

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

Facultad de Ciencias e Ingeniería



**Diseño y Establecimiento de un Enlace de Radiocomunicaciones VHF
Punto a Punto Vía el Electrochorro Ecuatorial**

Tesis para Optar el Título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Presentado por:

JORGE ANTONIO CHOCOS NÚÑEZ

Lima – Perú

2005

RESUMEN

El Electrochorro Ecuatorial o EEJ (por sus siglas en inglés: *Equatorial ElectroJet*) es un recurso natural que aún no ha podido ser utilizado como medio alternativo de comunicaciones por dispersión frontal, a pesar del gran potencial que ofrece para este fin.

El presente trabajo forma parte de un esfuerzo del Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ) – Instituto Geofísico del Perú (IGP), para desarrollar un sistema prototipo de comunicaciones que permita evaluar dicho potencial, así como determinar los parámetros del canal con miras a posibles aplicaciones en comunicaciones rurales.

La tesis comprende los cálculos de ingeniería de un enlace inalámbrico preliminar en 50 MHz (VHF) entre Jicamarca y Paracas. Incluye también la realización de pruebas preliminares utilizando la infraestructura instalada de un sistema de radar bi-estático de propiedad del IGP. Además, en este trabajo se brindan algunos conceptos básicos relacionados al Electrochorro Ecuatorial y se describen algunos trabajos realizados con anterioridad.

Los resultados de los experimentos realizados en el marco de esta tesis han sido satisfactorios y han permitido identificar las potencialidades y debilidades de este novedoso medio de comunicación.

Las principales conclusiones del presente estudio son las siguientes:

- El enlace Jicamarca–Paracas fue establecido y probado con éxito durante dos campañas de comunicaciones.
- De los experimentos realizados se ha comprobado que un buen indicador de la intensidad del Electrochorro Ecuatorial es la diferencia entre las componentes horizontales registradas por dos magnetómetros ubicados dentro y fuera de la zona del EEJ, por ejemplo entre Jicamarca y Piura: $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$. Asimismo, durante las campañas de comunicaciones se ha observado que por lo general existe un buen nivel de concordancia entre este parámetro y la calidad de la voz de las comunicaciones recibidas.
- Las comunicaciones con amplitud modulada (AM) no son eficientes para realizar comunicaciones vía EEJ pues aprovecha sólo el 33% de la potencia total para transmitir la información.

- Por su parte, las comunicaciones con modulación AM-Banda Lateral Única (USB o LSB) presentan un temblor o “lloqueo” permanente así como frecuentes desvanecimientos de señal después de ser demoduladas.
- Las comunicaciones en Frecuencia Modulada (FM) fueron en cambio más inteligibles, consiguiéndose índices de correlación de 0.9. Sin embargo, las comunicaciones en este modo también son distorsionadas por desvanecimientos rápidos o “cracks” de la señal de un orden aproximado de 20 a 100 Hz.
- Para unas mismas condiciones de intensidad del EEJ, las comunicaciones digitales en PSK-31 presentan mayor grado de inteligibilidad que las comunicaciones de voz.
- Las comunicaciones recibidas en condiciones de ContraElectrochorro Ecuatorial (CEEJ) se caracterizaron por ser de buena calidad, presentaron un Índice de Correlación superior a 0.6 mientras duró el fenómeno, alcanzando valores de 0.83.
- A pesar de intentar realizarse comunicados nocturnos vía el Electrochorro Ecuatorial, éstos no se pudieron recibir bajo las condiciones de diseño propuestos en este trabajo.

A mis amados padres:

Xenia Norma y Jorge Pedro

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a todas aquellas personas e instituciones que contribuyeron de alguna manera con la cristalización de esta tesis:

A mi asesor, Dr. Martín Sarango, por la confianza en mi persona y por la dirección y asesoría en el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Jorge Luis Chau, por los cálculos del Locus de Perpendicularidad y sus oportunos y acertados comentarios.

Al personal del Radio Observatorio de Jicamarca, por su apoyo y colaboración en los experimentos, en forma particular a Karím Kuyeng y Pablo Reyes.

Al Radio Observatorio de Jicamarca, por la oportunidad de participar en este interesante proyecto de comunicaciones,

A la Pontificia Universidad Católica del Perú - Radioclub PUCP, por facilitar parte de los equipos de radiocomunicaciones utilizados.

Al Premio Bernasconi, cuyo aporte ayudó a financiar los viajes a Paracas.

Y finalmente, quiero dar GRACIAS a mis padres: Jorge Pedro y Xenia Norma, así como a mis hermanos: Jorge Luis y Xenia María, por su sacrificio y apoyo incondicional.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1 MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES.....	4
1.1 El Campo Magnético.....	4
1.2 Dispersión de Ondas Electromagnéticas	7
1.3 El Electrochorro Ecuatorial	10
1.4 Geometría del Electrochorro Ecuatorial.....	12
1.4.1 Geometría Global.....	13
1.4.2 Geometría Local.....	13
1.4.3 Locus de Perpendicularidad.....	14
1.5 Componente Horizontal del Campo Magnético: $\Delta H_{ROJ-PIURA}$.....	15
1.6 Antecedentes Históricos	18
1.6.1 Año Geofísico Internacional (1957)	18
1.6.2 Experimento de Romero, Giesecke y Pérez (1966-1967).....	23
1.6.3 Otros Experimentos (1967 – 1971).....	28
1.6.4 Simulación Análogo-Digital del Electrochorro Ecuatorial (1975).....	29
1.6.5 Simulación Digital del Electrochorro (En desarrollo)	30
2 ESQUEMAS DE MODULACIÓN UTILIZADOS.....	31
2.1 Introducción.....	31
2.2 Esquemas de Modulación Analógica	32

2.2.1	Amplitud Modulada (AM) y Banda Lateral Única (SSB).....	32
2.2.2	Frecuencia Modulada (FM)	37
2.3	Esquemas de modulación digital.....	40
2.3.1	PSK-31	41
3	DISEÑO DEL ENLACE JICAMARCA–PARACAS	43
3.1	Cálculo de la Geometría del Enlace.....	43
3.1.1	Calculo del Locus de Perpendicularidad.....	43
3.1.2	Cálculo de la geometría Azimutal y de Elevación de las Antenas.	44
3.2	Configuración del Hardware de las estaciones de radio.....	48
3.2.1	Introducción	48
3.2.2	Descripción de las Antenas.....	48
3.2.3	Radio Transceptores.....	51
3.2.4	Fuentes de Alimentación.....	52
3.2.5	Líneas de Transmisión	52
3.2.6	Medidor de Potencia y ROE	56
3.2.7	Interfase entre el Radio Transceptor y la Computadora.	56
3.2.8	Computadora.....	57
3.2.9	Sistema de Sincronización	58
3.3	Configuración del Software.....	59
3.3.1	Software de Transmisión	59
3.3.2	Software de Adquisición de Datos.....	60
3.3.3	Software de Sincronización	61
3.3.4	Software de Análisis de Datos	62
3.4	Análisis de Ganancias y Atenuaciones.....	64

3.5	Técnicas de Toma de datos y Evaluación de Resultados	67
4	RESULTADOS DE LAS COMUNICACIONES VÍA ELECTROCHORRO ECUATORIAL.....	71
4.1	Introducción.....	71
4.2	Pruebas Preliminares	72
4.3	Comunicaciones por dispersión frontal en el Electrochorro Ecuatorial...	73
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
	BIBLIOGRAFÍA	90
	ENLACES DE INTERNET	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Componentes del Campo Geomagnético.....	5
Figura 1-2 Series de tiempo de la Declinación (línea superior) y las componentes Horizontal (línea central) y Vertical (línea inferior) en Piura, 8 de marzo de 2005.	6
Figura 1-3 Geometría de un enlace por Dispersión Frontal (Davies, 1990).....	8
Figura 1-4 Distancia entre dos elementos dispersores que producen interferencia constructiva (Adaptado de Doviak y Zrnik, 1993).....	9
Figura 1-5 Ángulos de Dispersión y Vectores Incidente, Dispersado, Número de Onda y Campo Eléctrico. (Adaptado de Doviak y Zrnik, 1993)	9
Figura 1-6 Representación esquemática del Electrochorro Ecuatorial (Adaptado de Ierkic, 1980)	12
Figura 1-7 Geometría Global del Electrochorro Ecuatorial	13
Figura 1-8 Geometría Local del Electrochorro Ecuatorial	14
Figura 1-9 Comparación entre el ExB y los tres tipos de análisis realizados el 17/Abril/2002 (Adaptado de Anderson et al., 2004)	17
Figura 1-10 Variación del $\Delta H_{ROJ-PIURA}$ en un día “Tranquilo”: 19 de marzo de 2005 ...	18
Figura 1-11 Variación del $\Delta H_{ROJ-PIURA}$ en un día “Disturbado”: 8 de marzo de 2005 ...	18
Figura 1-12 Ubicación de las estaciones de Transmisión y Recepción para los experimentos de propagación transecuatorial del IGY’1958. Las líneas punteadas indican isoclinas magnéticas (Cohen y Bowles, 1963)	19
Figura 1-13 Trayectorias de propagación por dispersión frontal en VHF para los experimentos del IGY’1958. Intersecciones de los haces de las antenas en el plano vertical (Cohen y Bowles, 1958).....	21
Figura 1-14 Promedios mensuales de la variación diaria del nivel de señal recibida. (Cohen y Bowles, 1963).....	22
Figura 1-15 Número de manchas solares en los ciclos 19 y 20.....	24

