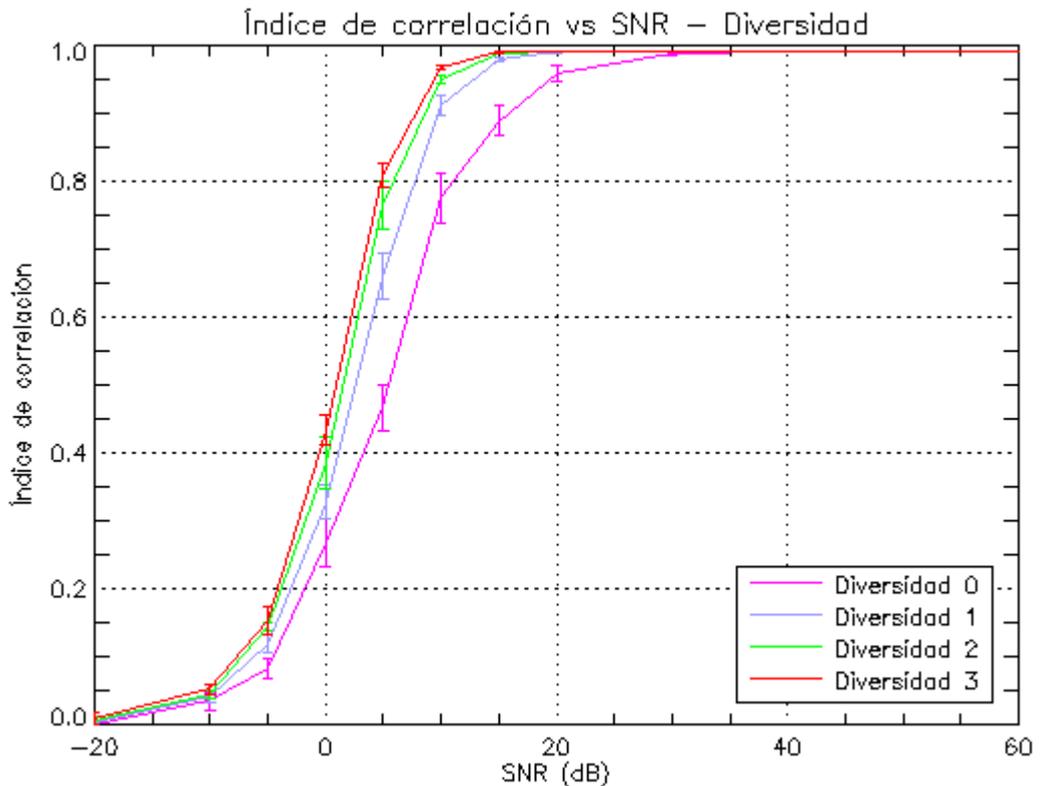


Figura 3.8. Índice de correlación en función del SNR y la diversidad

3.2. Simulación de transmisión de datos

Para la simulación de transmisión de datos se consideran los modos directo e indirecto de transmisión de datos descritos en las secciones 2.3.3.1 y 2.3.3.2 del capítulo 2.

3.2.1. Simulación de la transmisión de datos de modo directo

En la simulación de transmisión de datos directo se realiza la modulación digital de los bits empleando únicamente el simulador. Para ello, se emplean dos tipos de conformación de pulsos: rectangulares y gaussianos. Los primeros son

más sencillos de generar, pero presentan el inconveniente de que se desperdicia potencia en transmitir los lóbulos laterales del espectro, correspondientes a las esquinas de los pulsos. Por otro lado, la conformación de pulsos gaussianos ofrece la ventaja de que permite mejorar la eficiencia espectral y la eficiencia de potencia de la señal respecto al caso anterior. Por esta razón, para un determinado nivel de SNR, con el uso de pulsos gaussianos se obtuvo una señal más robusta al ruido y, por lo tanto, con una menor cantidad de bits errados en la recepción, motivo por el cual se seleccionó este tipo de conformación de pulsos para la simulación.

Para cuantificar la calidad de las comunicaciones de datos transmitidas de modo directo se emplea como parámetro la tasa de error de bits (BER, *Bit Error Rate*). Este parámetro indica el porcentaje de bits errados recibidos respecto al total de bits transmitidos.

3.2.1.1. Tipos de modulación

Con la finalidad de simular la transmisión de datos a través del EEJ, se moduló la secuencia de pulsos generados con los siguientes tipos de modulación digital: ASK (Modulación por Desplazamiento de Amplitud), PSK (Modulación por Desplazamiento de Fase) y FSK (Modulación por Desplazamiento de Frecuencia).

Las comunicaciones de datos empleando modulación ASK se caracterizaron por presentar una gran cantidad de bits errados debido a los desvanecimientos y la alteración de fase que provoca la modulación por el EEJ.

Para el caso de una modulación PSK, la secuencia de bits tampoco logró ser recibida correctamente con el algoritmo implementado actualmente debido a la distorsión de fase que provoca el EEJ en la señal transmitida. Ello origina ambigüedades de fase en la señal, por lo cual se requiere de un procesamiento más complejo para decodificar los bits de manera correcta.

La modulación FSK fue aquélla con la que se consiguió una mayor calidad debido a que la información se transmite en la variación de frecuencia de la señal, la cual no se ve afectada por el EEJ. Además, debido a que el desplazamiento Doppler de la señal es pequeño, el cambio en frecuencia de la señal es también pequeño y, por ende, no afecta la información transmitida. Por estos motivos, FSK fue el modo seleccionado para hallar las estadísticas de calidad de las

transmisiones de datos a través del EEJ, las cuales se presentarán en las secciones siguientes.

3.2.1.2. Caracterización de los desvanecimientos

Para el caso de la simulación de transmisión de datos, se observa que los desvanecimientos afectan el mensaje transmitido dependiendo de las condiciones de SNR y de la tasa de bits que se emplea.

En la figura 3.9 a) se muestra una secuencia de bits transmitidos y su respectiva señal conformada por pulsos gaussianos para un SNR bajo de 10 dB, ancho espectral de 10 Hz y tasa de bits de 1000 bps. En la figura 3.9 b) se aprecia la señal recibida afectada por los desvanecimientos, los cuales se muestran en voltaje como ruido impulsivo, y la secuencia de bits recibidos. Además, se encierra en una circunferencia los bits recibidos de manera incorrecta debido a los desvanecimientos de la señal. Estos bits errados representan el 8% del total de bits transmitidos.

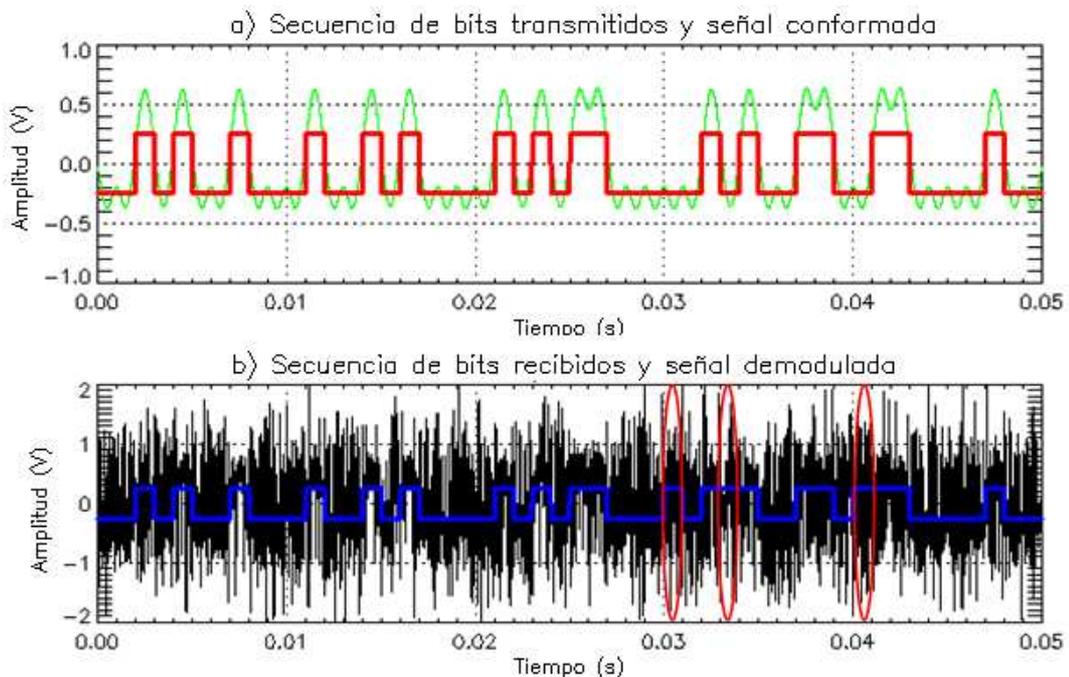


Figura 3.9. a) Secuencia de bits transmitidos (rojo) y señal conformada (verde) y b) Secuencia de bits recibidos (azul) y señal demodulada (negro) para un SNR bajo. SNR=10 dB, ancho espectral = 10 Hz, tasa de bits = 1000 bps, BER=6%

En la figura 3.10 a) se observa otra secuencia de bits transmitidos y su señal conformada para condiciones de SNR alto de 30 dB y los mismos valores de ancho

espectral y tasa de bits que en el caso anterior. En la figura 3.10 b) se muestra la señal demodulada y su respectiva secuencia de bits recibidos. En esta gráfica se observa una significativa disminución de los desvanecimientos en la señal recibida debido al incremento del SNR. Esto provoca que, para este ejemplo, la tasa de error de bits sea cero.

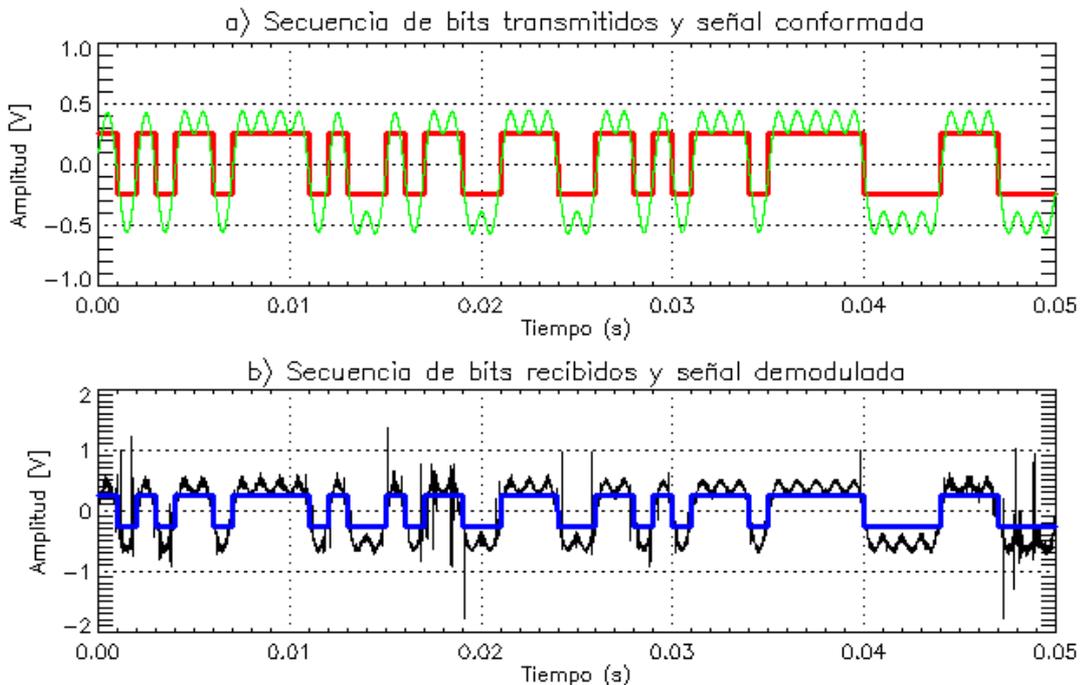


Figura 3.10. Gráfico similar al de la figura 3.9 para un SNR alto. SNR=30 dB, ancho espectral = 10 Hz, tasa de bits = 1000 bps, BER=0%

3.2.1.3. Calidad en función de los parámetros del EEJ y del sistema de comunicaciones

La calidad de las comunicaciones digitales varía de acuerdo a ciertos parámetros del EEJ y del sistema de comunicaciones, tales como el SNR, el ancho espectral del EEJ, el espesor de la capa del EEJ y tasa de bits transmitidos. En función a la variación de éstos es posible obtener estadísticas que permiten analizar el efecto de dichas variaciones en la calidad de las comunicaciones de datos y caracterizar así el canal EEJ.

3.2.1.3.1. Calidad en función del SNR

A mayor SNR, la calidad de las comunicaciones de datos a través del EEJ mejora considerablemente. Al transmitir con mayor potencia o en condiciones de

mayor intensidad del EEJ, la señal se verá menos afectada por los desvanecimientos y, por lo tanto, se tendrán menos bits errados en la recepción.

En la figura 3.11 se muestra un gráfico de la variación de la calidad de las comunicaciones en función del SNR y el ancho espectral para una conformación de pulsos gaussianos. Se observa que al aumentar el SNR se logra una disminución de la tasa de error de bits.

3.2.1.3.2. Calidad en función del ancho espectral del EEJ

De manera similar a lo que ocurre para el caso de transmisión de voz, la calidad de las comunicaciones de datos no se ve afectada por la variación del ancho espectral. En la figura 3.11 se observa también que la variación del ancho espectral no influye en la calidad de los datos recibidos. Incrementar el ancho espectral equivale a tener desvanecimientos más frecuentes pero de menor duración [20], por lo cual en promedio la señal permanecerá igual cantidad de tiempo debajo del nivel del ruido que en el caso de un EEJ con menor ancho espectral.

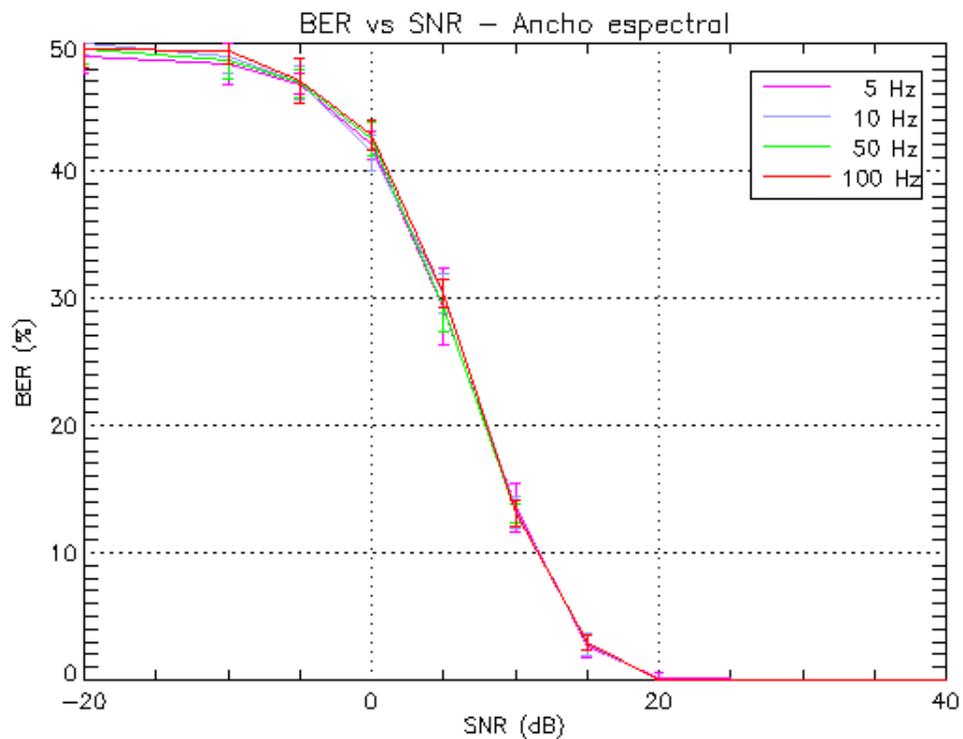


Figura 3.11. BER vs SNR considerando la variación del ancho espectral para un espesor del EEJ de 15 km y una tasa de bits de 2000 bps.

3.2.1.3.3. Calidad en función del espesor de la capa del EEJ

La calidad de las comunicaciones de datos también se ve afectada por el espesor de la capa del EEJ, el cual determina la máxima tasa de símbolos que pueden ser transmitidos. A mayor espesor, mayor será la dispersión del retardo que sufrirá la señal al pasar por el canal, lo que ocasionará que la máxima tasa de símbolos se vea limitada a un valor de 10 kbaudios, como se calculó en la sección 2.3.3.1. Debido a que en las simulaciones se empleó la modulación FSK, en la cual cada símbolo representa un bit, teóricamente la tasa de bits transmitidos correctamente será como máximo 10 kbps. Esta tasa se podría aumentar con el empleo de modulaciones M-arias, en las cuales cada símbolo transporta M bits, con lo que se tendrían 2^M niveles. Con estos tipos de modulación, la tasa de bits transmitidos podría incrementarse considerablemente. Sin embargo, el máximo valor de M está limitado debido a que disminuyen las diferencias entre amplitudes, fases o frecuencias distintas que identifican cada nivel, con lo cual la señal será más vulnerable frente al ruido e interferencias.

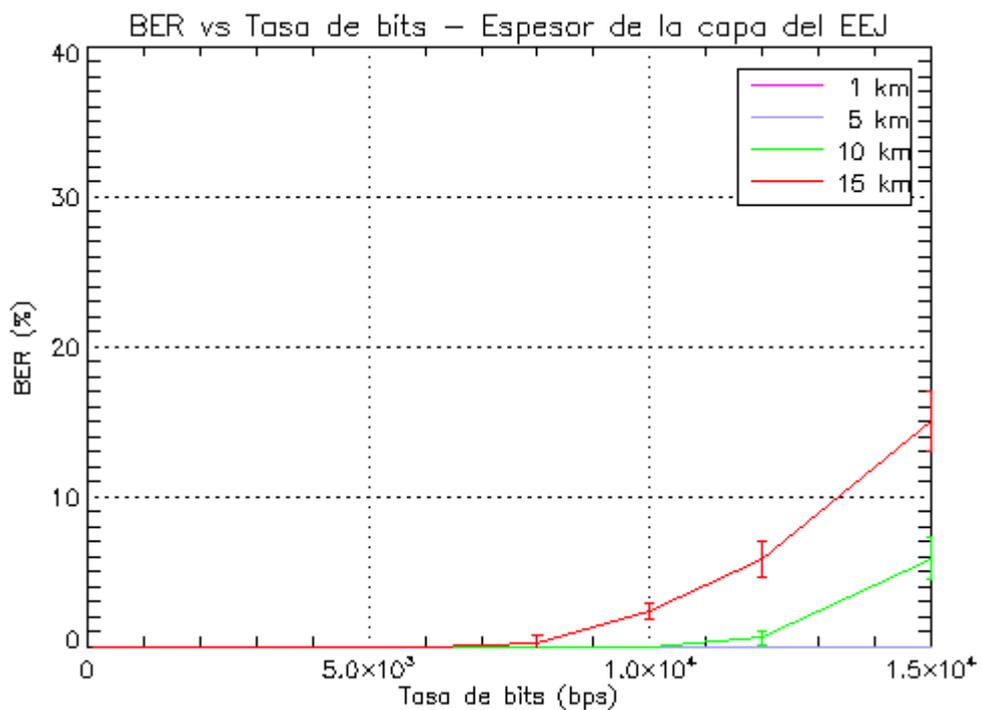


Figura 3.12. BER vs tasa de bits considerando la variación del espesor del canal EEJ y un SNR de 30 dB

En la figura 3.12 se muestra un gráfico estadístico de la variación de la calidad de las comunicaciones digitales en función de la tasa de bits y considerando

la variación del ancho del canal. Se opta por simular señales digitales con alto SNR, de modo que su calidad dependa más del espesor de la capa del EEJ que de la potencia de transmisión. Se observa que, a mayor espesor del canal EEJ, se producirá una mayor tasa de error de bits. Esto se hace más notorio en el caso de un EEJ con espesor de 15 km, en el que se aprecia que, para el nivel de SNR considerado, el BER empieza a incrementarse a partir de una tasa de 7 kbps, aproximadamente. Con esta tasa se consigue un BER de 0.1% y constituye la tasa de bits máxima a la cual, bajo buenas condiciones de SNR y para el tipo de modulación empleado en estas simulaciones, es posible la transmisión de datos a través del EEJ.

3.2.1.3.4. Calidad en función de la tasa de bits

La tasa de bits indica la cantidad de bits que se transmite por unidad de tiempo a través de un sistema de comunicaciones. Para el caso de la modulación FSK empleada en las simulaciones, cada símbolo transporta un bit de información. A medida que se reduce el tiempo de duración de cada uno de estos símbolos, éstos se verán más afectados ante los desvanecimientos, lo cual podría ocasionar la pérdida de bits con la consiguiente degradación de la calidad del mensaje recibido. El mensaje se vería aun más afectado por los desvanecimientos si se emplea una modulación M-aria, en el que cada símbolo transporta una mayor cantidad de bits.

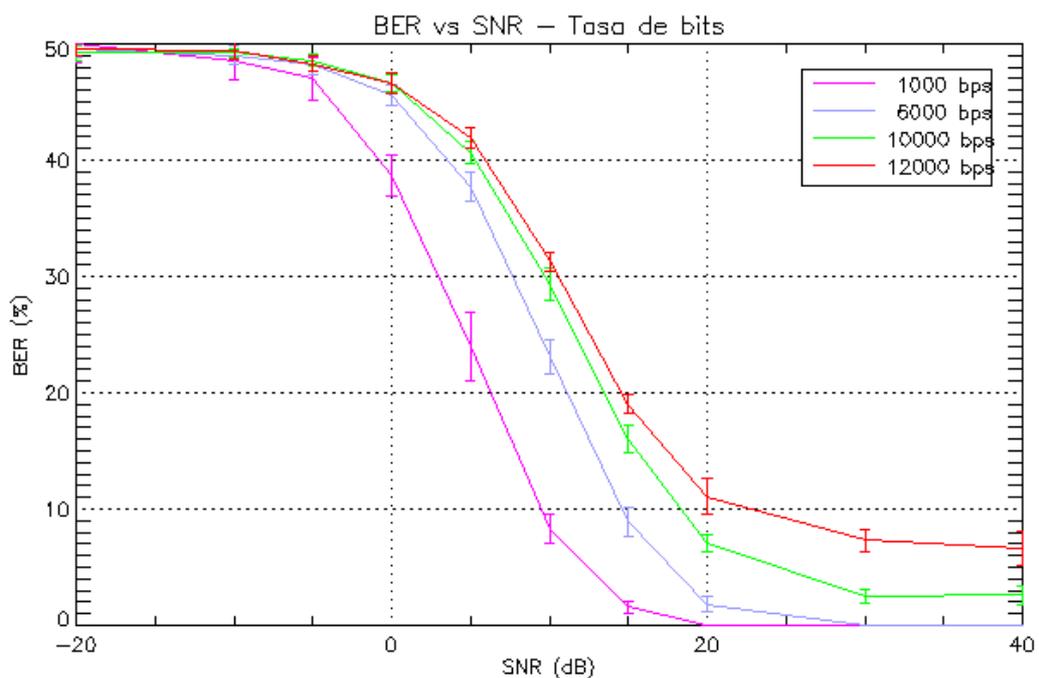


Figura 3.13. BER vs SNR considerando la variación de la tasa de bits

En la figura 3.13 se observa la variación del BER respecto al SNR considerando la variación de la tasa de bits para un canal EEJ de 15 km de espesor. Se aprecia que, a medida que la tasa de bits se incrementa, aumenta también el BER. Además, a mayor SNR, se logra una disminución de la tasa de error de bits, pero solo hasta un determinado nivel de BER, el cual es menor para tasas más bajas. De lo anterior se concluye que, para alcanzar altas tasas de transferencia, se requiere aumentar el SNR pero solo hasta cierto valor, a partir del cual el BER se mantendrá constante debido a la limitación impuesta por el espesor de 15 km del EEJ.

3.2.1.3.5. Calidad empleando diversidad

De manera similar a lo que ocurre en el caso de voz, el empleo de diversidad permite mejorar la calidad de las comunicaciones de datos. Esto se debe a que los desvanecimientos se producen de manera aleatoria, por lo que es posible contrarrestar los efectos de estos desvanecimientos a través del empleo de diversidad.

En la figura 3.14 se muestra la variación del BER respecto al SNR y la diversidad considerando una capa del EEJ de 15 km de espesor. Se observa que el BER disminuye considerablemente con la simulación de dos realizaciones independientes para la transmisión (diversidad 1). De esta forma, es posible transmitir la misma señal con 4 dB menos respecto del caso de transmisión con solo una realización (diversidad 0). Analizado de otra forma, con el mismo SNR es posible obtener un BER menor en 6% con el uso de realizaciones. En el caso de más de dos realizaciones, esta mejora es solo incremental respecto al número de diversidad inferior. Por ejemplo, con 4 realizaciones (diversidad 3) se logra obtener la misma calidad empleando 1 dB menos respecto al caso de transmisión con 3 realizaciones (diversidad 2). De manera similar, se observa que, para el mismo nivel de SNR, el uso de 4 realizaciones produce un BER menor en 2% respecto al uso de 3 realizaciones.

De esta forma se comprueba la utilidad del empleo de la técnica de diversidad para mejorar la calidad de la información digital recibida sin necesidad de incrementar la potencia de transmisión.