Figura 1-16 Trayectorias de propagación por dispersión frontal en VHF entre Lima y Juliaca (Romero et. al. 1968).....	24
Figura 1-17 Percentiles mensuales de la intensidad de señal recibida (Romero Et. Al., 1968).....	26
Figura 1-18 Variación estacional de la reversión del EEJ, (Romero et al., 1968)	28
Figura 1-19 Diagrama de bloques del modelo de simulación del canal de comunicaciones vía el Electrochorro Ecuatorial. (Sarango, 2005 - a)	30
Figura 1-20 Diagrama de bloques del modelo de simulación del canal, incluyendo Electrochorro de múltiples capas (Sarango, 2005 - a).....	30
Figura 2-1 Señal Modulante en los dominios del tiempo y de la frecuencia.....	32
Figura 2-2 Señal Portadora en los dominios del tiempo y de la frecuencia	33
Figura 2-3 Señal Modulada en los dominios del tiempo y de la frecuencia.....	33
Figura 2-4 Generación de AM utilizando un mezclador balanceado	34
Figura 2-5 Detector de envolvente	34
Figura 2-6 Modulación de SSB usando filtro de banda lateral	35
Figura 2-7 Modulación de SSB usando cuadratura	35
Figura 2-8 Espectro de señal moduladora limitada en banda.....	36
Figura 2-9 Espectro de señal USB.....	36
Figura 2-10 Espectro de señal LSB	36
Figura 2-11 Modulación en frecuencia de una señal.....	38
Figura 2-12 Desarrollo de las curvas de Bessel.....	39
Figura 2-13 Espectro de una señal PSK-31	42
Figura 3-1 <i>Locus de Perpendicularidad</i> del Enlace ROJ – Paracas.....	44
Figura 3-2 Cálculo de la distancia entre dos estaciones	45
Figura 3-3 Plano azimutal del enlace ROJ–Paracas	47
Figura 3-4 Plano de elevación del enlace ROJ–Paracas.....	47
Figura 3-5 Configuración de los componentes de una estación de comunicaciones.....	48

Figura 3-6 Respuesta en frecuencia y ancho de banda del arreglo de antenas en el ROJ	49
Figura 3-7 Arreglo de antenas tipo Yagi en Paracas	50
Figura 3-8 Arreglo de antenas tipo Yagi en el Radio Observatorio de Jicamarca	50
Figura 3-9 Radio Transceptores YAESU FT-897 y FT-847	51
Figura 3-10 Transformador de impedancias.....	52
Figura 3-11 Arreglo de antenas y red de adaptación de impedancias en el ROJ	54
Figura 3-12 Arreglo de antenas y red de adaptación de impedancias en Paracas	55
Figura 3-13 Vatímetro / Medidor de ROE YAESU YS-60.....	56
Figura 3-14 Interfase Rascal–Buxcomm entre la computadora y el transceptor.....	57
Figura 3-15 Equipos de radio y registro de datos utilizados en Paracas	58
Figura 3-16 Diagrama de flujo del programa ROJ BEACON.....	59
Figura 3-17 Panel de control del programa de transmisión automática ROJ BEACON	60
Figura 3-18 Programa de recepción “SCANNER RECORDER”	61
Figura 3-19 Ejemplo del contenido de un archivo de registro de comunicaciones.....	61
Figura 3-20 COOL EDIT 2000: Análisis en el dominio del tiempo	63
Figura 3-21 COOL EDIT 2000: Análisis en el dominio de la frecuencia.....	63
Figura 3-22 Potencia transmitida Versus Potencia recibida.....	66
Figura 3-23 Procesamiento en MATLAB de las comunicaciones automáticas	70
Figura 4-1 Índice de Correlación y $\Delta H_{ROJ-PIURA}$, 9 de Febrero de 2005.....	74
Figura 4-2 Índice de Correlación, SNR y $\Delta H_{ROJ-PIURA}$, 4 de Marzo de 2005. (Sarango et al., 2005 - a).....	75
Figura 4-3 Índice de correlación del 6 de marzo 2005	76
Figura 4-4 Índice de Correlación y $\Delta H_{ROJ-PIURA}$, 7 de Febrero de 2004.....	78
Figura 4-5 Índices de correlación del 21 de septiembre de 2004	79
Figura 4-6 Comunicaciones recibidas con diferentes potencias de transmisión	80

Figura 4-7 Comunicaciones recibidas atenuando la señal proveniente de la antena de recepción.....	81
Figura 4-8 Aumento repentino de la SNR en una comunicación vía el EEJ.....	83
Figura 5-1 Esquema de ubicación de las antenas. Disposiciones actual (izquierda) y recomendable (derecha).....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Características de las trayectorias de propagación ecuatoriales en VHF	20
Tabla 1-2 Características de las trayectorias de propagación ecuatoriales en VHF	25
Tabla 2-1 Ventajas y desventajas de AM y SSB	37
Tabla 2-2 Bandas Laterales significativas con respecto al Índice de Modulación	39
Tabla 2-3 Ventajas y desventajas de FM	40
Tabla 3-1 Coordenadas geográficas de las dos estaciones	43
Tabla 3-2 Especificaciones de las antenas del enlace Jicamarca – Paracas	49
Tabla 3-3 Características de los Radio Transceptores utilizados	51
Tabla 3-4 Especificaciones de las Fuentes de Alimentación	52
Tabla 3-5 Especificaciones de las líneas de transmisión utilizadas	53
Tabla 3-6 Transformadores de impedancia utilizados	53
Tabla 3-7 Especificaciones del instrumento utilizado	56
Tabla 3-8 Atenuaciones en cables y conectores para una sola antena	65
Tabla 3-9 Formato de los archivos binarios	69
Tabla 5-1 Escala Subjetiva de Interpretación de la calidad de las comunicaciones	87

INTRODUCCIÓN

Las telecomunicaciones hoy en día son un factor determinante en el desarrollo político, económico, social y cultural en todos los países del mundo y un motor para la sociedad y la economía mundial, ya que transforman rápidamente nuestras formas de vida y favorecen el entendimiento entre los pueblos. En los últimos años, el volumen de información ha aumentado aceleradamente, los principales canales de comunicación, como son: la telefonía, la Internet, las comunicaciones vía satélite, la fibra óptica, las microondas, la transmisión de datos inalámbrica (Wi-Fi), etc., han revolucionado las comunicaciones en las principales ciudades y pueblos del mundo.

Sin embargo, en países como el nuestro, el empleo de las nuevas tecnologías de comunicación se complica debido no sólo a limitaciones de orden económico, sino principalmente a la difícil geografía de muchas zonas de nuestro territorio. En muchos lugares de nuestro país la única alternativa es la comunicación vía radio en HF, no obstante ser un medio por lo general ruidoso y de baja confiabilidad y que además requiere conocer el comportamiento de la ionosfera en tiempo real para lograr un enlace de buena confiabilidad.

En este contexto, la investigación de nuevas tecnologías y modos alternativos de comunicación resulta de particular interés pues permitiría disponer de una mayor variedad de canales de comunicación.

El Electrochorro Ecuatorial (*EEJ - Equatorial Electrojet*) es una gran corriente de electrones que se genera a una altura aproximada de 100 Km a lo largo del Ecuador Geomagnético, sobre el Perú y otros países. Tiene una extensión aproximada de 600 Km en la dirección Norte-Sur y está presente la mayor parte del día y la noche salvo en los periodos llamados de “reversión diurna” y “reversión nocturna”.

Por otro lado, el territorio central del Perú, por su coincidencia con el Ecuador Geomagnético, es un laboratorio ideal para el estudio de medios no convencionales de propagación como la dispersión frontal en el Electrochorro Ecuatorial. Este mecanismo fue utilizado por Cohen y Bowles en 1958 (durante el Año Geofísico Internacional) y por Romero et al. en 1968, para establecer comunicaciones punto-punto entre lugares que de otro modo no podrían comunicarse en la banda de VHF.

Aunque los resultados obtenidos en estos experimentos fueron alentadores, los alcances de las investigaciones se vieron limitados por las capacidades de los sistemas electrónicos de aquella época. Sin embargo, existe suficiente evidencia para afirmar que el Electrochorro Ecuatorial podría ser utilizado como medio alternativo de comunicaciones en el Perú. Además, la implementación de un enlace confiable sería posible hoy en día gracias a la disponibilidad de potentes circuitos digitales integrados, nuevos procesos de fabricación y nuevos esquemas de transmisión-recepción analógica y digital.

El objetivo principal de esta tesis es el **diseño y establecimiento de un enlace preliminar de comunicaciones VHF punto-punto entre Paracas y Lima**. Para ello se buscará **determinar los parámetros de diseño de las estaciones de transmisión-recepción** de esta aplicación, con la finalidad de **evaluar el potencial del medio de propagación**.

El presente documento tiene la siguiente estructura:

El capítulo 1: Marco Teórico y Antecedentes. Desarrolla los conceptos utilizados en la tesis y describe experiencias de comunicaciones similares llevadas a cabo en el pasado.

El capítulo 2: Esquemas de Modulación Utilizados. Presenta una breve descripción de las diferentes técnicas de modulación, analógica y digital, utilizadas en las pruebas de campo del enlace establecido.

El capítulo 3: Diseño del Enlace Jicamarca–Paracas. Comprende los cálculos de geometría del enlace Jicamarca–Paracas, los análisis de las ganancias y pérdidas del sistema así como la descripción de la arquitectura y las características de los elementos de hardware y software.

El capítulo 4: Resultados de las Comunicaciones Vía Electrochorro Ecuatorial. Muestra y describe los resultados obtenidos en las comunicaciones realizadas usando el enlace Jicamarca–Paracas, así como los resultados de los enlaces preliminares entre Lima y Jicamarca utilizados para probar los equipos de comunicaciones.

Conclusiones y Recomendaciones. Aquí se presentan las principales conclusiones a las que se ha llegado después de analizar los resultados de las comunicaciones vía el Electrochorro Ecuatorial. Además, se realizan las recomendaciones necesarias para mejorar el enlace diseñado.

Bibliografía y Enlaces Internet consultados. Relación de las publicaciones y páginas web consultadas en el desarrollo de la tesis.

1 MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

1.1 El Campo Magnético

Es un campo de fuerzas que rodea a la Tierra en forma similar al que produciría un gran dipolo magnético, o imán, centrado en el globo terráqueo y con una inclinación de aproximadamente 10.5° con respecto a su eje de rotación.

La mejor explicación disponible del campo magnético terrestre, también conocido como campo geomagnético, parece estar en las propiedades y movimientos del núcleo de la Tierra: Un cuerpo esférico de material metálico, probablemente de una composición de Níquel-Hierro (Ni-Fe), cuya parte externa se encuentra en estado líquido. El diámetro de éste es un poco mayor que el radio de la Tierra, aproximadamente 6,920 Km, y se encuentra rodeado por un manto de roca sólida de un espesor aproximado de 2,860 Km. El magnetismo interno de la Tierra se explica principalmente por la llamada Teoría del Dínamo, según la cual el núcleo líquido da vueltas lentamente, con respecto al manto sólido, generando de esta manera corrientes eléctricas que lo rodean. Estas corrientes generan a su vez un campo magnético, parte del cual escapa a la superficie de la Tierra, dándonos el campo magnético que observamos, y otra parte interactúa con el núcleo líquido que está en movimiento, sosteniendo de esta manera la acción de un llamado Dínamo Auto-Excitado.

El campo magnético de la Tierra proviene de tres Fuentes:

- (97 – 99) %. Campo principal, debido a las corrientes eléctricas generadas en el proceso de Dínamo Auto-Excitado
- (1 – 2) %. Campo cortical, debido a la magnetización de rocas en la corteza terrestre (magnetización remanente)
- (1 – 2) %. Campo externo, debido principalmente a la actividad del Sol sobre la ionosfera y magnetosfera.

Los polos magnéticos no están quietos, sino que se mueven varios kilómetros al año y cada polo magnético se mueve independientemente del otro; es decir, el norte magnético no está exactamente opuesto al sur magnético. A este movimiento o deriva se le conoce como Variación Secular. Las Reversiones Magnéticas son otros movimientos que ocurren impredeciblemente a intervalos irregulares de cientos de miles de años y que hacen que el dipolo magnético invierta su polaridad, es decir el norte magnético se convierte en sur magnético y viceversa. (Backus Et. Al., 1996)

El Campo Geomagnético se considera como una magnitud de carácter vectorial que se describe tomando como referencia un sistema cartesiano de ejes basado en las coordenadas geográficas: Eje N-S, E-O y Vertical o Cenit (Figura 1-1). De esta forma, la intensidad del campo (F) y sus proyecciones Horizontal (H) y Vertical (Z) están relacionados a través de los ángulos de Declinación (D), que forma H con el norte geográfico, y de Inclinación Magnética (I), que forman F y H. Así, para expresar el campo magnético en un punto bastarían las tres cantidades H, Z y D.

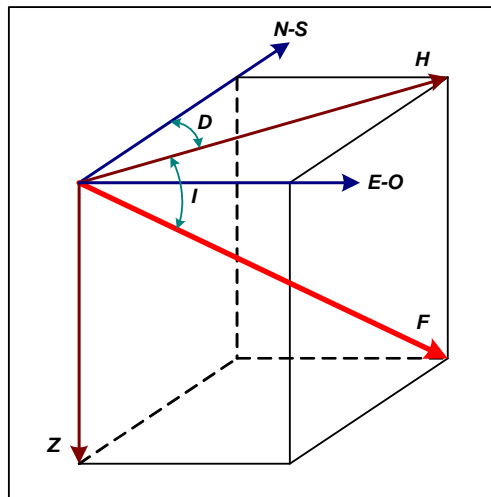


Figura 1-1 Componentes del Campo Geomagnético

La Intensidad del Campo Geomagnético –estrictamente hablando: densidad de flujo– se mide, según el Sistema Internacional de Unidades (SI), en Teslas. En la superficie terrestre su intensidad varía aproximadamente entre 24,000 y 66,000 nT. Este parámetro es medido y registrado continuamente durante largos periodos de tiempo, utilizando magnetómetros con resoluciones de tiempo de un minuto o menos, en los diferentes observatorios geomagnéticos del mundo.

En el Perú existen tres observatorios geomagnéticos operados por el Instituto Geofísico del Perú (IGP): Piura, Huancayo y Lima. El magnetómetro de Lima se encuentra en el Radio Observatorio de Jicamarca.

En la Figura 1-2 se puede observar la variación temporal de la Declinación (línea superior) y las componentes Horizontal (línea del medio) y Vertical (línea inferior) en Piura para el día 8 de Marzo de 2005. Ésta gráfica se obtuvo de la base de datos en la Página Web del ROJ.

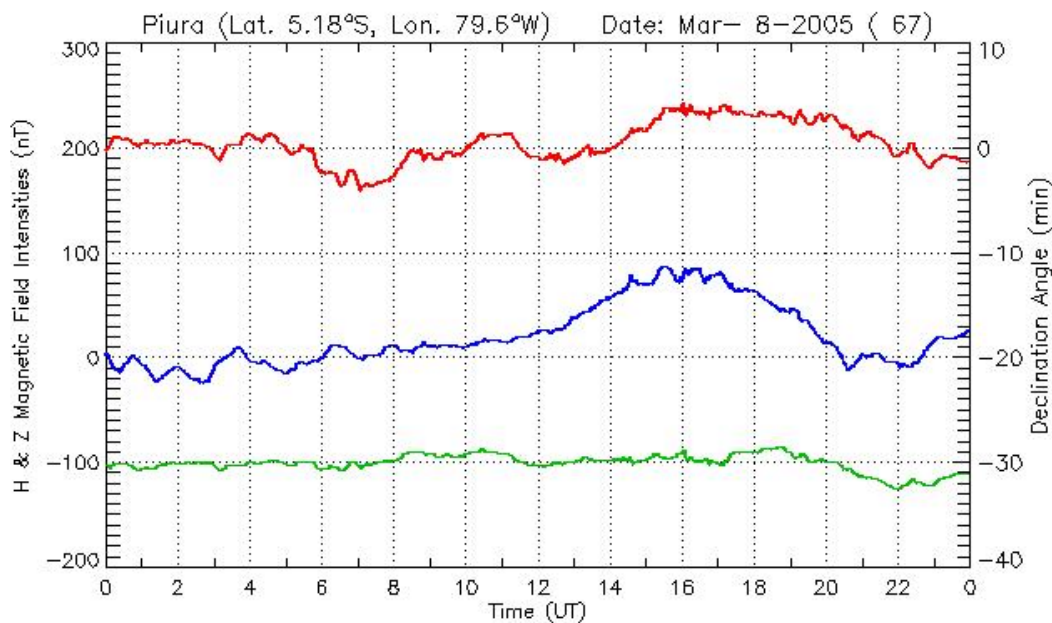


Figura 1-2 Series de tiempo de la Declinación (línea superior) y las componentes Horizontal (línea central) y Vertical (línea inferior) en Piura, 8 de marzo de 2005.

1.2 Dispersión de Ondas Electromagnéticas

Cuando la radiación electromagnética atraviesa la materia, la mayor parte de ésta se propaga en la dirección original; sin embargo, una pequeña fracción se dispersa en diferentes direcciones. Las siguientes son dos definiciones de dispersión:

- Es el proceso físico en el cual las partículas se desvían en forma aleatoria como resultado de colisiones con otras partículas.
- Es la desviación caótica de la radiación electromagnética por impacto en gases, irregularidades del medio y superficies ásperas.

El concepto resulta familiar si se compara con el comportamiento de la luz bajo determinadas condiciones. Por ejemplo: Durante la proyección de una película en un cine, el medio existente entre los ojos del espectador y la pantalla es el aire. Si alguien empezara a fumar en la sala, sería posible observar el humo del cigarrillo cuando éste alcanza el haz de luz del proyector. Esto ocurre porque la luz se ha “dispersado” en las partículas de humo.

Dependiendo del medio y del ángulo de incidencia la dispersión puede ser de tres tipos:

- Dispersión frontal o hacia delante. (*Forward Scatter*)
- Dispersión hacia atrás. (*Back Scatter*)
- Dispersión hacia los lados. (*Side Scatter*)

Por otro lado, mientras la reflexión y la refracción son los principales mecanismos de propagación ionosférica para frecuencias menores de 30 MHz (HF), para frecuencias mayores (VHF y UHF), además de la propagación por onda de espacio, la dispersión de energía en irregularidades del medio es el mecanismo de propagación predominante.

Las siguientes son algunas de las irregularidades del medio en la que las ondas de radio son dispersadas: Nubes, masas de aire con diferentes índices de refracción, turbulencias de plasma, Ecos Mesosféricos Polares de Verano (PMSE: *Polar Mesospheric Summer Echoes*), ionización alrededor de meteoros que ingresan a la atmósfera así como sus estelas ionizadas, E-Esporádica (*Sporadic-E*), auroras boreales, irregularidades del Electrochorro Ecuatorial, irregularidades de 150 Km, F-Dispersa (*Spread-F*), irregularidades artificiales, etc.

Los usos y aplicaciones de la propagación por dispersión son variados. Entre ellos se cuentan: Estudios científicos con técnicas de radar, comunicaciones militares, comunicación y experimentos de radioaficionados, comunicaciones comerciales, telemetría, telecomando, etc. (Palle Preben-Hansen, 1996)

Algunas de las técnicas de dispersión más conocidas son las siguientes: Dispersión en la Troposfera (*Troposcatter*), en la Ionosfera (*Ionoscatter*), en irregularidades de E-Esporádica y F-Dispersa, en meteoros (*Meteor Scatter*) y en el Electrochorro Ecuatorial.