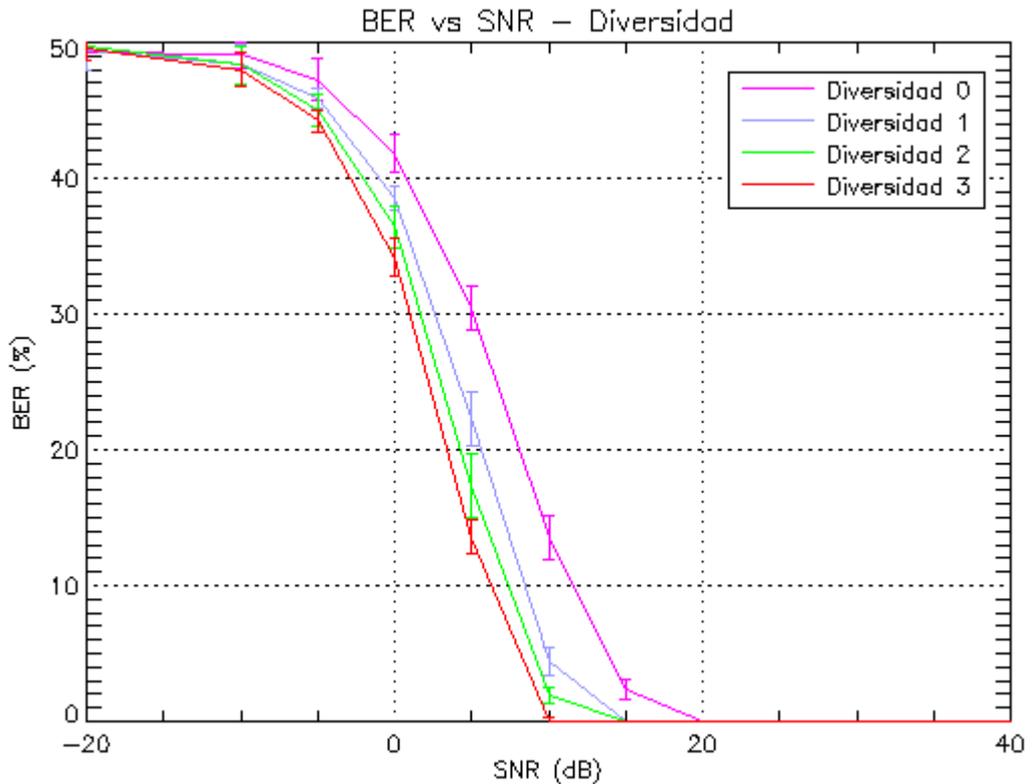


Figura 3.14. BER vs SNR considerando distintos números de realizaciones para la simulación de diversidad para un canal EEJ de 15 km de espesor y una tasa de bits de 2000 bps

3.2.2. Simulación de la transmisión de datos de modo indirecto

Como se mencionó en el capítulo 2, la simulación de la transmisión de datos de modo indirecto consiste en modular los caracteres dentro del ancho de banda del canal de voz a través de un software de modulación y demodulación digital usado por radioaficionados, con el cual se generará un audio que será luego ingresado al simulador.

El software de radioaficionados ofrece diversos tipos de modulación, entre los cuales se seleccionaron los siguientes modos:

- PSK31 (@ 31 baudios)
- PSK250 (@ 250 baudios)
- QPSK31 (@ 31 baudios)
- QPSK250 (@ 250 baudios)
- MFSK32 (@ 32 baudios)
- MFSK64 (@ 64 baudios)

Con estos tipos de modulación a diferentes tasas fue posible estudiar la variación de la calidad de las comunicaciones de datos modulados usando el software de radioaficionados considerando distintos parámetros del sistema de comunicaciones. Para cuantificar dicha calidad se empleó como parámetro la tasa de caracteres errados recibidos respecto a los transmitidos.

En las tablas 3.1 y 3.2 se presentan estadísticas de la variación de la tasa de caracteres errados para distintos tipos de modulación y diferentes tasas, considerando varios niveles de SNR, tanto el caso de transmisión con diversidad como con sin uso de esta técnica. Del análisis de ambas tablas pueden extraerse las siguientes observaciones respecto a la variación de los siguientes parámetros:

- a) **SNR.-** La tasa de caracteres errados disminuye a medida que se incrementa el SNR, como se observa en ambas tablas para los distintos modos empleados en las simulaciones. Por ejemplo, en la tabla 3.1 se observa que, para condiciones de SNR de 14 dB y empleando la modulación MFSK64 sin el uso de diversidad, se obtiene una tasa de caracteres errados de 5.56%, mientras que, para un SNR de 16 dB, la totalidad de caracteres se recibe correctamente. Esto puede comprobarse también en la figura 3.15, realizada en base a los valores obtenidos en la tabla 3.1. Esta figura muestra la variación de la tasa de caracteres errados en función del SNR para los modos PSK31 y PSK250. Se observa que, para ambos modos, la tasa de caracteres errados disminuye a medida que se incrementa el SNR.

- b) **Tasa de bits.-** El incremento de la tasa de bits provoca un aumento de la tasa de caracteres errados para niveles medio y bajo de SNR, lo cual se comprueba en ambas tablas para los distintos tipos de modulación (PSK, QPSK y MFSK). El uso de tasas altas presenta la ventaja de que la información puede ser transmitida a mayor velocidad, pero se requiere de condiciones de buen SNR para que el mensaje sea recibido sin errores. Por ejemplo, considerando la modulación PSK para un SNR de 14 dB (tabla 3.1), con el modo PSK31 (a 31 bps) se obtiene la totalidad de caracteres correctamente recibidos, mientras que con el modo PSK250 (a 250 bps) la tasa de caracteres errados obtenidos aumenta de manera significativa a 42.88%, por lo cual el mensaje resulta poco inteligible. En la figura 3.15 se observa que, efectivamente, la tasa de caracteres errados obtenidos para un mismo SNR es mayor con el modo PSK250 que con el modo PSK31.

Tabla 3.1. Tasa de caracteres errados obtenidos de las simulaciones de comunicaciones de datos de modo indirecto sin el uso de diversidad

SNR (dB)	SIN DIVERSIDAD					
	PSK		QPSK		MFSK	
	PSK31	PSK250	QPSK31	QPSK250	MFSK32	MFSK64
4	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
6	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
8	47.60%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
10	17.02%	92.42%	65.74%	100.00%	36.17%	100.00%
12	6.38%	80.0%	31.21%	100.00%	0.00%	87.66%
14	0.00%	42.88%	0.00%	87.90%	0.00%	5.56%
16	0.00%	25.00%	0.00%	33.15%	0.00%	0.00%
18	0.00%	9.04%	0.00%	8.53%	0.00%	0.00%
20	0.00%	3.49%	0.00%	2.04%	0.00%	0.00%
22	0.00%	1.14%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
24	0.00%	0.76%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
26	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
28	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla 3.2. Tasa de caracteres errados obtenidos de las simulaciones de comunicaciones de datos de modo indirecto con el uso de diversidad

SNR (dB)	CON DIVERSIDAD					
	PSK		QPSK		MFSK	
	PSK31	PSK250	QPSK31	QPSK250	MFSK32	MFSK64
4	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
6	60.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
8	8.51%	98.86%	70.00%	100.00%	19.15%	100.00%
10	0.00%	53.85%	4.26%	100.00%	0.00%	84.57%
12	0.00%	32.50%	0.00%	91.86%	0.00%	0.00%
14	0.00%	7.20%	0.00%	15.67%	0.00%	0.00%
16	0.00%	1.52%	0.00%	1.71%	0.00%	0.00%
18	0.00%	0.10%	0.00%	0.19%	0.00%	0.00%
20	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
22	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
24	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
26	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
28	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

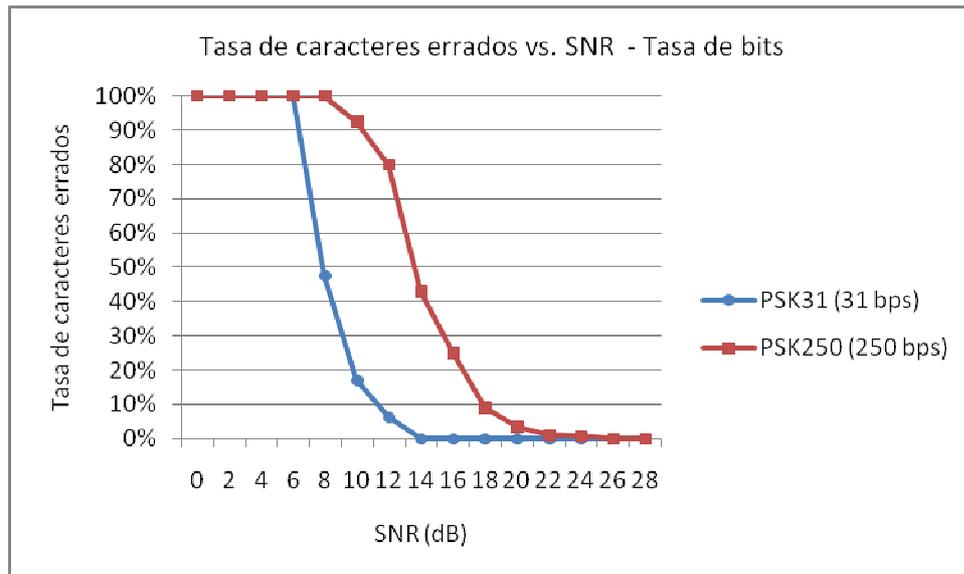


Figura 3.15. Tasa de caracteres errados vs SNR considerando la variación de la tasa de bits. Se emplean los modos PSK31 y PSK250

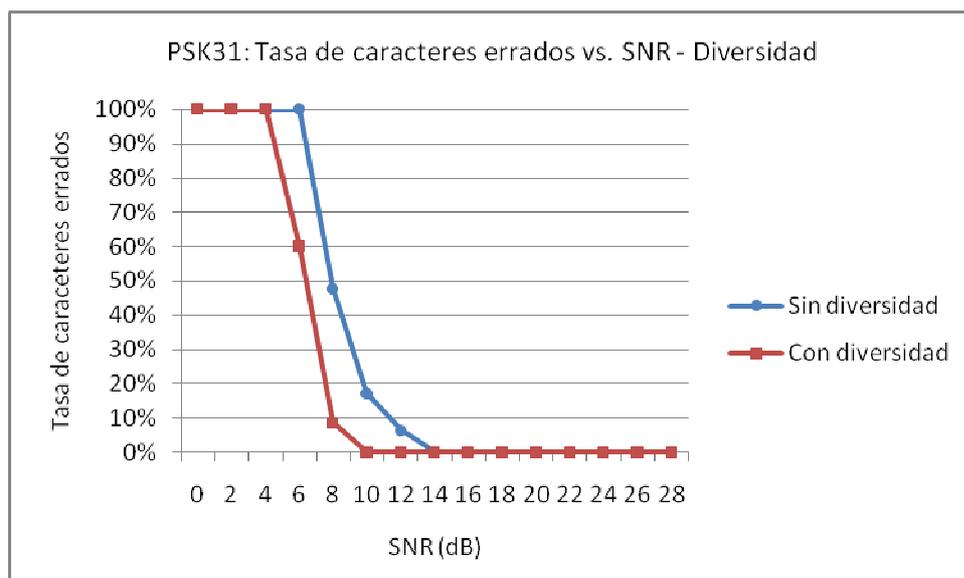


Figura 3.16. Tasa de caracteres errados vs SNR considerando el uso de diversidad para el modo PSK31

- c) **Diversidad.-** La técnica de diversidad reduce de manera considerable la tasa de caracteres errados, con lo que se logra una gran mejora de la calidad del mensaje recibido. Por ejemplo, comparando las tablas 3.1 y 3.2 para el caso del modo PSK31 y bajo condiciones de SNR de 10 dB, se obtiene una tasa de caracteres errados de 17.02%, la cual se reduce a cero con el empleo de diversidad. Esto puede comprobarse en la figura 3.16, realizada en base a las tablas anteriormente mencionadas, la cual presenta

la variación de la tasa de caracteres errados respecto a la variación del SNR considerando la aplicación de la técnica de diversidad para el modo PSK31. Se observa que es posible obtener la misma tasa de caracteres errados transmitiendo hasta con 4 dB menos de potencia.

Las observaciones extraídas de los cuadros estadísticos y las gráficas presentadas anteriormente corroboran las tendencias de las curvas estadísticas de las simulaciones de transmisión de datos modulados directamente, las cuales fueron presentadas en la sección 3.2.1.

3.3. Otros resultados

De manera adicional a los modos digitales mencionados anteriormente, se realizaron simulaciones usando el modo de transmisión por radiopaquetes. Además se implementó un *sqelch* digital en el simulador, el cual se aplicó tanto para la transmisión de voz como de datos.

Los modos de transmisión por radiopaquetes empleados para las simulaciones de transmisión de datos fueron Packet300, Packet1200 y Packet2400, los cuales transmiten a velocidades de 300, 1200 y 2400 baudios, respectivamente. Con el modo Packet300 se requirió niveles de SNR muy altos (más de 30 dB) para recibir correctamente los paquetes enviados. Con el uso de diversidad con dos realizaciones se logró obtener la misma calidad para niveles de SNR altos, pero ligeramente menores (a partir de 20 dB). A medida que la velocidad de transmisión se incrementa, los símbolos tienen menor duración, por lo que los paquetes transmitidos se ven más afectados por los desvanecimientos. Por esta razón, para los otros dos modos se requirieron niveles aun más altos de SNR y/o el empleo de diversidad. En las simulaciones usando Packet1200 fue posible recibir correctamente a partir de un SNR mayor a 45 dB sin el uso de diversidad y un nivel de 30 dB con el uso de dos realizaciones del canal. En el caso de Packet2400 solo fue posible recibir los paquetes empleando por lo menos tres realizaciones y niveles muy altos de SNR (más de 30 dB).

Se realizó también la implementación de un *sqelch* (silenciador) en el simulador, basado en los experimentos de comunicaciones de voz realizados en 1972 por Heraud [18]. Como se mencionó en la sección 1.3, el *sqelch* permite suprimir la salida de audio del receptor durante los cortos instantes de tiempo en los

que se producen los desvanecimientos en la señal, con lo cual se logra que éstos sean menos perceptibles al oído. En las simulaciones de transmisión de voz de este trabajo se comprobó que, en efecto, los desvanecimientos son menos notorios, de manera similar a los resultados obtenidos en los experimentos de Heraud [18]. Sin embargo, no es posible lograr una mejora real de la calidad de la voz, lo cual sí se consigue con la aplicación de diversidad. Para el caso de datos, tanto modulados de manera directa como indirecta, la calidad tampoco mejora debido a la pérdida de información que se produce al silenciar parte de la señal.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS DE CAMPO: ENLACE JICAMARCA-PARACAS

En este capítulo se describen la configuración y el procedimiento seguido para la ejecución de las pruebas de campo realizadas a través del enlace Jicamarca-Paracas. Se muestran además los resultados de dichas pruebas y el análisis respectivo de las mismas.