Algunas de las características de este mecanismo de propagación desde el punto de vista de las radiocomunicaciones son las siguientes:

- Bajos niveles de intensidad en la señal recibida.
- Tasa rápida de desvanecimiento (*fast fading*).
- Alcance limitado de ~ 2000 Km, impuesto por la geometría del enlace.
- La potencia empleada en la transmisión es relativamente elevada comparada con otros mecanismos de propagación.
- Uso de antenas directivas de ganancia elevada.
- Las comunicaciones están presentes mientras las irregularidades están presentes.

Un esquema típico de un enlace por dispersión se muestra en la Figura 1-3. Se observan los haces de las antenas de transmisión y recepción y las irregularidades del medio responsables de la dispersión:

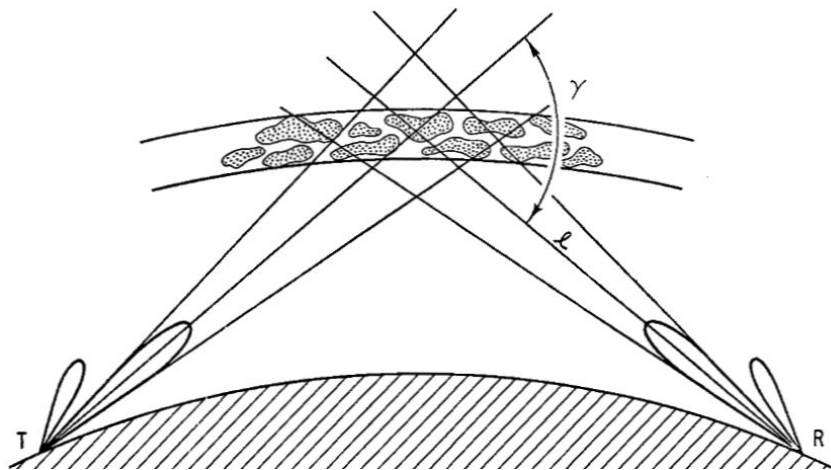


Figura 1-3 Geometría de un enlace por Dispersión Frontal (Davies, 1990).

La geometría descrita en la Figura 1-4 considera dos elementos dispersores localizados en los puntos 1 y 2, con el punto 2 ubicado a una distancia δ debajo del punto 1. Para que el campo dispersado por el punto 1 se interfiera constructivamente – en el receptor – con los campos dispersados por el punto 2, la diferencia de longitud en el trayecto ($2L$) debe ser igual a uno o más múltiplos enteros de la longitud de onda λ .

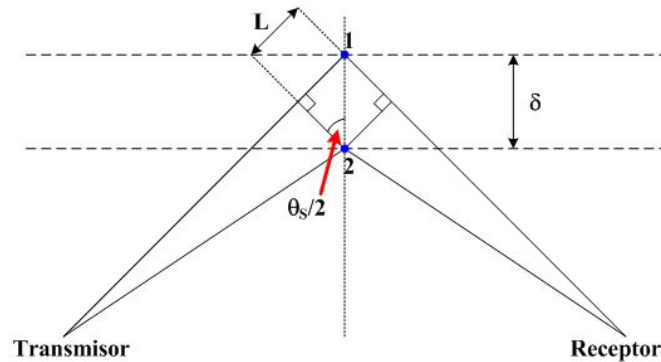


Figura 1-4 Distancia entre dos elementos dispersores que producen interferencia constructiva (Adaptado de Doviak y Zrnik, 1993)

En la Figura 1-5 se grafican los vectores: Incidente (K_i), Dispersado (K_r), Número de Onda (K_s) y Campo Eléctrico (E). Observar que el vector Número de Onda es perpendicular al plano de dispersión:

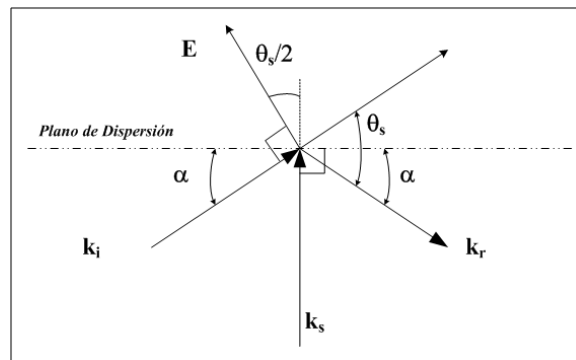


Figura 1-5 Ángulos de Dispersión y Vectores Incidente, Dispersado, Número de Onda y Campo Eléctrico. (Adaptado de Doviak y Zrnik, 1993)

De la geometría mostrada en las figuras anteriores se deduce la ecuación 1-1 correspondiente a la Ley de Bragg, que nos da las condiciones para que las ondas reflejadas por planos de dispersión adyacentes estén en fase (Doviak y Zrnic, 1993):

$$\delta = \frac{L}{\text{Sen}\left(\frac{\theta_s}{2}\right)} = \frac{\lambda}{2 \cdot \text{Sen}\left(\frac{\theta_s}{2}\right)} \quad \dots 1-1$$

La Ley de Bragg es ampliamente utilizada en cristalografía. Cuando la fórmula es aplicada en ondas de radio dispersadas por irregularidades ionosféricas, se puede concluir que la dispersión constructiva va a suceder en aquellas irregularidades de longitud λ que cumplan con la **Condición de Bragg: “La diferencia entre los vectores unitarios Incidente (k_i) y Dispersado (k_r) es conocido como Vector Número de Onda k_s y debe ser perpendicular a los planos de dispersión”** (ver Figura 1-5).

En el EEJ ocurren irregularidades ionosféricas que están alineadas con el campo magnético de la Tierra (*Field Aligned Irregularity*). Estas irregularidades actúan como los planos de dispersión en donde ocurrirá la dispersión constructiva. Se dice que es una dispersión sensible al aspecto (*aspect sensitivity*); es decir, es muy intensa cuando el haz de ondas electromagnéticas incidente es perpendicular al campo magnético y decrece rápidamente cuando el rayo se desvía de la perpendicularidad. Por lo tanto, la condición de Bragg para la dispersión en irregularidades alineadas al campo, en forma particular el EEJ, sería la siguiente: **“El Vector Número de Onda $k_s = k_i - k_r$ debe de ser perpendicular al campo magnético de la Tierra”**.

1.3 El Electrochorro Ecuatorial

Estudios basados en datos magnéticos, realizados por Graham en 1724, revelaron la existencia regular de variaciones diarias en el campo geomagnético. Posteriormente, Stewart (1882) propuso la existencia de corrientes eléctricas en la alta atmósfera, en un intento de explicar estas fluctuaciones diarias. Esta propuesta fue planteada en forma matemática por Schuster en 1889, mediante un análisis armónico del campo magnético, en el que demostró que la presencia de un campo magnético variable sólo podía ser considerada si existían corrientes externas a la Tierra; posteriormente en 1908, desarrolló una teoría cuantitativa que consideraba éstas variaciones. En esencia, la teoría Stewart-Schuster es la aplicación del Principio del Dínamo a las condiciones existentes en la ionosfera.

Los primeros registros de la variación diaria del Campo Geomagnético realizados en Huancayo-Perú en 1922 revelaron que la variación diaria de la componente horizontal (H), en ésta estación cercana al Ecuador Geomagnético, era 2.5 veces superior a las observaciones hechas en estaciones más alejadas. Esta característica fue atribuida a la presencia de una franja de intensa corriente eléctrica centrada en el

Ecuador Geomagnético, la cual fue denominada “*Equatorial Electrojet*” o Electrochorro Ecuatorial por Sydney Chapman en 1951.

El Electrochorro Ecuatorial (*EEJ - Equatorial Electrojet*) es en esencia una corriente horizontal de electrones que fluye a lo largo del **Ecuador Geomagnético** (la línea que une a los puntos con inclinación magnética igual a cero). Está confinada a una sección muy específica de la región E ecuatorial¹, exactamente entre 90 y 120 Km de altitud, en una banda de 600 Km de ancho en dirección norte-sur centrada en el Ecuador Magnético ($\pm 3^\circ$). El EEJ puede ser considerado como una respuesta de la región ecuatorial E al Sistema de Dínamo Ionosférico; por esta razón, el sentido del EEJ sigue los campos impuestos por la dínamo, o sea, el campo eléctrico tiene dirección hacia el este durante el día y hacia el oeste durante la noche. Por lo tanto, la corriente de electrones del EEJ se desplaza hacia el oeste durante el día y hacia el este en la noche. Los momentos en los cuales el EEJ cambia de dirección se conocen como “reversión diurna” y “reversión nocturna”. La velocidad que alcanza este desplazamiento llega a superar la velocidad acústica de los iones (360 m/s).

Hay ocasiones en que el campo eléctrico del Electrochorro Ecuatorial cambia de sentido bruscamente durante el día; fenómeno conocido como **Contraelectrochorro Ecuatorial (CEEJ: Counter Equatorial Electrojet)** que coincide con un descenso abrupto de la variación de la componente horizontal (ΔH) del campo magnético asociado al EEJ. En este caso, el ΔH se vuelve negativo con respecto al valor promedio que tuvo durante la noche. Éste fenómeno ocurre tanto en días magnéticamente “tranquilos” como en días “disturbados” (ver Figura 1-10 y Figura 1-11). Sin embargo, el CEEJ no siempre ocurre, a pesar que el ΔH alcanza valores muy negativos en algunos días disturbados. “Los mecanismos físicos de generación del CEEJ son aún materia de estudio y discusiones en la comunidad científica” (Diwakar Tiwari, 2003).

Sobre el Electrochorro Ecuatorial se han realizado una gran variedad de estudios científicos en las últimas décadas: Las características morfológicas fueron estudiadas mediante registros de magnetómetros en tierra; la estructura a diferentes alturas con

¹ Región D: Entre 50 y 90 km

Región E: Entre 90 y 140 km.

Región F1: Entre 140 y 210 km.