4.1. Introducción

Con el objetivo de demostrar las mejoras en las comunicaciones utilizando diversidad, se realizaron pruebas de campo empleando el enlace entre Jicamarca y Paracas para comunicaciones vía EEJ diseñado y establecido por Chocos [5]. Para dichas pruebas se optó por el empleo de la técnica de diversidad en frecuencia debido a la disponibilidad de los equipos y la simplicidad de la configuración y procesamiento respecto de otras técnicas de diversidad.

Antes de ejecutar las pruebas de campo, se realizaron pruebas de laboratorio dentro de las instalaciones del Radio Observatorio de Jicamarca con el propósito de conocer el comportamiento de los equipos, ensayar la configuración para el experimento y probar el procesamiento a emplear para el tratamiento de las señales y la aplicación de diversidad. Estas pruebas se realizaron en dos partes. En la primera de ellas se ensayó el esquema que se emplearía para las pruebas, con la diferencia de que la salida de la parte de transmisión sería atenuada y conectada directamente a la recepción. En la segunda parte, se transmitió la señal con línea de vista entre dos puntos cercanos dentro del ROJ y sin presencia del EEJ, con lo cual fue posible ajustar algunos parámetros de configuración, identificar y superar

algunos inconvenientes en el procedimiento original planteado y definir finalmente el esquema a implementar en las pruebas entre Jicamarca y Paracas.

4.2. Geometría del enlace

Como se mencionó anteriormente, las pruebas de campo se realizaron sobre la base del enlace Jicamarca-Paracas para comunicaciones vía EEJ². Este enlace usa parte del sistema del radar biestático Jicamarca-Paracas del ROJ, el cual opera a una frecuencia de 49.92 MHz. Este radar es utilizado para la medición de la región E del perfil de densidad de electrones [11].

En la tabla 4.1 se presentan los parámetros del enlace de comunicaciones. A partir de las coordenadas de cada estación se calculó el locus de perpendicularidad [5], conformado por todos los puntos en los que se cumpla la condición de Bragg, lo cual se grafica en la figura 4.1. El plano de elevación del enlace se aprecia en la figura 4.2, la cual representa el EEJ a una altura promedio de 100 km y muestra una separación entre ambas estaciones de 222.41 km, en las que se ubican antenas orientadas con un ángulo de elevación de 41.96 ° hacia una región determinada por el locus de perpendicularidad en la que las ondas de radio serán dispersadas por las irregularidades del EEJ.

Tabla 4.1. Características del enlace de comunicaciones

PARÁMETRO	JICAMARCA -> PARACAS
COORDENADAS DEL LUGAR DE TRANSMISIÓN	11.950° S 76.867° O
COORDENADAS DEL LUGAR DE RECEPCIÓN	13.852° S 76.249° O
ALTITUD DEL LUGAR DE TRANSMISIÓN	524 m.s.n.m.
ALTITUD DEL LUGAR DE RECEPCIÓN	12 m.s.n.m.
DISTANCIA ENTRE LOS PUNTOS DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN	212.41 km
ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LAS ANTENAS	41.96 °
PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN EN EL ESPACIO LIBRE (@ 49.92 MHz)	-116.11 dB

² En [5] se halla una descripción detallada de los cálculos del enlace y la configuración del sistema de comunicaciones en el enlace Jicamarca-Paracas.

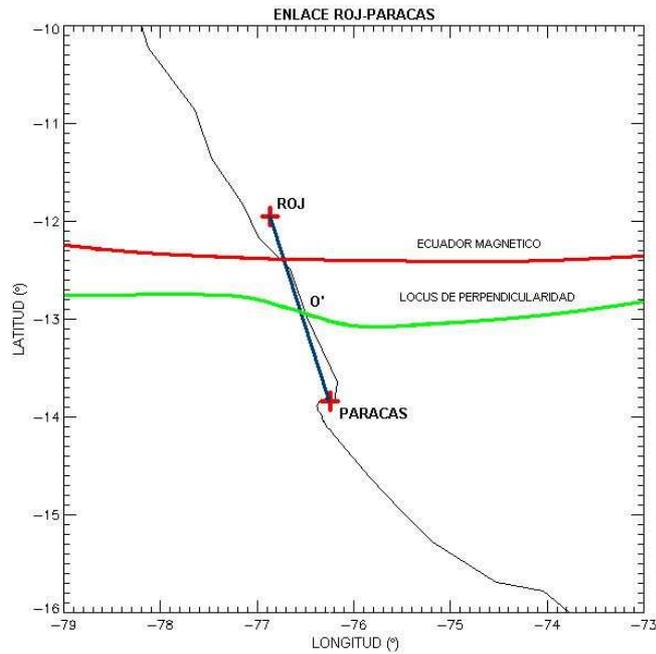


Figura 4.1. Locus de perpendicularidad entre las estaciones de Jicamarca y Paracas [5]

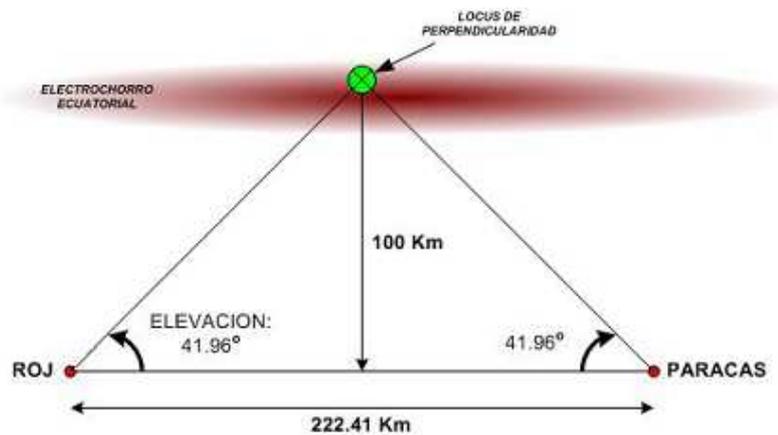


Figura 4.2. Plano de elevación del enlace Jicamarca-Paracas [5]

4.3. Configuración del sistema

La configuración del sistema considera tanto la configuración del hardware como del software empleado en las pruebas de campo.

4.3.1. Configuración del hardware

La ejecución de las pruebas de campo considera la transmisión desde Jicamarca usando la técnica de diversidad en frecuencia, para lo cual se emplean dos radio transceptores operando a frecuencias distintas. La recepción se realiza en

Paracas mediante un sistema de adquisición basado en receptores digitales, el cual permite el posterior procesamiento de los datos en una computadora [26].

Los principales componentes de cada una de las estaciones son los siguientes:

Transmisión (desde Jicamarca):

- 2 Radio transceptores
- 2 Fuentes de alimentación para las radios
- 2 Interfaces entre la computadora y el radio transceptor
- 1 Computadora
- Antenas

Recepción (en Paracas):

- Sistema de adquisición basado en receptores digitales
- 1 Computadora para el procesamiento
- Antenas

Los parámetros básicos de este sistema se consignan en la tabla 4.2 y el diagrama de bloques de la configuración del sistema se presenta en la figura 4.3. De manera más detallada, en las secciones siguientes se describirán las configuraciones realizadas tanto para la parte de transmisión como para la recepción.

Tabla 4.2. Parámetros básicos del sistema de comunicaciones

PARÁMETRO	CARACTERÍSTICA
FRECUENCIAS DE OPERACIÓN	49.75 MHz y 50.25 MHz
POTENCIA DE TRANSMISIÓN	80 W
ANCHO DE BANDA DE TRANSMISIÓN	25 kHz
ANCHO DE BANDA DE CADA CANAL DE RECEPCIÓN	250 kHz
ANTENAS	Arreglo de 16 antenas Yagi de 4 elementos y 18 dBi de ganancia. Frecuencia de operación: 50 MHz Ancho de banda: 1 MHz Polarización cruzada – dipolo doblado.

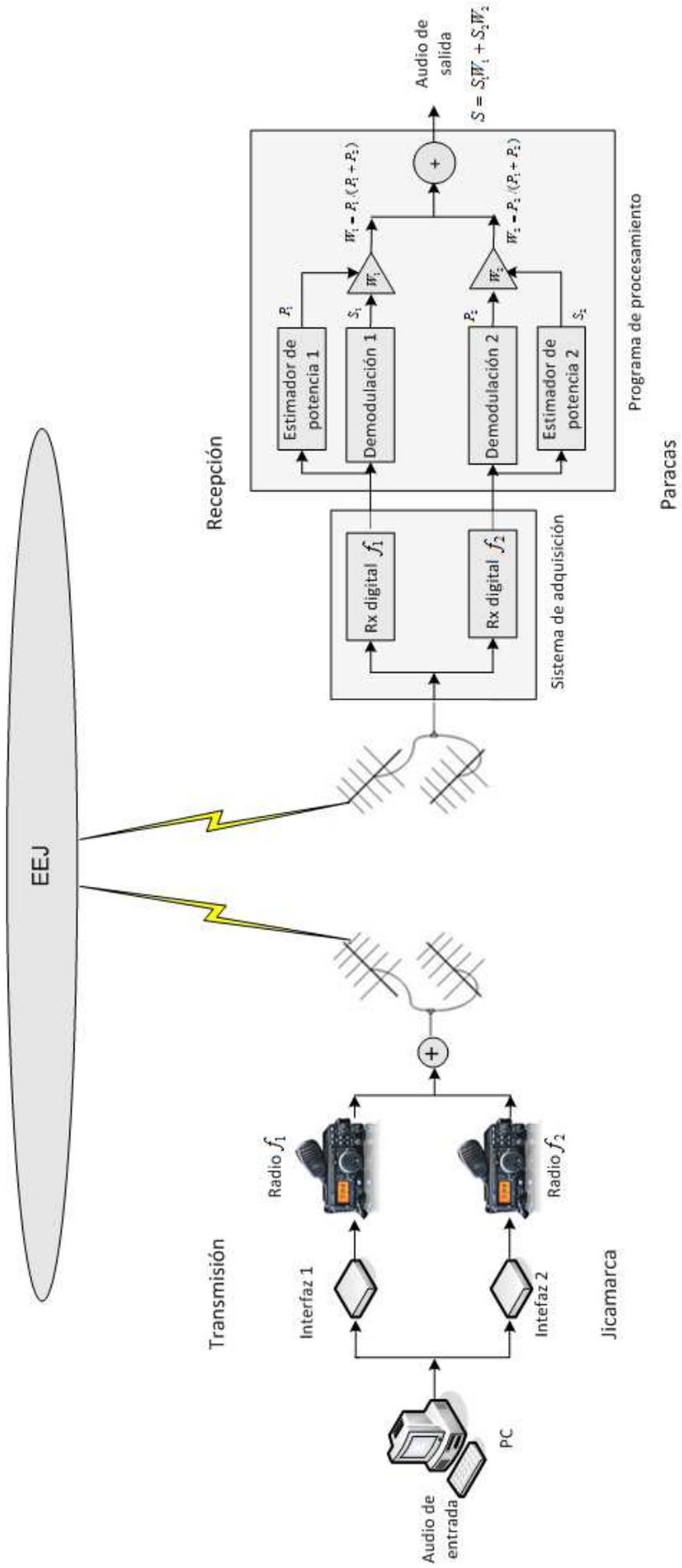


Figura 4.3. Diagrama de bloques de la configuración para las pruebas entre Jicamarca y Paracas

4.3.1.1. Configuración del sistema de transmisión

Para la transmisión empleando diversidad se reproduce un audio en la computadora, el cual puede contener voz o datos modulados en el ancho de banda del canal de voz. Luego, a la salida de la tarjeta de sonido, se divide la potencia de la señal en dos partes iguales con la finalidad de obtener dos señales idénticas que serán transmitidas a cada una de las radios operando a frecuencias distintas. Antes de que ingresen las señales, se coloca una interfaz de aislamiento para proteger tanto la radio como la tarjeta de sonido y, a la vez, controlar la radio a través del puerto serial de la computadora.

En la tabla 4.3 se indican las características de las radios empleadas [27][28]. Una de ellas fue configurada para operar a la frecuencia de 49.75 MHz y, la otra, a 50.25 MHz, de modo que se encuentren aproximadamente alrededor de 49.92 MHz, la cual constituye la frecuencia de operación del sistema del radar biestático Jicamarca-Paracas. Además, la separación entre las frecuencias seleccionadas (500 kHz) es mucho mayor que el ancho de banda de la señal modulada transmitida (25 kHz), con lo cual se asegura que los espectros de las señales no se interferirán.

Tabla 4.3. Características de los radios transceptores empleados en la transmisión desde Jicamarca

PARÁMETRO	RADIO TRANSCÉPTOR 1	RADIO TRANSCÉPTOR 2
MARCA	YAESU	ICOM
MODELO	FT-897	IC-706MKIIG
POTENCIA MÁXIMA @ 50 MHz	100W	100W
BANDAS	HF, 6M, 2M, 70CM	HF, 6M, 2M, 70CM
MODOS	AM, FM, SSB, CW, <i>PACKET RADIO</i> a 1200 y 9600 BPS	AM, FM, SSB, CW, <i>PACKET RADIO</i> a 1200 y 9600 BPS
SENSIBILIDAD EN FM @ 50 MHz	-120 dBm @ SNR = 12	-120 dBm @ SNR = 12
IMPEDANCIA DE ENTRADA / SALIDA	50 Ω	50 Ω
VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN	13.8 VDC	13.8 VDC

Se configuraron además los radios para que transmitan con modulación FM, debido a que es el tipo de modulación que mejor calidad de comunicaciones ofrece, de acuerdo con los experimentos realizados anteriormente [5][23] y los resultados obtenidos de las simulaciones del presente trabajo. Se estableció además la potencia de transmisión a 80 W, la cual se mantuvo para todo el experimento.