Región F2: Por encima de los 210 km.

magnetómetros a bordo de cohetes de investigación; la variabilidad y estructura latitudinal con magnetómetros en tierra, y a bordo de cohetes y satélites; las inestabilidades del plasma y los campos eléctricos con radares HF y VHF; y los eventos de CEEJ, tormentas y perturbaciones con magnetómetros en tierra y con radares VHF.

Cabe destacar el importante rol desempeñado por el Instituto Geofísico del Perú, a través del Radio Observatorio de Jicamarca, en el estudio e investigación de las irregularidades producidas por el Electrochorro Ecuatorial. Más del 80% del conocimiento científico que se tiene sobre el EEJ en la actualidad, se ha obtenido en este importante centro de investigación.

1.4 Geometría del Electrochorro Ecuatorial

Como ya se ha mencionado, el Electrochorro Ecuatorial es una corriente horizontal de electrones que fluye a lo largo del Ecuador Geomagnético y presenta una geometría bien definida: Se encuentra aproximadamente entre 90 y 120 Km de altura, con un ancho de unos 600 Km en la dirección norte-sur centrado en el Ecuador Geomagnético; es decir, aproximadamente $\pm 3^\circ$ de latitud magnética.

La Figura 1-6 es una representación esquemática del sistema de corrientes toroidales del EEJ (flujo perpendicular al plano de la figura), del sistema meridional de corrientes (líneas punteadas) y del correspondiente Campo Geomagnético toroidal.

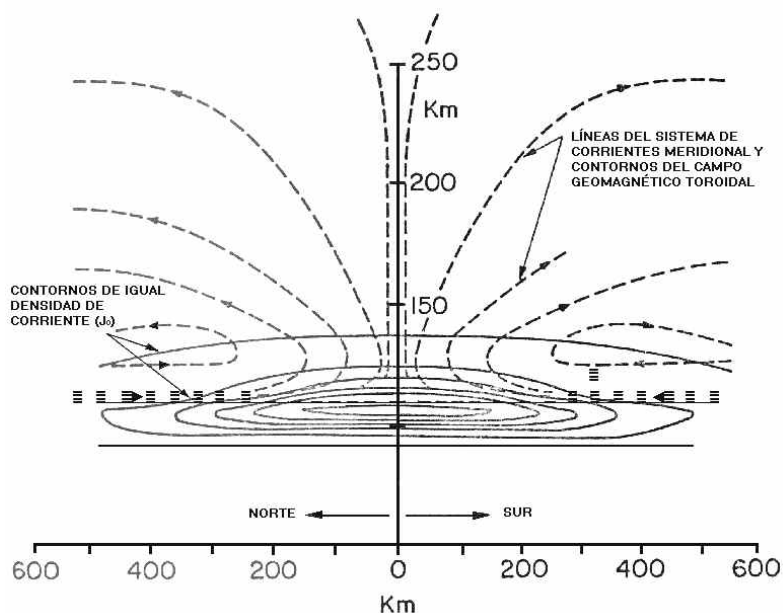


Figura 1-6 Representación esquemática del Electrochorro Ecuatorial (Adaptado de Ierkic, 1980)

1.4.1 Geometría Global

La ubicación geográfica del Electrochorro Ecuatorial está representada en la Figura 1-7.

Como ya se mencionó anteriormente, se observa que el ecuador geográfico (línea recta) no es coincidente con el ecuador geomagnético (línea irregular). El Electrochorro Ecuatorial se muestra con un ancho de $\pm 3^\circ$ de latitud magnética.

También se observa que Perú y Brasil son los únicos países de América del Sur por donde pasa el Electrochorro Ecuatorial en su recorrido.

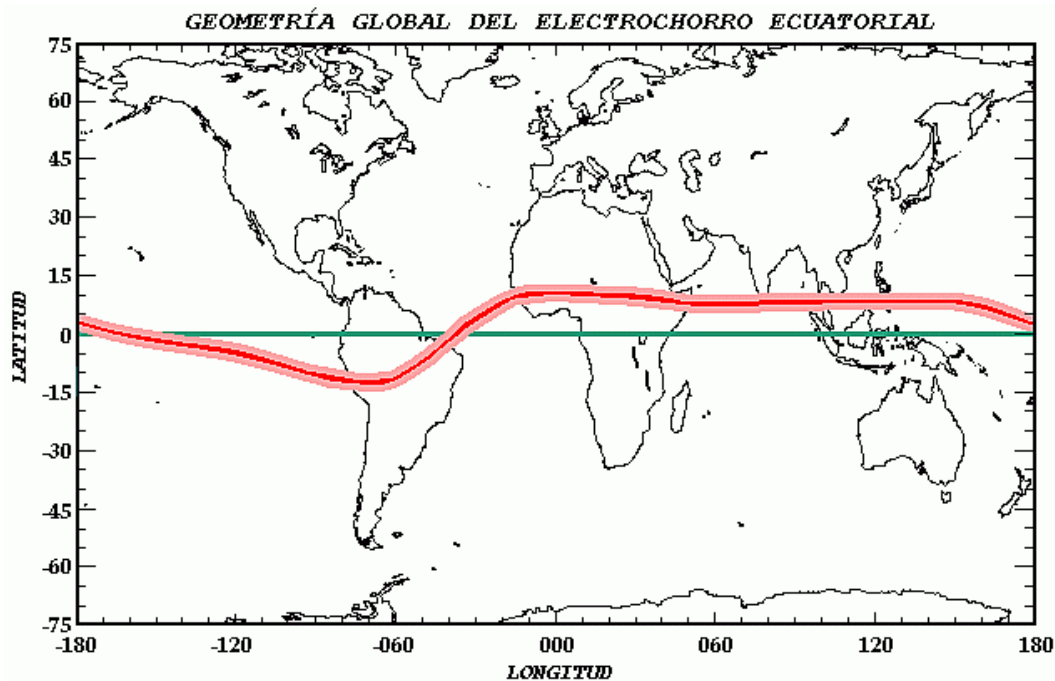


Figura 1-7 Geometría Global del Electrochorro Ecuatorial

1.4.2 Geometría Local

En el Perú, el Electrochorro Ecuatorial atraviesa longitudinalmente el territorio centro-sur del país. Dos estaciones, ubicadas debajo o fuera del EEJ, pueden comunicarse por dispersión frontal siempre y cuando cumplan con la Condición de Dispersión de Bragg y existan irregularidades del EEJ alineadas con el campo magnético.

La distancia máxima entre dos estaciones que quieran comunicarse por dispersión frontal en el Electrochorro Ecuatorial es aproximadamente 2100 Km. Esta limitación es debida a que la geometría de un enlace depende de la curvatura de la tierra y a que la altura promedio del EEJ es aproximadamente 100 Km.

En la Figura 1-8 se observa el mapa político del Perú y el Electrochorro Ecuatorial centrado en el Ecuador Geomagnético con un ancho de $\pm 3^\circ$ de latitud magnética.

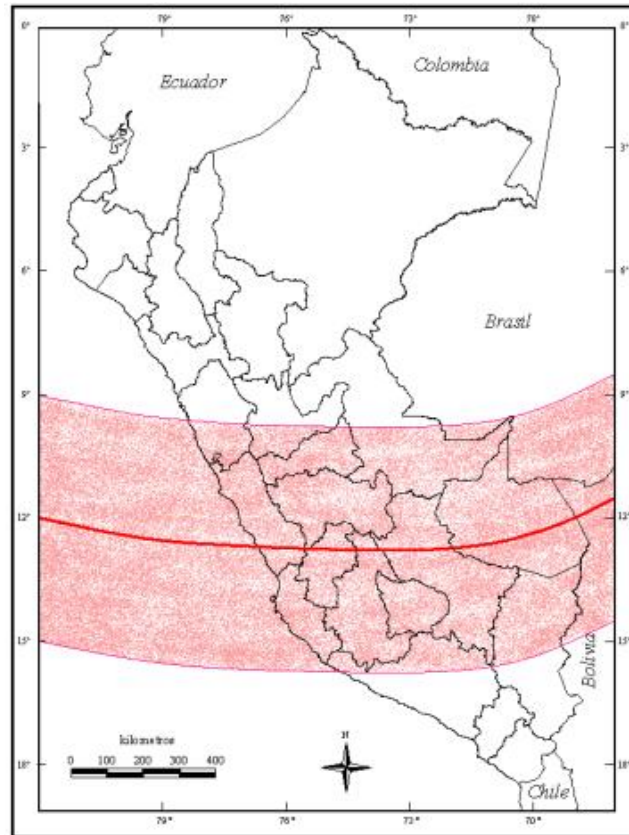


Figura 1-8 Geometría Local del Electrochorro Ecuatorial

1.4.3 Locus de Perpendicularidad

En un capítulo anterior vimos que para que dos estaciones puedan comunicarse por dispersión, era necesario que los haces de sus antenas cumplan con la Condición de Dispersión de Bragg; es decir, que el Vector Número de Onda, que es la diferencia entre los vectores unitarios en la dirección de cada estación, sea perpendicular al plano que contiene a las irregularidades responsables de la dispersión.

En el caso particular de las comunicaciones vía Electrochorro Ecuatorial, debido a que éste presenta irregularidades alineadas con el Campo Geomagnético, se denomina Locus de Perpendicularidad entre dos estaciones al lugar geométrico de todos los puntos que cumplen con la Condición de Dispersión de Bragg sobre el Campo Geomagnético para una altitud de EEJ promedio de 100 Km.

Para determinar el Locus de Perpendicularidad entre dos estaciones es necesario conocer las coordenadas geográficas de las estaciones y las características del Campo Geomagnético. Las coordenadas pueden ser obtenidas con precisión usando receptores de posicionamiento global (GPS) y las características del Campo Geomagnético del modelo IGRF: Campo Geomagnético Internacional de Referencia

El IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) es una descripción matemática del campo magnético principal de la Tierra. Este modelo es utilizado ampliamente en estudios de las profundidades del planeta, la corteza, la ionosfera y la magnetosfera. La producción del IGRF es un esfuerzo de cooperación internacional entre modeladores de campos magnéticos e instituciones y agencias responsables de recolectar y publicar datos geomagnéticos. El IGRF incorpora permanentemente a su modelo datos de observatorios magnéticos y de sondeos hechos en tierra, en el aire, en el mar y en el espacio. La última versión – IGRF 9ª Generación – fue finalizada en julio del 2003 y presentada en la XXIII Asamblea General de la Unión Internacional de Geofísica y Geodesia (IUGG).

1.5 Componente Horizontal del Campo Magnético: $\Delta H_{ROJ-PIURA}$

La física de la electrodinámica atmosférica a bajas latitudes ha determinado que la velocidad de deriva vertical ExB en la región F está relacionada directamente con el campo eléctrico del Electrochorro Ecuatorial. Por lo tanto, si se conoce las velocidades de deriva vertical ExB , es posible determinar también la intensidad del EEJ.

A su vez Rastogi y Klobuchar (1990) sugirieron y demostraron que la intensidad del Electrochorro Ecuatorial durante las horas del día podía ser estimada utilizando dos magnetómetros: uno situado en el Ecuador Geomagnético y el otro desplazado entre 6° a 9° de latitud magnética. Usando ésta técnica, ellos fueron capaces de determinar si la deriva vertical ExB en la región F era grande o pequeña. Para esto, compararon la

diferencia en los valores de la componente horizontal H (ΔH) entre dos magnetómetros ubicados en la India: Trivandrum (8.5°N, 77.0°E, Inclinación magnética 0.5°S) y Alibag (18.5°N, 72.9°E, Inclinación magnética 13.0°N). Ellos determinaron que valores intensos del EEJ correspondían con valores altos de ΔH y que valores de EEJ débil o inexistente correspondían con valores pequeños o negativos de ΔH . Sin embargo, ellos no llegaron a presentar una relación cuantitativa entre la deriva vertical ExB y el ΔH , solamente una relación **cuantitativa**.

Basados en lo anterior, en dos publicaciones recientes Anderson et al. (2002 y 2004) han demostrado que sí existen relaciones **cuantitativas** y que la velocidad de deriva vertical ExB (y por lo tanto la intensidad del Electrochorro Ecuatorial) puede ser estimada mediante observaciones realizadas por magnetómetros en tierra. Para demostrarlo, utilizaron los datos de los magnetómetros en Jicamarca (11.92°S, 76.87°O, Inclinación magnética 1.0°) y Piura (5.18°S, 80.64°O, Inclinación magnética 13.7°). Los valores de **ExB** fueron obtenidos de los datos de radar del Radio Observatorio de Jicamarca. En la primera publicación se hizo un estudio para 10 días entre los años 1998 y 1999; para la segunda publicación se utilizaron datos de 270 días entre agosto de 2001 y diciembre de 2003.

Para determinar las relaciones cuantitativas se utilizaron las técnicas de aproximación numérica de Mínimos Cuadrados y Redes Neuronales.

La función de Mínimos Cuadrados (promediados mensualmente), que se utiliza para determinar los valores de ExB tiene la siguiente forma:

$$E \times B = a_0 + a_1 \cdot \Delta H + a_2 \cdot \Delta H^2 + a_3 \cdot \Delta H^3 + a_4 \cdot F_{10.7} + a_5 \cdot F_{10.7a} + a_6 \cdot HL \dots \mathbf{1-2}$$

Donde:

- ExB: Velocidad de deriva vertical en la región F
- ΔH : Diferencia instantánea entre las componentes horizontales
- $F_{10.7}$: Flujo solar diario a una longitud de onda de 10.7 cm
- $F_{10.7a}$: Promedio de 81 días del $F_{10.7}$, centrado en el día de interés
- HL: Hora Local

Un ejemplo de los resultados obtenidos por Anderson et al. (2004) se muestra en la Figura 1-9. Se observa la comparación entre la deriva vertical ExB medida en

Jicamarca el 17 de abril de 2002 y las aproximaciones realizadas empleando los siguientes métodos de aproximación: Mínimos Cuadrados (MC), Mínimos Cuadrados promediados mensualmente (MCM) y Redes Neuronales (RN). La técnica que presentó el menor error fue el método de Redes Neuronales, con un error RMS de aproximadamente 3.02 m/s.

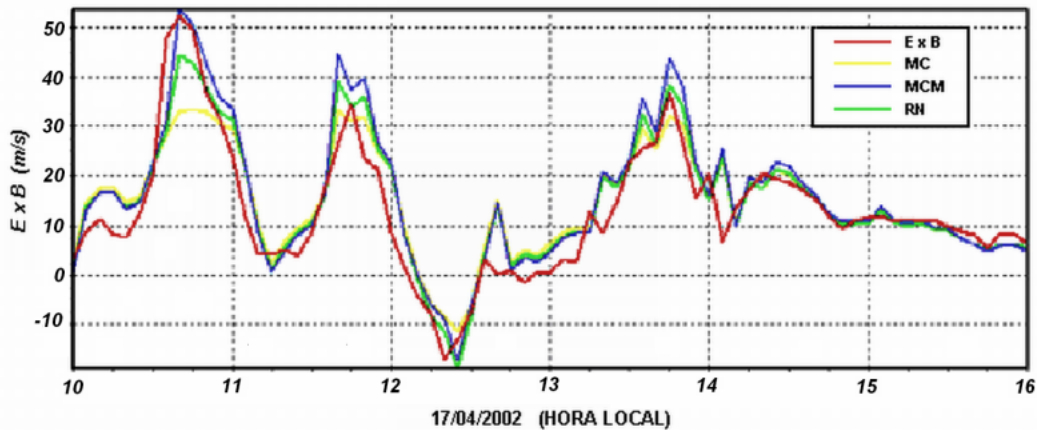


Figura 1-9 Comparación entre el ExB y los tres tipos de análisis realizados el 17/Abril/2002
(Adaptado de Anderson et al., 2004)

Por lo tanto, se concluye que como la velocidad de deriva vertical ExB puede ser calculada a partir de la diferencia entre las componentes horizontales (ΔH) del campo geomagnético medidas en dos estaciones (una localizada en el electrochorro y otra fuera de su influencia) y además sabiendo que un buen estimador de la intensidad del Electrochorro Ecuatorial es el ExB en la región F. Se puede concluir que **la intensidad del EEJ se puede estimar a través de los valores de ΔH mencionados.**

Un detalle a tomar en consideración es el hecho que el campo magnético no siempre se comporta de manera predecible. Como ya fue mencionado anteriormente, las tormentas solares afectan significativamente el comportamiento geomagnético y por lo tanto, al estar el Electrochorro Ecuatorial estrechamente vinculado a la variación de la componente horizontal H, si el campo magnético se encuentra disturbado, el comportamiento del EEJ también será irregular. Consiguientemente, si el campo magnético está “tranquilo” el EEJ también presentará un comportamiento estable o “tranquilo”.

Un ejemplo del comportamiento del $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$ en típicos días “tranquilos” y “disturbados” se muestra en la Figura 1-10 y en la Figura 1-11 respectivamente.

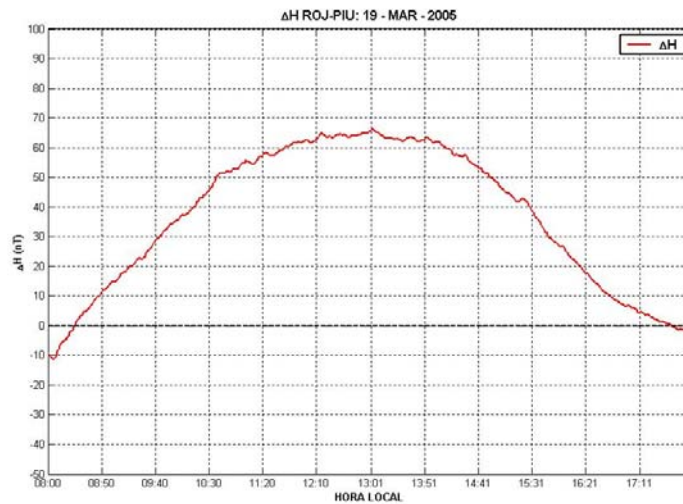


Figura 1-10 Variación del $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$ en un día “Tranquilo”: 19 de marzo de 2005

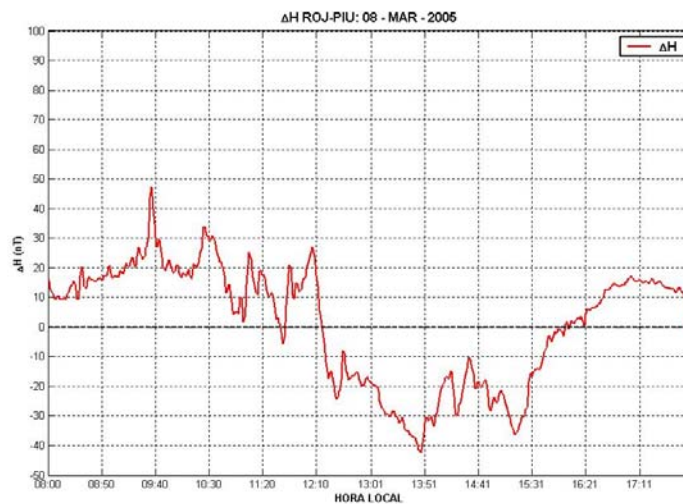


Figura 1-11 Variación del $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$ en un día “Disturbado”: 8 de marzo de 2005

1.6 Antecedentes Históricos

1.6.1 Año Geofísico Internacional (1957)

Los primeros experimentos de propagación por dispersión ionosférica se realizaron en 1952, en una zona temperada (EE.UU.), con el circuito *Cedar Rapids – Sterling*. Posteriormente se diseñaron otras trayectorias experimentales en las zonas aurorales, tropicales y ecuatoriales.