En la figura 4.4 se muestra parte de la disposición de los equipos anteriormente mencionados para la transmisión desde Jicamarca. Se observan la computadora en la que se reproduce el audio a transmitir, las dos radios operando a frecuencias distintas y, sobre cada una de ellas, las interfaces de aislamiento.



Figura 4.4. Disposición de los equipos para la transmisión empleando diversidad en frecuencia. La misma señal se transmite a través de dos radios operando a frecuencias distintas.



Figura 4.5. Arreglo de antenas para la transmisión desde Jicamarca (16 antenas Yagi)

Finalmente, las señales moduladas obtenidas a la salida de los radios son combinadas y enviadas para su transmisión. Para ello se emplea el arreglo de antenas Yagi del radar biestático Jicamarca-Paracas. El arreglo de antenas en Jicamarca consta de 16 antenas Yagi con polarización cruzada, las cuales se encuentran dispuestas de manera lineal según se muestra en la figura 4.5. El arreglo de antenas se caracteriza además por estar diseñado para operar a una frecuencia de 50 MHz, con un ancho de banda de 1 MHz y 18 dBi de ganancia.

4.3.1.2. Configuración del sistema de recepción

El sistema de recepción empleado en las pruebas de campo en Paracas consta de tres componentes principales [29]. La primera de ellas se encarga del tratamiento analógico de la señal recibida, para lo cual se emplean filtros pasabanda, amplificadores, desacopladores de DC y limitadores para proteger el sistema contra sobrevoltajes. La segunda parte permite generar un reloj estable para el sistema de adquisición. Finalmente, la tercera parte se compone de un sistema de adquisición de datos basado en receptores digitales integrados en una tarjeta comercial de la serie Echotek (de la empresa Mercury Computer Systems), la cual es colocada en una computadora destinada a la adquisición de datos a través de la interfaz PCI [29]. En la figura 4.6 se presenta la disposición de los equipos para la recepción en Paracas.

El sistema de adquisición basado en receptores digitales permite ejecutar una serie de tareas. Primero, realiza la conversión análogo/digital de la señal proveniente del arreglo de antenas. A continuación, separa la señal digitalizada en distintos canales (por frecuencia y polarización), cada uno de los cuales es trasladado a banda base, tras lo cual se realiza la decimación y filtrado digital de cada una de las señales obtenidas [26].

El software de adquisición de la tarjeta permite almacenar los voltajes de las señales obtenidas en archivos de datos, los cuales serán posteriormente procesados. Permite además configurar una serie de parámetros para la adquisición, los cuales incluyen el número de canales, las frecuencias a adquirir, la resolución de muestreo, el tamaño de los archivos de datos, etc. Para los propósitos de las pruebas se configuró la tarjeta para que adquiera cuatro canales de datos: dos por cada frecuencia (49.75 MHz y 50.25 MHz), cada una de las cuales se recibe con dos polarizaciones. El software permite definir también el

ancho de banda de cada canal de recepción, el cual está determinado por la resolución a la cual se adquiere la señal (4us). La inversa de este parámetro indica la frecuencia de muestreo (250 kHz), la cual debe ser mayor o igual que la frecuencia máxima de la señal transmitida, según el criterio de Nyquist. De esta forma, se define para las pruebas un ancho de banda por canal de recepción de 250 kHz, el cual es mayor que el ancho de banda por canal de transmisión (25 kHz), con lo que se aseguran las comunicaciones de voz y datos que se desean realizar.



Figura 4.6. Disposición de los equipos para la recepción en Paracas. a) Computadora de adquisición empleada en las pruebas, b) Desacopladores de DC de los pre-amplificadores de campo, c) Pre-amplificadores, d) Computadora de adquisición empleada en el sistema del radar biestático, e) UPS, f) Visualización en tiempo real de la señal recibida.



Figura 4.7. Arreglo de antenas para la recepción en Paracas (2x8 antenas Yagi)

En la figura 4.7 se muestra el arreglo de antenas Yagi usadas para las pruebas. El arreglo consta de 2x8 antenas dispuestas de manera lineal, las cuales presentan las mismas características que las empleadas para la transmisión en Jicamarca.

4.3.2. Configuración del software y programas empleados

Para la realización de las pruebas de campo se usaron diversos software y programas, los cuales serán descritos a continuación:

4.3.2.1. Software de transmisión

La reproducción del audio transmitido se realiza de manera automática mediante el programa ROJ Beacon. Este es un programa escrito en lenguaje C y desarrollado en el Radio Observatorio de Jicamarca, el cual permite reproducir periódicamente un archivo de sonido en el computador a intervalos fijos de un minuto [5]. La interfaz gráfica del programa se muestra en la figura 4.8.



Figura 4.8. Interfaz gráfica del programa para transmisión ROJ Beacon

4.3.2.2. Software de modulación y demodulación de datos

Las comunicaciones de datos en las pruebas de campo se realizaron mediante la modulación de dichos datos en frecuencias audibles. Para ello se emplearon software de modulación digital, diseñados y usados por radioaficionados, tales como Fldigi [30], cuya interfaz se muestra en la figura 4.9, y MixW2 [31]. Ambos soportan una amplia variedad de tipos de modulación digital,

entre los cuales destacan PSK31, QPSK, MFSK, RRTY, radiopaquetes (en el caso de MixW2), entre muchos otros usados por radioaficionados.

Previa a la etapa de transmisión, los caracteres son ingresados por teclado al programa, el cual los modula en tonos de acuerdo con el tipo de modulación seleccionado. El audio generado es grabado y almacenado para su posterior reproducción en el programa ROJ Beacon usado para la transmisión.

Para la recuperación de los caracteres en la recepción se reproduce el archivo de sonido obtenido del procesamiento de los datos recibidos de las pruebas. Los caracteres recibidos son mostrados en pantalla y pueden ser comparados con los caracteres transmitidos para obtener la tasa de caracteres errados.

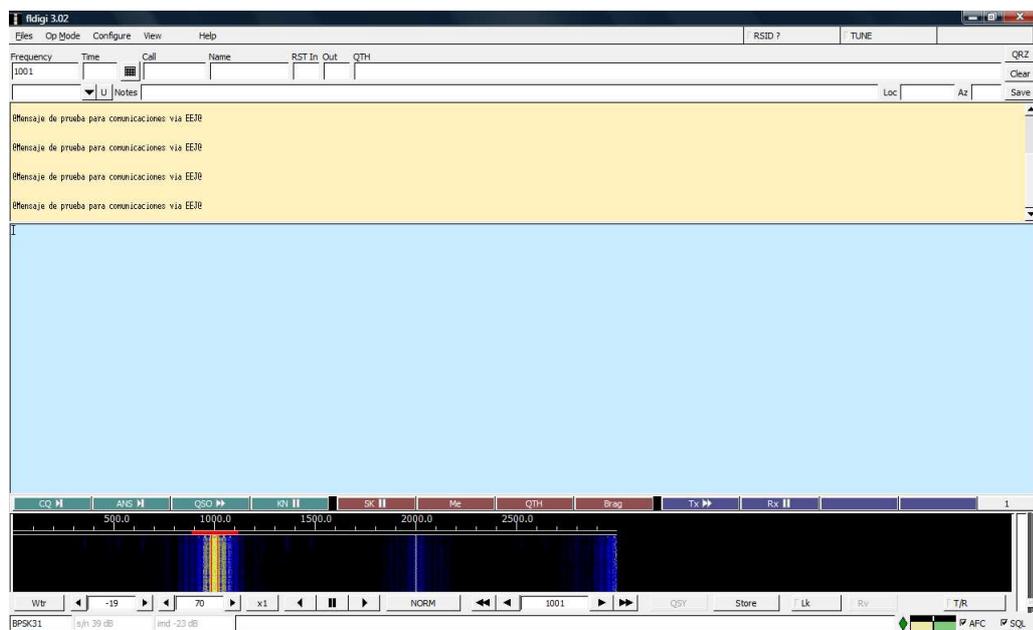


Figura 4.9. Interfaz del software de modulación digital Fldigi

4.3.2.3. Programa de procesamiento de datos

Se desarrolló un programa en lenguaje IDL (*Interface Definition Language*) [32] con la finalidad de realizar el procesamiento de los datos de las pruebas de campo. Este programa se encarga principalmente de leer los archivos de datos del experimento, demodular las señales recibidas de cada uno de los canales y realizar el procesamiento para el uso de diversidad. La descripción detallada del programa se encuentra en los anexos.

Para realizar este procesamiento, el programa ejecuta una serie de tareas. Primero, lee los archivos de datos crudos adquiridos, los cuales contienen los niveles de los voltajes de cada uno de los canales en banda base, además de la información de la configuración de los parámetros del experimento, como son el período de muestreo, el número de canales, el tamaño de los archivos de datos, etc. Una vez leída la información de cada canal, se procede a limitar el espectro de la señal a través de un filtro pasabajos, con el cual se logra disminuir considerablemente el ruido. Luego, se demodula en banda base las señales de cada uno de los canales. Para las pruebas se consideró únicamente modulación FM. A continuación, se corrige el retardo existente entre los distintos canales con la finalidad de que estén sincronizados para el uso de diversidad. Para la aplicación de esta técnica se emplea el método de combinación por tasa máxima, la cual consiste en ponderar cada una de las señales por su nivel de SNR. Por último, a partir de la señal resultante, se genera un archivo de sonido que contiene voz o datos modulados en tonos, el cual será almacenado para su posterior análisis.

Adicionalmente, este programa permite calcular el SNR de cada uno de los canales para usarla como referencia de la intensidad de la señal recibida. El programa implementa también un *scquelch* digital, el cual, como se mencionó en la sección 1.3, permite que los desvanecimientos de la voz sean menos perceptibles, pero no logra una mejora real de la calidad de la misma.

4.3.2.4. Programa de análisis de datos

Para el análisis de los resultados de las comunicaciones de voz se desarrolló un programa en el entorno de programación MATLAB [33]. El programa creado permite calcular el índice de correlación entre la voz recibida de las pruebas de campo y la voz recibida en condiciones de línea de vista. El programa permite también obtener gráficos del espectrograma de la voz, para lo cual se aprovechan las funciones ya implementadas con las que cuenta esta herramienta computacional.

4.4. Procedimiento empleado

Las pruebas de campo se realizaron durante una campaña que se extendió desde el 13 al 16 de octubre del 2008. Los dos primeros días se realizaron pruebas preliminares bajo condiciones reales de transmisión vía EEJ y se definió finalmente

la configuración a emplear en el experimento. Éste se realizó los dos días siguientes, durante los cuales se vio favorecido por la gran intensidad que presentó el EEJ, sobre todo durante el último día.

Durante el experimento se monitoreó constantemente la intensidad del campo magnético. A mayor magnitud de la diferencia de la componente horizontal del campo magnético medida en dos estaciones, una ubicada dentro del área cubierta por el EEJ y otra fuera de su influencia (ΔH), mayor será la intensidad del EEJ y, por consiguiente, se esperará una mejor calidad de las comunicaciones [5]. La base de datos del magnetómetro en línea que se encuentra en la página web del Radio Observatorio de Jicamarca contiene gráficas de la variación del campo magnético medido en distintas estaciones. De esta base de datos se extrajo la figura 4.10, la cual presenta la variación en el tiempo de la diferencia de los ángulos de Declinación (ΔD) y de las componentes Horizontal (ΔH) y Vertical (ΔZ) del campo magnético medidos entre Jicamarca y Piura, ubicada la primera dentro de la zona cubierta por el EEJ y, la segunda, fuera de ella. Se observa que el ΔH es mayor para horas entre las 8 a.m. y las 3 p.m. (en los gráficos el tiempo aparece en escala UT), por lo cual se optó por realizar las transmisiones durante estas horas diurnas. Además, se observa que en este último día el valor del ΔH fue muy alto respecto a otros días (valor máximo de 120 nT).

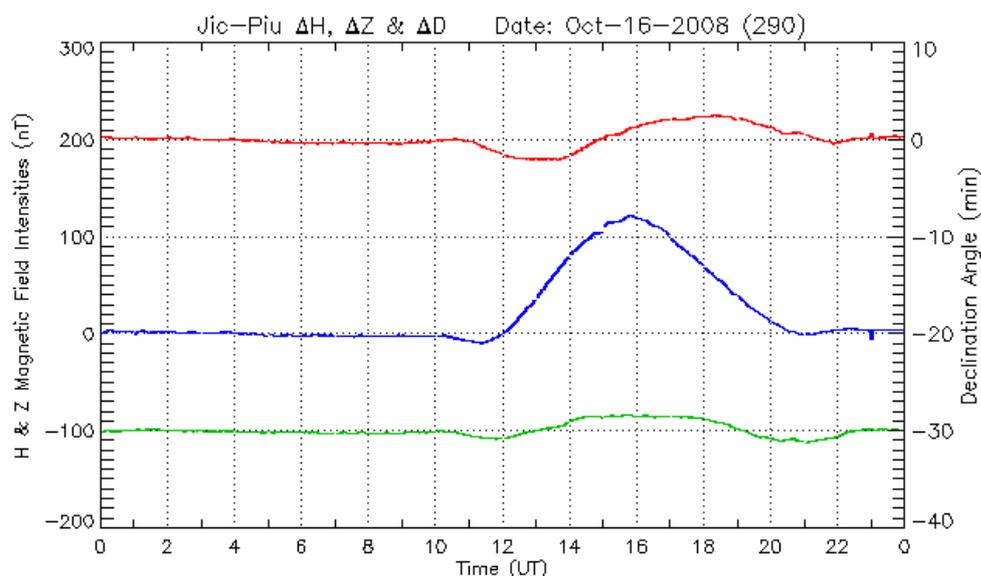


Figura 4.10. Gráfica de la variación de la diferencia de las componentes del campo magnético medidas entre Jicamarca y Piura para el segundo día de las pruebas de campo. Se observa que la intensidad del ΔH (línea central azul) se incrementa considerablemente en horas del día (gráfica disponible en [4])

Todos los resultados presentados en este documento corresponden a las pruebas realizadas el último día del experimento. Desde las 8:00 a.m. hasta las 3 p.m. se transmitió cada cierto tiempo la misma secuencia de archivos de voz y de datos modulados en distintos modos y empleando distintas tasas. En Paracas, el computador de adquisición se configuró para que adquiriera constantemente, de modo que se logre obtener archivos de datos crudos de todo el experimento. De esta forma, se consiguieron ejemplos de la variación de la calidad de la voz y datos para distintos niveles de SNR, el cual está asociado a la intensidad del EEJ y éste último, a su vez, al valor del ΔH . Con los datos así obtenidos fue posible conseguir ejemplos que muestran la calidad de la voz y datos recibidos para distintos parámetros, los cuales serán evaluados en la sección siguiente.

4.5. Resultados de las pruebas de campo

Las pruebas de campo permitieron determinar la calidad de las comunicaciones a través del EEJ, tanto de manera cualitativa como cuantitativa, así como validar los resultados obtenidos en el simulador. Los resultados tanto para el caso de la transmisión de voz como de datos se describen a continuación:

4.5.1. Resultados de la transmisión de voz

En las pruebas de campo se logró transmitir con éxito la voz a través del EEJ. El audio empleado es el mismo que el que fue usado para la simulación, el cual consta del mensaje 'Buenos días. Good morning', seguido por silencio y, finalmente, por un tono. La gráfica de esta señal y su espectrograma se mostraron en la figura 3.1.

El parámetro empleado para la cuantificación de la calidad de la señal es el índice de correlación de la señal recibida de las pruebas vía EEJ respecto a la señal recibida en condiciones de línea de vista.

4.5.1.1. Calidad de la voz en función del SNR

La calidad de las comunicaciones de voz varía en función del SNR. A mayor potencia de transmisión e intensidad del EEJ, la señal caerá menos veces debajo del nivel de ruido. De esta manera, ocurrirán menos desvanecimientos y se mejorará la inteligibilidad de la misma, lo cual se percibe claramente en la calidad de los audios recibidos. Ello puede verificarse de manera gráfica en las figuras 4.11 a) y 4.12 a), las cuales muestran la señal recibida para niveles de SNR de 11 dB y 21 dB, respectivamente. En éstas se observa que los desvanecimientos, mostrados como ruido impulsivo, son menos frecuentes en el caso de SNR más alto. Además, en el espectrograma correspondiente a la señal con SNR de 21 dB se comprueba la ocurrencia de un menor número de desvanecimientos, debido a que se presentan menos instantes de tiempo en los cuales la potencia se encuentra distribuida en todo el rango de frecuencias que en el caso de una señal con SNR de 11 dB. Esta diferencia puede cuantificarse a través del índice de correlación de cada una de las señales recibidas con la transmitida. Para el caso de la señal con SNR de 11, se obtuvo un índice de correlación de 0.27 y, para la de SNR de 21 dB, el valor de este parámetro aumentó a 0.7.

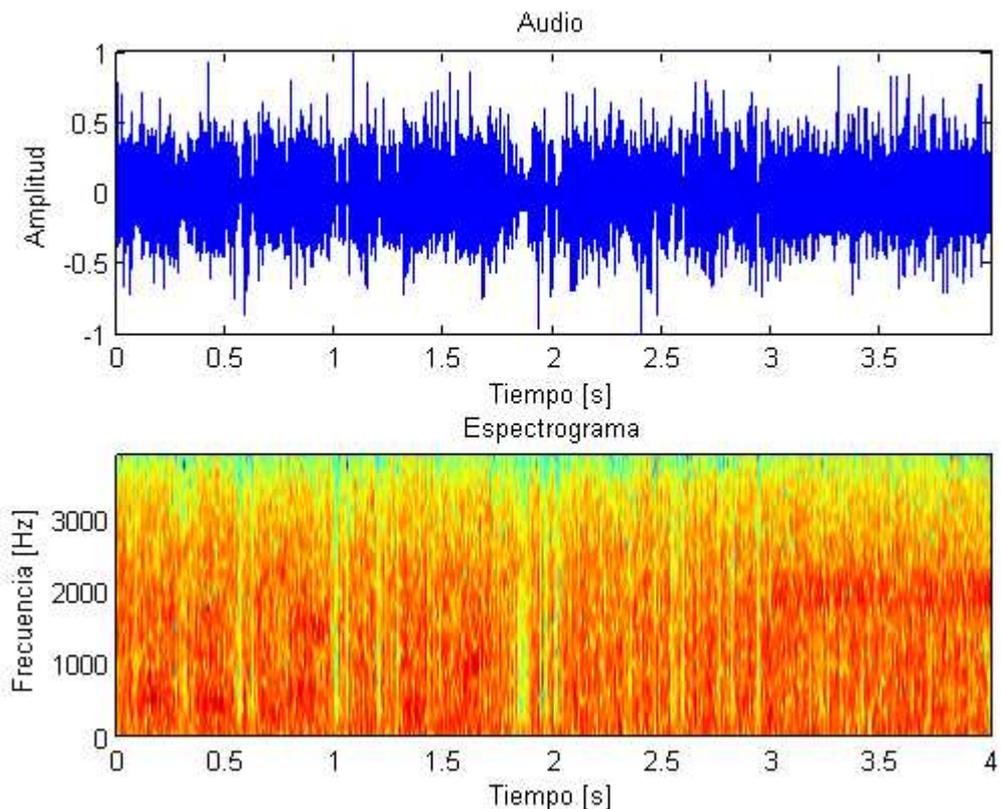


Figura 4.11. a) Audio recibido y b) su espectrograma para un SNR de 11 dB

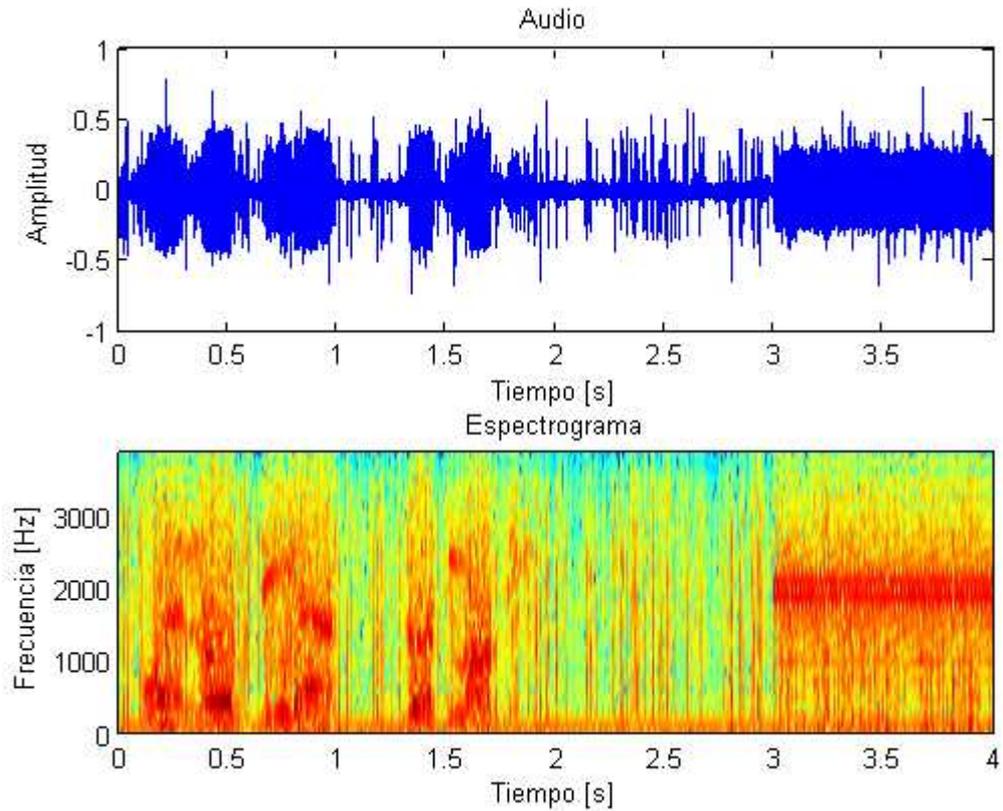


Figura 4.12. a) Audio recibido y b) su espectrograma para un SNR de 21 dB

4.5.1.2. Calidad de la voz en función del empleo de diversidad

De los resultados de las simulaciones se concluyó que el uso de diversidad permite mejorar la calidad de las comunicaciones de voz. Esta afirmación puede corroborarse a través de las pruebas de campo, en las cuales se aprecia de manera cualitativa que, efectivamente, los audios recibidos son más inteligibles debido a la disminución de los desvanecimientos.

En las figuras 4.11 y 4.12 mostradas en la sección anterior se observan el audio recibido y su espectrograma para niveles de SNR de 11 y 21 dB, respectivamente, para los cuales se ha considerado el uso de una sola frecuencia. Aplicando diversidad se obtienen las gráficas mostradas en las figuras 4.13 y 4.14. En éstas se aprecia que, para ambos valores de SNR, la diversidad permite mitigar los desvanecimientos disminuyendo el ruido impulsivo en el audio, lo cual se evidencia en el espectrograma como una menor cantidad de instantes de tiempo en los que la potencia se distribuye en todo el ancho del espectro.

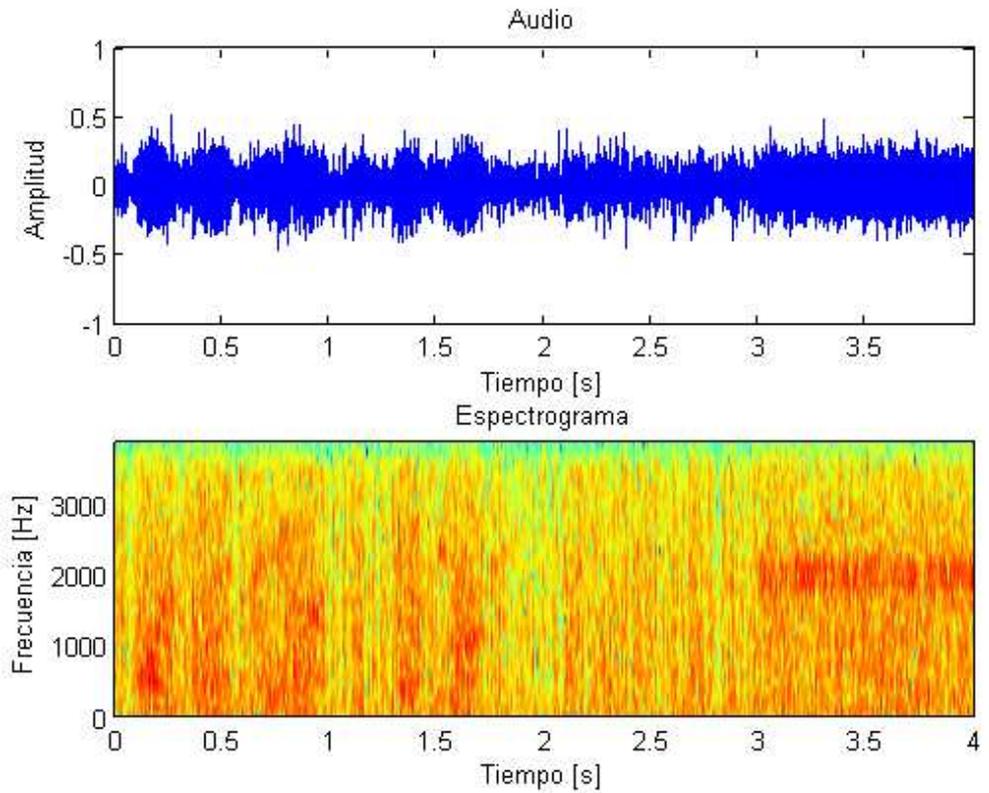


Figura 4.13. a) Audio recibido empleando diversidad y b) su espectrograma para un SNR de 11 dB

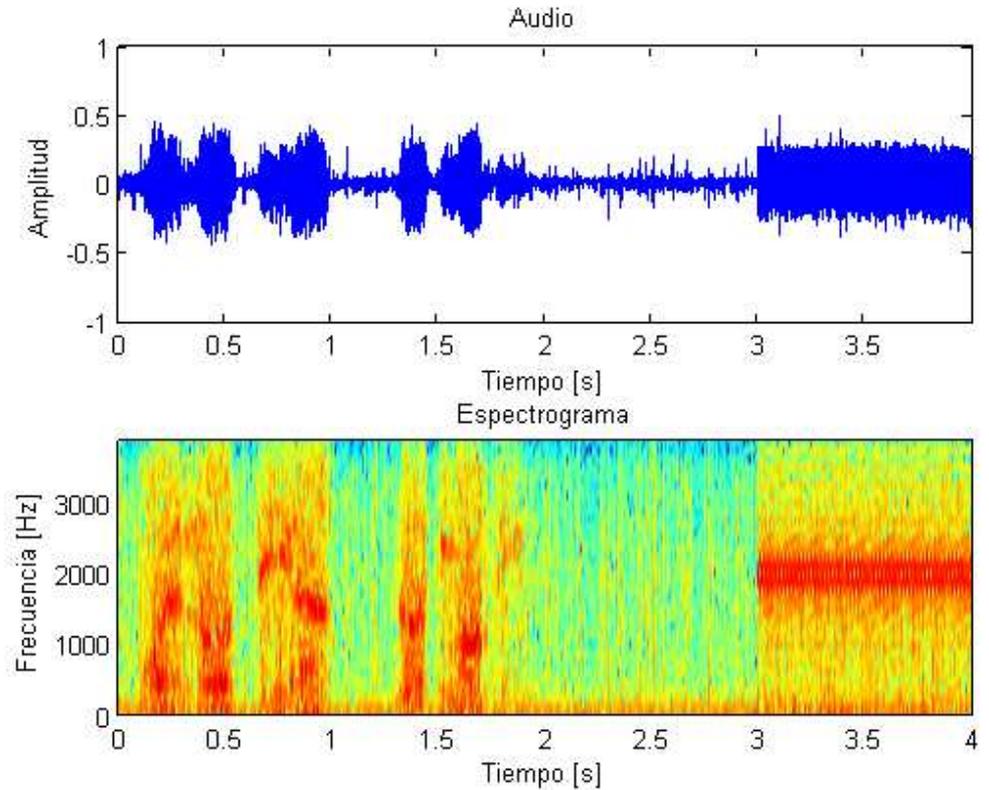


Figura 4.14. a) Audio recibido empleando diversidad y b) su espectrograma para un SNR de 21 dB

Esta mejora puede ser comprobada de manera cuantitativa a través del índice de correlación. Para el caso de la señal con un SNR de 11 dB, se observa que el coeficiente de correlación mejora de 0.27 a 0.44 con el uso de diversidad en frecuencia. De manera similar, para el caso de la señal con un SNR de 21 dB, se obtiene un incremento del coeficiente de correlación de 0.7 a 0.82, lo cual corrobora los resultados estadísticos de las simulaciones.