La idea de colocar trayectorias de dispersión frontal en VHF cerca del Ecuador Magnético se debe a Bowles y Cohen (1957). Como ya era conocida la naturaleza especial de las irregularidades ionosféricas en esta región tales como: E-esporádica ecuatorial, F-dispersa y el Electrochorro Ecuatorial, se esperaba que con la técnica de dispersión frontal también se obtuvieran resultados interesantes en dichas zonas.

Con estas posibilidades en mente, se diseñó una cierta cantidad de circuitos de propagación por dispersión oblicua en VHF cerca del Ecuador Magnético. Estos experimentos fueron llevados a cabo por Bowles y Cohen durante el Año Geofísico Internacional (IGY-1958) gracias al auspicio de un programa experimental del *National Bureau of Standards* (NBS) de los EE.UU., que contó con la participación del Instituto Geofísico del Perú en calidad de colaborador.

Los lugares de las estaciones de transmisión y recepción para las diferentes trayectorias de propagación se muestran en la Figura 1-12

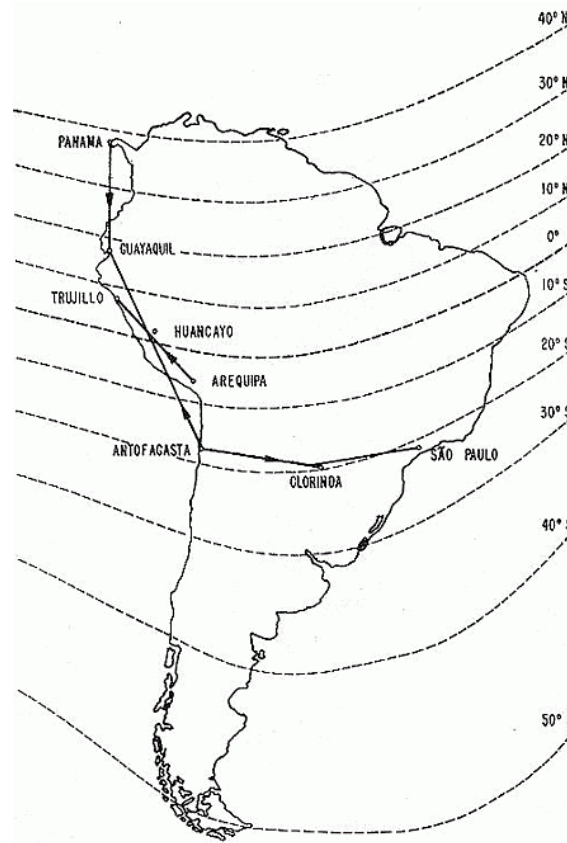


Figura 1-12 Ubicación de las estaciones de Transmisión y Recepción para los experimentos de propagación transecuatorial del IGY'1958. Las líneas punteadas indican isoclinas magnéticas (Cohen y Bowles, 1963)

Tres de las trayectorias de propagación mostradas fueron dedicadas al estudio de la dispersión en alturas correspondientes a la región E. Estas trayectorias fueron:

- Arequipa (Perú) → Trujillo (Perú)
- Antofagasta (Chile) → Huancayo (Perú)
- Huancayo (Perú) → Guayaquil (Ecuador)

La primera trayectoria tuvo su punto de reflexión aproximadamente sobre Huancayo y fue llamada la “trayectoria básica”; las otras dos trayectorias, que tuvieron sus puntos de reflexión hacia el norte y el sur del Ecuador Geomagnético, fueron denominadas: “trayectoria norte” y “trayectoria sur” respectivamente. La Tabla 1-1 muestra las características de las trayectorias de propagación mientras que la Figura 1-13 muestra esquemáticamente las diferentes intersecciones de los haces de las antenas

Tabla 1-1 Características de las trayectorias de propagación ecuatoriales en VHF

<i>Trayectorias de propagación</i>	<i>Huancayo > Guayaquil (Trayectoria Norte)</i>	<i>Arequipa > Trujillo (Trayectoria Básica)</i>	<i>Antofagasta > Huancayo (Trayectoria Sur)</i>
Frecuencia	49.880 MHz	49.920 MHz	49.960 MHz
Fecha de inicio de las transmisiones	10 Diciembre 1957	7 Diciembre 1957	1 Diciembre 1957
Fecha de fin de las transmisiones	30 Noviembre 1958	30 Noviembre 1958	30 Noviembre 1958
Coordenadas del lugar de transmisión	12° 02.7' S 75° 20.4' O	16° 44.0' S 71° 52.5' O	23° 44.0' S 70° 15.0' O
Coordenadas del lugar de recepción	02° 36.0' S 80° 24.0' O	08° 06.0' S 79° 04.5' O	12° 02.7' S 75° 20.4' O
Coordenadas del punto medio de la trayectoria	07° 21.0' S 77° 52.0' O	12° 21.0' S 75° 32.0' O	17° 54.0' S 72° 53.0' O
Distancia entre las estaciones	1180 Km	1230 Km	1410 Km
Inclinación magnética en el punto medio de la trayectoria	10° N	2° N	8° S

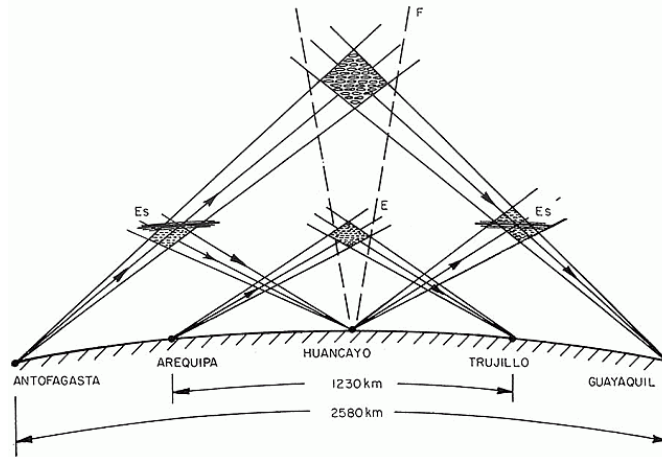


Figura 1-13 Trayectorias de propagación por dispersión frontal en VHF para los experimentos del IGY'1958. Intersecciones de los haces de las antenas en el plano vertical (Cohen y Bowles, 1958)

La técnica utilizada por Cohen y Bowles en estos experimentos fue la de transmitir una señal constante “onda continua” (*CW, Continuous Wave*) y registrar la variación de amplitud en la señal recibida. Las antenas de transmisión y recepción fueron diseñadas de tal manera que sus intersecciones estaban alrededor de los 85 Km de altura. Las variaciones de la señal recibida respecto al tiempo podían, por lo tanto, ser relacionadas con cambios dentro del volumen ionosférico definido por la intersección de los haces de las antenas. Además, la ocurrencia de desvanecimiento (*fading*) de la señal recibida para la trayectoria básica también fue medida por el registrador del número de desvanecimientos por unidad de tiempo (*fading wave meter*) desarrollado por Balsley y Bowles.

Para estos experimentos se utilizaron antenas rómbicas y transmisores-amplificadores de onda continua con una potencia de aproximadamente 2 KW. Las estaciones de recepción utilizaban receptores de banda angosta (entre 100 y 300 Hz).

Las señales recibidas eran integradas con una constante de tiempo de 12 segundos en un integrador y luego eran registradas graficando la intensidad de la señal versus el tiempo en una cinta de papel con una velocidad de 3 pulgadas por hora. Los sistemas de recepción eran calibrados diariamente mediante un generador de señal patrón. Los niveles promedio de señal fueron determinados, en decibelios respecto a un microvoltio, a intervalos de 15 minutos. Dichos niveles señal estaban referidos a un voltaje de antena sintonizado a una impedancia resistiva de 50Ω . Por último, la potencia irradiada de cada transmisor era también registrada continuamente.

La información obtenida se procesó posteriormente y se obtuvieron diferentes cuadros estadísticos, algunos de los cuales se observan en la Figura 1-14. En dicha figura se muestran los percentiles 10, 50 y 90 para las trayectorias Sur, Básica y Norte durante los meses: enero, abril, julio y octubre de 1958.