4.5.2. Resultados de la transmisión de datos

En las pruebas de campo se emplearon radio transceptores para la transmisión, por lo cual se optó por la transmisión de datos modulados dentro del ancho de banda del canal de voz. Como se mencionó en la sección 2.3.3.2, la ventaja de emplear este tipo de transmisión es que permite experimentar con diversos modos ya implementados en el software de modulación digital de radioaficionados. Sin embargo, en la práctica, la tasa de transmisión de datos se ve limitada por el ancho de banda del canal de voz y por la máxima desviación en frecuencia del modulador FM de los radio transceptores.

Los tipos de modulación empleados en las pruebas fueron los mismos que en el caso de las simulaciones de transmisión de datos de modo indirecto realizadas en el capítulo 3. Nuevamente, el parámetro usado para cuantificar la calidad de los comunicados de datos fue la tasa de caracteres errados.

En la tabla 4.4 se muestra el ejemplo de una transmisión de datos empleando modulación PSK250 para niveles de SNR de 15, 17 y 21 dB. Considerando una transmisión sin diversidad para condiciones de SNR de 15 dB, se recibe un mensaje poco inteligible, en el cual el porcentaje de caracteres errados es muy alto y asciende aproximadamente a 35%. Después de aplicar diversidad, esta tasa disminuye considerablemente a solo 0.76%, con lo cual es posible comprender el mensaje. De manera similar, para niveles de SNR de 17 dB se obtiene una tasa de caracteres errados de 9.47%, la cual se reduce a solo 0.38% con el uso de diversidad. Finalmente, se observa que para un SNR alto de 21 dB es posible recibir correctamente todos los caracteres, por lo que no se requiere el uso de diversidad. De esta forma, se comprueba que, a medida que el SNR mejora, la señal recibida presentará una menor tasa de caracteres errados. Además, se comprueba la mejora significativa que ofrece el empleo de diversidad en las comunicaciones de datos.

Tabla 4.4. Mensaje transmitido y mensajes recibidos usando modulación PSK250 para valores de SNR bajo y medio considerando el uso de diversidad

MENSAJE TRANSMITIDO	SNR	<p>@Mensaje de prueba para comunicaciones via EEJ. Esta es una comunicacion punto a punto utilizando al Electrochorro Ecuatorial como medio de dispersion. Mensaje 1. Mensaje 2. Mensaje 3. Mensaje 4. Mensaje 6. Mensaje 7. Mensaje 8. Mensaje 9. Mensaje 10. Hola mundo.@</p>		
MENSAJE RECIBIDO PSK250		SIN DIVERSIDAD	CON DIVERSIDAD	
		15 dB	<p>iaensaje_epseee p a co eunicaciones vue EE Esta es ent ° i edn on nO p +tmutilizando al Elect? m rro Eccatoritl como medio de d n,,rsoonu MenseA. Mensaje C o MSaDa enkMen e\le 4. Mensaje. Mennaje 7. Mensa#e 8 n teensaoaile. Mensajl1to. Uola muedo.@</p> <p>Porcentaje de caracteres errados: 35%, aproximadamente</p>	<p>@Mensaje de prueba para comunicaciones via EEJ. Esta es una comunicacion punto a punto utilizando al Electrochorro Ecuatorial como medio de dispersion. Mensaje 1. Mensaje 2. Mensaeae en. Mensaje 4. Mensaje 6. Mensaje 7. Mensaje 8. Mensaje 9. Mensaje 10. Hola mundo.@</p> <p>Porcentaje de caracteres errados: 0.76%</p>
		17dB	<p>@Mensaje de prueSa ratoomunicacioner gia EE Esta es una couunicac on puoeo a punC utilizand al Electrochorro Ecuatorial como medit de dispersion. Mensaje 1. Mensajr2. Mea aje 3. Mensaje 4. nsaje 6. Mensaj 7. Mensaje 8u Mensaje 9. nsaje 10. HoÃ mundo.@</p> <p>Porcentaje de caracteres errados: 9.47%</p>	<p>@Mensaje de prueba para comunicaciones via EEJ. Esta es una comunicacion punto a punto utilizando al Electrochorro Ecuatorial como medio de dispersion. Mensaje 1. Mensaje 2. Mensaje 3. Mensaje 4. Mensaje 6. Mensaje 7. Mensaje 8. Mensaje 9. Mens je 10. Hola mundo.@</p> <p>Porcentaje de caracteres errados: 0.38 %</p>
		21 dB	<p>@Mensaje de prueba para comunicaciones via EEJ. Esta es una comunicacion punto a punto utilizando al Electrochorro Ecuatorial como medio de dispersion. Mensaje 1. Mensaje 2. Mensaje 3. Mensaje 4. Mensaje 6. Mensaje 7. Mensaje 8. Mensaje 9. Mensaje 10. Hola mundo.@</p> <p>Porcentaje de caracteres errados: 0 %</p>	<p>@Mensaje de prueba para comunicaciones via EEJ. Esta es una comunicacion punto a punto utilizando al Electrochorro Ecuatorial como medio de dispersion. Mensaje 1. Mensaje 2. Mensaje 3. Mensaje 4. Mensaje 6. Mensaje 7. Mensaje 8. Mensaje 9. Mensaje 10. Hola mundo.@</p> <p>Porcentaje de caracteres errados: 0 %</p>

En el CD de anexos se presentan más ejemplos de los resultados de comunicaciones de datos para distintos niveles de SNR, tipos de modulación y velocidades de transmisión, tanto considerando el uso de diversidad como prescindiendo de ésta. Los resultados de estas pruebas pueden resumirse en las tablas 4.5 y 4.6, las cuales indican la tasa de caracteres errados obtenidos de las pruebas para los distintos parámetros del sistema mencionados anteriormente.

Del análisis de los ejemplos de las tablas es posible validar los resultados de las simulaciones, los cuales se indican a continuación:

- a) El aumento del nivel de SNR permite obtener comunicaciones de datos con una menor tasa de caracteres errados. Por ejemplo, para el caso de modulación QPSK250, con un SNR de 14 dB se obtiene un mensaje poco inteligible, con una tasa de caracteres errados de 81.17 %. Para un valor de SNR de 17 dB, esta tasa disminuye a 10.23 %. Esta diferencia de 3 dB equivale a duplicar la potencia de transmisión, con lo cual se logra mejorar significativamente la calidad de las comunicaciones.
- b) Para cada uno de los tipos de modulación, la tasa de error de bits es mayor en los casos de modos con velocidades de transmisión más altas, como se anticipó en los resultados de las simulaciones. Por ejemplo, bajo condiciones de SNR de 14 dB, con el modo QPSK31 (@31 baudios) la totalidad de caracteres fueron recibidos correctamente. El modo QPSK250 (@250 baudios) permite transmitir el mismo mensaje en menor tiempo, pero presenta el inconveniente de que se ve más afectado por los desvanecimientos en condiciones de bajo SNR. Por este motivo, en el ejemplo se observa que, para el mismo nivel de SNR, la tasa de error obtenida es muy alta (81.17%).
- c) El uso de diversidad permite mejorar significativamente la calidad de las comunicaciones de datos. Por ejemplo, de la comparación de las tablas 4.5 y 4.6 se observa que, para un nivel de SNR de 10 dB, con el modo PSK31 se obtiene una tasa de caracteres errados de 7.79%. Con el uso de diversidad, este valor se reduce a cero, lo cual confirma el gran potencial del uso de diversidad en las comunicaciones vía EEJ. Con el modo QPSK250, por ejemplo, se obtiene una tasa de caracteres errados de 10.23% para condiciones de SNR de 17 dB. Con el uso de diversidad, es posible obtener

una tasa muy cercana de caracteres errados (11.36%) para un SNR de 14 dB, lo cual significa que, para este ejemplo, con diversidad pudo conseguirse una calidad similar de comunicaciones con un SNR 3 dB menor.

Tabla 4.5. Tasa de caracteres errados obtenidos de las pruebas de comunicaciones de datos sin el uso de diversidad

SNR (dB)	SIN DIVERSIDAD					
	PSK		QPSK		MFSK	
	PSK31	PSK250	QPSK31	QPSK250	MFSK32	MFSK64
10	7.79%	100.00%	17.86%	100.00%	0.00%	64.94%
14	0.00%	38.96%	0.00%	81.17%	0.00%	0.00%
17	0.00%	9.47%	0.00%	10.23%	0.00%	0.00%
21	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla 4.6. Tasa de caracteres errados obtenidos de las pruebas de comunicaciones de datos con el uso de diversidad

SNR (dB)	CON DIVERSIDAD					
	PSK		QPSK		MFSK	
	PSK31	PSK250	QPSK31	QPSK250	MFSK32	MFSK64
10	0.00%	87.66%	0.38%	100.00%	0.00%	5.52%
14	0.00%	3.57%	0.00%	11.36%	0.00%	0.00%
17	0.00%	0.38%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
21	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Los resultados de estas pruebas mostraron también que, para las mismas condiciones de SNR, las transmisiones de datos fueron más inteligibles que las de voz, especialmente para velocidades de transmisión bajas. Se observó además que, en condiciones de bajo SNR, las comunicaciones de datos a bajas tasas de transmisión podían aún ser comprendidas a pesar de que se perdían algunos caracteres en la recepción.

4.6. Otros resultados

De manera similar a lo efectuado en las simulaciones, se realizaron pruebas adicionales empleando el modo de transmisión por radiopaquetes e implementando un squelch digital en el procesamiento de la voz y datos.

Al igual que en el caso de la simulación de transmisión de datos modulados a través del software de radioaficionados, se experimentó con la modulación de datos en radiopaquetes. Para ello se usaron los modos Packet300, Packet1200 y Packet2400, los cuales transmiten a 300, 1200 y 2400 baudios, respectivamente. De ellos, únicamente con el modo Packet300 y bajo condiciones de muy alto SNR (21 dB) se logró recibir correctamente solo uno de los dos paquetes transmitidos sin el uso de diversidad. Con el empleo de esta técnica se logró recibir la totalidad del mensaje correctamente. Para niveles inferiores de SNR, no fue posible recibir ningún mensaje debido al efecto de los desvanecimientos, incluso con el uso de diversidad. Además, para las condiciones de SNR del experimento y el número de diversidad, tampoco fue posible decodificar correctamente el mensaje con los modos Packet1200 y Packet2400 debido a su alta tasa de transmisión, como se observó en las simulaciones del capítulo 3.

Se implementó también un *sqelch* digital en el programa de procesamiento con la finalidad de analizar el efecto de su aplicación en la voz y datos recibidos en las pruebas. Se comprobó que los desvanecimientos resultan menos perceptibles en el caso de la voz, de manera similar a lo obtenido en las simulaciones en el capítulo 3 y en los resultados de la implementación del *sqelch* realizados por Heraud [18]. Sin embargo, la calidad de la voz no se ve realmente mejorada. Para datos, se verificó que el uso del *sqelch* no logra disminuir la tasa de caracteres errados, lo cual corrobora los resultados de las simulaciones.

CONCLUSIONES

Entre las conclusiones más significativas de este trabajo destacan las siguientes:

1. Se logró cumplir con los objetivos de este trabajo de tesis:
 - Se desarrolló un simulador de comunicaciones de voz y datos a través del EEJ
 - Se estudió el canal de comunicaciones EEJ y los parámetros que lo caracterizan
 - Se comprobó la mejora en la calidad de la voz y datos recibidos empleando diversidad, tanto en las simulaciones como en las pruebas de campo en el enlace Jicamarca-Paracas.
2. El programa de simulación desarrollado se basa en un modelo matemático del canal EEJ para simular comunicaciones analógicas y digitales a través de éste sin necesidad de implementar físicamente el enlace. En el simulador se consideran distintos tipos de modulación analógica (AM, Doble Banda Lateral, Banda Lateral Única y FM) y modulación digital (ASK, FSK y PSK). Además, permite definir las condiciones de SNR y caracterizar los parámetros del canal de comunicaciones EEJ, como su ancho espectral y el espesor de la capa del EEJ. Se simula también la aplicación de diversidad, la cual puede ajustarse a distintas técnicas: diversidad espacial, en frecuencia, en polarización o en tiempo. Finalmente, con ciertas mejoras, este simulador puede ser utilizado en el estudio y diseño de otros tipos de modulación, técnicas de transmisión y recepción y estrategias de procesamiento.
3. El simulador desarrollado ha sido satisfactorio y logra reproducir muy bien el tipo de comunicaciones de voz realizadas a través del EEJ que se obtuvieron en los experimentos realizados con anterioridad para distintos tipos de modulación y parámetros del sistema. Por ejemplo, simulando una transmisión con modulación Banda Lateral Única, la voz recibida se caracterizó por presentar “lloriqueos”, de modo similar a los audios de las pruebas de Chocos [5]. De manera similar, para el caso de modulación FM, se presentaron desvanecimientos o *cracks* en la voz recibida.

4. El simulador permite estudiar los parámetros del canal de comunicaciones EEJ. Uno de estos parámetros es el ancho de banda de coherencia del canal, determinado por el espesor de 15 km del EEJ. Debido a este espesor, el ancho de banda del canal se limita a 10 kHz, mientras que la tasa de símbolos teórica máxima es de 10 kbaudios. Para el tipo de modulación FSK empleado en las simulaciones, fue posible alcanzar una tasa de 7 kbps con un BER de 0.1%.
5. La calidad de las comunicaciones de voz y datos mejora a medida que se incrementa el SNR. Tanto en las simulaciones como en las pruebas de campo se consiguió una buena inteligibilidad para niveles de SNR a partir de 16 dB, aproximadamente. A medida que el SNR disminuye, el nivel de la señal permanecerá más tiempo debajo del nivel del ruido, por lo que se verá más afectada por los desvanecimientos, lo cual provoca que la inteligibilidad de la voz disminuya y la tasa de error de bits aumente.
6. De los resultados de las simulaciones se dedujo que la variación del ancho espectral no influye en la calidad de las comunicaciones en el rango de frecuencias del canal de comunicaciones del EEJ (de 20 a 100 Hz). Esto se debe a que, si bien la frecuencia de los desvanecimientos es mayor, éstos tienen una mayor duración, por lo que en promedio la calidad de la voz y datos recibidos no se ve afectada por los *cracks*.
7. En el caso de comunicaciones digitales, el aumento de la velocidad de transmisión provoca que la señal se vea más afectada por los desvanecimientos. Esto se debe a que, al aumentar la tasa de símbolos para un determinado tipo de modulación, la duración de dichos símbolos disminuye, por lo cual son más vulnerables a los desvanecimientos.
8. A través de las simulaciones y las pruebas de campo se comprobó que el empleo de diversidad mejora la calidad de las comunicaciones de voz y datos debido a la aleatoriedad de los desvanecimientos producidos por el canal EEJ. Para el caso de voz, se empleó el índice de correlación como parámetro de cuantificación de la calidad, mientras que para datos se usó la tasa de bits o de caracteres errados. De los resultados de las simulaciones se dedujo que el uso de dos realizaciones para la transmisión incrementa de

manera significativa la calidad de la voz y datos, tanto de manera cualitativa como cuantitativa. Para voz, se observó que con dos realizaciones es posible transmitir la voz hasta con 6 dB menos respecto del caso de transmisión sin diversidad y, para datos, es posible transmitir hasta con 4 dB menos. El uso de más de dos realizaciones para la transmisión produce solo una mejora incremental de la calidad de la voz y datos. Para ambos casos, esta mejora es de 1 dB, aproximadamente. Por este motivo, resulta más provechoso el uso de diversidad con solo dos canales.

9. En las pruebas de campo entre Jicamarca y Paracas se empleó la técnica de diversidad en frecuencia por ser la más sencilla de implementar debido a la disponibilidad de los equipos y configuración del sistema. Los resultados de dichas pruebas permiten validar los resultados del simulador, tanto para el caso de voz como de datos. Se comprueba así que el empleo de diversidad mejora de manera cualitativa y cuantitativa la calidad de las comunicaciones de voz. Para el caso de datos, se observó que esta mejora es aun más significativa, ya que se logró recuperar una mayor cantidad de caracteres y decodificar mejor el mensaje transmitido.

RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que pueden derivarse de este trabajo son las siguientes:

1. Sería conveniente implementar un enlace de comunicaciones vía EEJ entre dos puntos ubicados a lo largo del EEJ, como son Jicamarca y Puerto Maldonado. Entre estos puntos se aprovecharía el aumento de la sección transversal del EEJ, con lo cual se espera una mejora de la calidad de la voz y datos recibidos debido al aumento del volumen de dispersión. Además, se experimentaría con un enlace más largo y se podría evaluar su influencia en la calidad de las comunicaciones.
2. Como se mencionó, existe una relación cuantitativa entre la intensidad del EEJ y el ΔH medido entre dos estaciones ubicadas una dentro y otra fuera de la zona determinada por el EEJ. A mayor magnitud del ΔH , mayor será la intensidad del EEJ y, por lo tanto, mejor será la calidad de las comunicaciones a través del este medio. Por esta razón, se recomienda contar con estadísticas basadas en la variación del ΔH en el tiempo, de modo que pueda conocerse mejor la variación de la intensidad del EEJ para distintos días, meses y años y, de esta manera, predecir la calidad de las comunicaciones obtenidas en los experimentos.
3. Para el presente trabajo, se ha simulado la transmisión de datos empleando modulaciones binarias (de solo dos estados). El modo con el cual se alcanzó mayores tasas de transmisión fue FSK, con la que fue posible transmitir hasta 7 kbps con un BER de 0.1%. Esta tasa puede ser incrementada con el empleo de modulaciones M-arias, las cuales permiten transmitir una mayor cantidad de bits por símbolo. Se recomienda también emplear otras técnicas y esquemas de modulación para contrarrestar los desvanecimientos, tales como OFDM [34], *interleaving* y códigos de detección y corrección de errores. El efecto de estas técnicas en la calidad de los datos recibidos puede ser estudiada inicialmente a través de su implementación en el simulador. De esta manera, se podrá estudiar la capacidad máxima del canal EEJ.

4. De las simulaciones se ha demostrado que el ancho de banda del canal EEJ es de 10 kHz, el cual, para el tipo de modulación empleado en este trabajo, permite una tasa de transferencia máxima de 7 kbps. Esta tasa de bits puede ser incrementada en la práctica mediante el empleo de múltiples canales para la transmisión de información digital, lo cual se conoce como *multichannel*. Este tipo de transmisión hace uso de la técnica de Espectro Ensanchado (*Spread Spectrum*), que consiste en transmitir la señal a lo largo de una banda de frecuencias mucho más amplia que el ancho de banda original de la información que se desea enviar. Empleando *multichannel* se podría enviar la información repartida en varios canales de 10 kHz, de modo que las señales no estén correlacionadas y se logre así enviar una mayor cantidad de bits al mismo tiempo y por el mismo medio.

5. En el futuro se proyecta implementar la parte de transmisión empleando un sistema basado en *Software Defined Radio* (SDR). Esta técnica permite implementar mediante software partes que típicamente estaban diseñadas en hardware, como filtros, amplificadores, moduladores, demoduladores, detectores, etc. La ventaja de esta técnica es que permite implementar distintas tecnologías de manera flexible, de modo que puede ser reconfigurado vía software. Un modulador basado en SDR permitiría estudiar mejor el canal de comunicaciones EEJ y aplicar nuevas técnicas de modulación y transmisión. A diferencia de los radio transceptores, no se vería limitado por el ancho de banda del canal de voz y la máxima desviación en frecuencia del modulador FM, por lo cual sería posible transmitir comunicaciones digitales directamente sin necesidad de generar audios. De esta forma, se estudiaría mejor la capacidad del canal EEJ y se podrían implementar nuevas técnicas de transmisión, como *multichannel*, descrito anteriormente. Para la recepción se seguirían empleando los receptores digitales, ya que permiten aplicar distintas técnicas de demodulación en el procesamiento de la señal y ensayar métodos alternativos de recepción.

REFERENCIAS

- [1] Forbush, S., M. Casaverde (1961). *Equatorial Electrojet in Perú*. No.620. Carnegie Institution of Washington.
- [2] Balsley, Ben B. (1967). *Evidence for Plasma Turbulence in the Equatorial Electrojet*. Institute for Environmental Research, Technical Memorandum #89.
- [3] Cohen R., K. Bowles (1963). *Ionospheric VHF Scattering Near the Magnetic Equator During the International Geophysical Year*. Journal of Research of the National Bureau of Standards. Vol 67D. No.5
- [4] Base de datos de los magnetómetros, Radio Observatorio de Jicamarca
<http://iro.igp.gob.pe/database/magnetometer/html/magdata.htm>
Consultado en junio de 2009.
- [5] Chocos, J. (2005). *Diseño y establecimiento de un enlace de radiocomunicaciones VHF punto a punto vía el Electrochorro Ecuatorial*. Tesis. Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [6] Seybold, J. (2005). *Introduction to RF Propagation*. Wiley - Interscience. pp. 186-294, 301-309.
- [7] Rinaldo, P. (1995). *Guía Internacional del Radioaficionado*. Marcombo. pp. 135-147.
- [8] Blake, R. (2004). *Sistemas Electrónicos de Comunicaciones*. Cengage Learning Editores. pp. 533-539.
- [9] Heraud, J. (1972). *Estudios de propagación utilizando el fenómeno de dispersión en el Electrochorro Ecuatorial*. Informe Preliminar No. 1, Instituto Geofísico del Perú.
- [10] Davies, K. (1990). *Ionospheric Radio*. Peter Peregrinus Ltd, UK. Capítulos 6 y 13.

- [11] Hysell, D., J. Chau (2001). *Inferring E region electron density profiles at Jicamarca from Faraday rotation of coherent scatter*. Journal of Geophysical Research.
- [12] Gibson, J. (2002). *The communications handbook*. CRC Press. pp. 11-2,11-3
- [13] Sallent, O., J. Valenzuela, R. Agustí (2003). *Principios de comunicaciones móviles*. Universidad Politécnica de Catalunya. pp. 57-68
- [14] Simon, M., M. Alouini (2005). *Digital Communication Over Fading Channels*. Wiley-Interscience. 2da Edición. pp.17-20
- [15] Valladares, C., R. Woodman (1975). *Simulación digital-analógica por computadora de comunicaciones vía el Electrochorro Ecuatorial*. III CONIMERA.
- [16] Freeman, R. (2007). *Radio System Design for Telecommunications*. Willey & Sons. 3era Edición. pp. 19-32
- [17] Saunders S., A. Aragón-Zavala. *Antennas and Propagation for Wireless Communications Systems*. Wiley-India. 2da Edición. pp. 214-218.
- [18] Heraud, J. (1972). *Estudios de propagación utilizando el fenómeno de dispersión en el Electrochorro Ecuatorial. Informe Preliminar No. 2*, Instituto Geofísico del Perú.
- [19] Fernández, P. (2007). *Separatas de clase del curso Planificación en Redes de Telecomunicaciones*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [20] Tomasi, W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. Prentice Hall. pp. 347-368, 768-773, 782.
- [21] Gorricho, M., J. Gorricho (2002). *Comunicaciones móviles*. Universidad Politécnica de Catalunya. pp. 29-31.
- [22] Romero C. A., A. Giesecke, O. Pérez (1968). *Propagación de ondas de radio en VHF por dispersión en el Electrochorro Ecuatorial. Informe Preliminar*. Instituto Geofísico del Perú.

- [23] Heraud, J. (1972). *Estudios de propagación utilizando el fenómeno de dispersión en el Electrochorro Ecuatorial. Informe Preliminar No. 3 y 4.* Instituto Geofísico del Perú.
- [24] Richards, M. (2006). *Discrete-Time Gaussian Fourier Transform Pair, and Generating a Random Process with Gaussian PDF and Power Spectrum.* Paper. Georgia Tech.
- [25] Sarango M. et al. (2005). *Comunicaciones inalámbricas punto a punto a través del Electrochorro Ecuatorial.* Taller de Electrónica y Procesamiento Digital, Radio Observatorio de Jicamarca.
- [26] Reyes, P. et al. (2005). *Radar Acquisition System at Jicamarca usign off-the-shelf Digital Receiver.* CEDAR.
- [27] YAESU (2002). FT-897, Manual de usuario. YAESU Musen Japón.
- [28] ICOM (2001). IC-706MKIIG, Manual de usuario. ICOM Inc. Japón.
- [29] Tarjeta Echotek
<http://www.mc.com/microsites/echotek/>
Consultado en junio de 2009.
- [30] Software de modulación digital Fldigi
<http://www.w1hkj.com/Fldigi.html>
Consultado en junio de 2009.
- [31] Software de modulación digital MixW
<http://www.mixw.net/>
Consultado en junio de 2009.
- [32] Lenguaje de programación IDL
<http://www.itvis.com/ProductServices/IDL.aspx>
Consultado en junio de 2009.

[33] MATLAB

<http://www.mathworks.com/>

Consultado en junio de 2009.

[34] Sanchez, A., J. Seoane, A. Martinez. (2002). *Low cost E-mail over HF with OFDM and turbo coding techniques*. Journal of Electronics & Communication Engineering, v.1, n11.