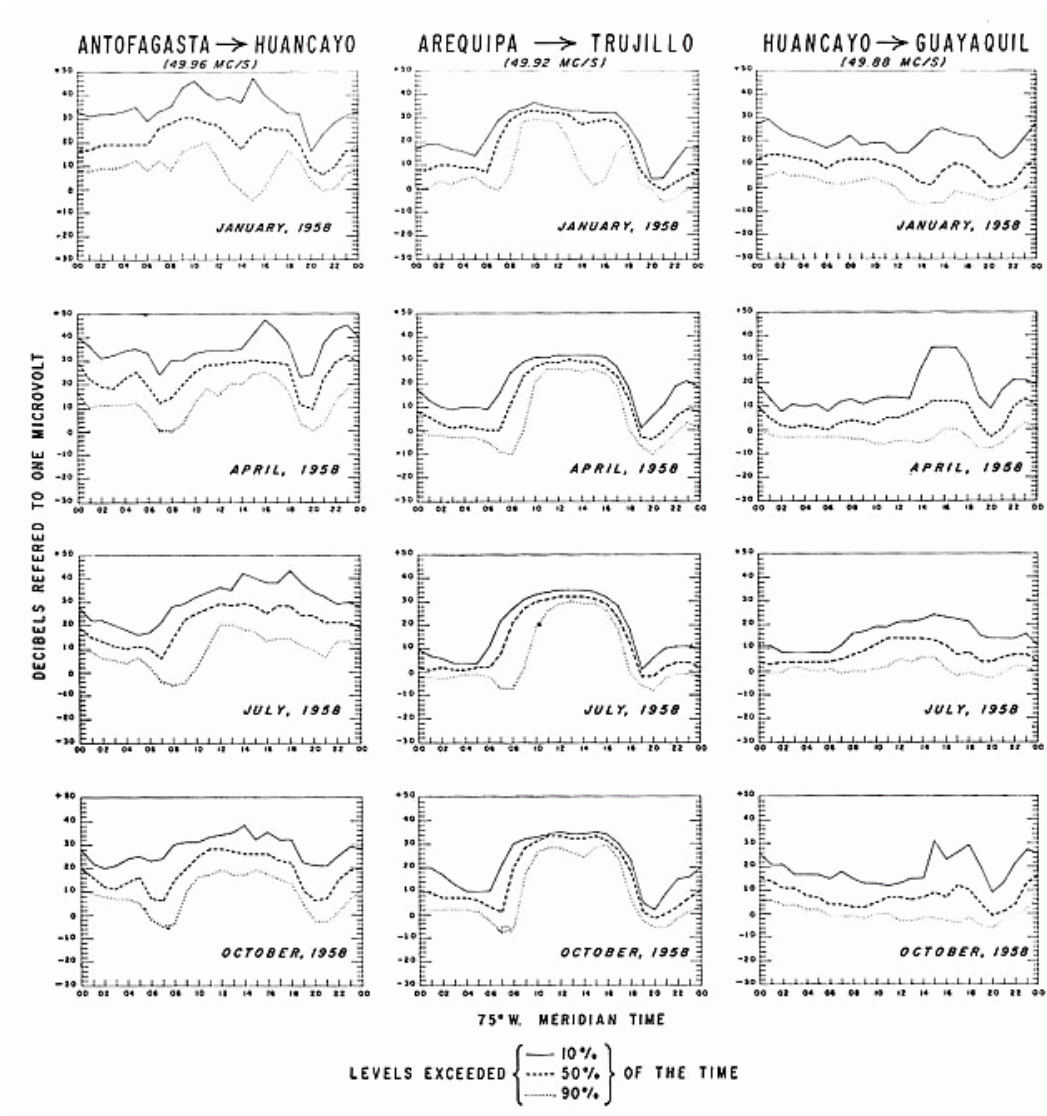


Figura 1-14 Promedios mensuales de la variación diaria del nivel de señal recibida. (Cohen y Bowles, 1963)

Las principales conclusiones de este experimento, referidas al **Electrochorro Ecuatorial**, fueron las siguientes:

- Las señales recibidas mediante dispersión frontal VHF en trayectorias ecuatoriales fueron 30 dB más intensas que las recibidas durante experimentos similares en latitudes templadas.

- Estas señales fueron atribuidas a irregularidades en la región E asociadas al Electrochorro Ecuatorial. Se estimó que dichas irregularidades ocurrían en un rango de 95 a 110 Km de altura.
- Algunas de estas señales al parecer son las responsables de que en los ionogramas se presenten las configuraciones conocidas como “E-esporádica”
- La variación en el tiempo de las fuertes señales recibidas durante el día en el Ecuador Magnético tiene una fuerte correlación con las variaciones en el tiempo de la componente horizontal (H) del campo magnético terrestre
- Existe una pequeña variación estacional en la intensidad de la señal recibida por dispersión en el Electrochorro Ecuatorial.
- La dispersión frontal en el Electrochorro Ecuatorial aparentemente podría ser usada como un mecanismo de propagación económico y confiable en el campo de las telecomunicaciones, al menos durante las horas del día.
- Estos experimentos se realizaron en un periodo de actividad máxima del ciclo solar. La factibilidad de utilización de este tipo de propagación dependerá de estudios posteriores que determinen si la dispersión intensa de señales se mantiene en periodos de actividad solar mínima.

1.6.2 Experimento de Romero, Giesecke y Pérez (1966-1967)

Entre octubre de 1966 y agosto de 1967 se realizó un experimento de propagación en VHF por dispersión ionosférica vía el Electrochorro Ecuatorial entre las ciudades de Juliaca y Lima. El experimento fue realizado en una forma similar al experimento realizado por Cohen y Bowles en 1958 y tuvo como objetivo analizar la factibilidad de emplear este modo de propagación para telecomunicaciones.

Como se observa en la Figura 1-15, el experimento se realizó durante un periodo correspondiente a actividad solar moderada (50 a 100 manchas solares) a diferencia del Año Geofísico Internacional que fue en un periodo de máxima actividad solar (entre 180 a 200 manchas solares). Los resultados de ambos experimentos fueron comparados teniendo en cuenta factores de corrección correspondientes a las diferentes características de los enlaces: ganancia de antenas, potencia transmitida, distancia entre estaciones, etc.

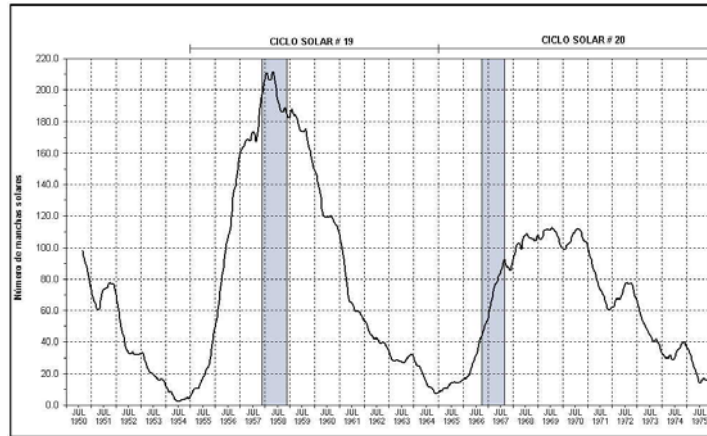


Figura 1-15 Número de manchas solares en los ciclos 19 y 20

La Figura 1-16 muestra la ubicación de las estaciones de transmisión y recepción, así como el Ecuador Magnético y la proyección de los haces de las antenas.

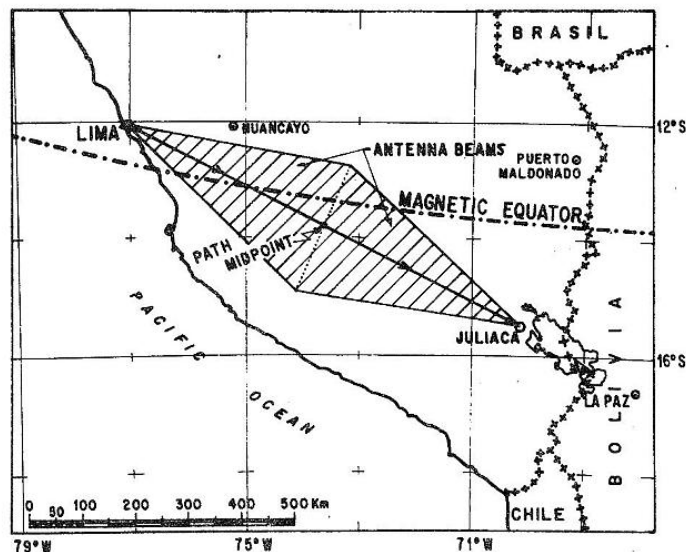


Figura 1-16 Trayectorias de propagación por dispersión frontal en VHF entre Lima y Juliaca (Romero et. al. 1968)

La técnica del experimento de Romero et al., consistió en transmitir, desde Lima, una señal de onda continua (CW) de 47.3 MHz. La intensidad de la señal y la tasa de desvanecimiento eran registradas en Juliaca. Las antenas fueron diseñadas de tal manera que los haces verticales se intersecaban a 100 Km de altura; por lo tanto, las variaciones en las características de la señal recibida estarían relacionadas a cambios dentro del volumen común definido por el cruce de los haces. La potencia de transmisión fue de 900W y los receptores eran de banda angosta (entre 100 y 300 Hz). La intensidad de las señales recibidas y su tasa de desvanecimiento fueron introducidas

a un integrador con una constante de tiempo de 12 segundos y registradas en una cinta de papel a una velocidad de 3 pulgadas por hora. El sistema de recepción era calibrado diariamente con un generador de señales. Los niveles promedio de señal fueron determinados, en decibelios respecto a un microvoltio, por cada 15 minutos de intervalo. Los niveles de señal estaban referidos a un voltaje de antena sintonizado a una impedancia resistiva de 50Ω. La Tabla 1-2 muestra las características comparativas entre el enlace Lima-Juliaca (1967) y el enlace Arequipa-Trujillo (1958).

Tabla 1-2 Características de las trayectorias de propagación ecuatoriales en VHF

<i>Trayectorias de propagación</i>	<i>Lima → Juliaca</i>	<i>Arequipa → Trujillo</i>
Frecuencia	47.300 MHz	49.920 MHz
Fecha de inicio de las transmisiones	Octubre 1966	Diciembre 1957
Fecha de fin de las transmisiones	Agosto 1967	Noviembre 1958
Coordenadas del lugar de transmisión	12° 02.6' S 77° 02.5' O	16° 44.0' S 71° 52.5' O
Coordenadas del lugar de recepción	15° 29.5' S 70° 08.1' O	08° 06.0' S 79° 04.5' O
Coordenadas del punto medio de la trayectoria	13° 46.2' S 73° 37.2' O	12° 21.0' S 75° 32.0' O
Distancia entre los puntos de transmisión y recepción	838 Km	1230 Km
Inclinación magnética aproximada en el punto medio de la trayectoria	0.8° S	2° N
Ancho de haz de las antenas en el plano horizontal	38°	6°
Angulo de elevación de las antenas	10°	4.7°
Potencia Transmitida	880 W	2 KW
Atenuación de la potencia transmitida relativa a la inversa de la distancia	-70 dB	-94 dB

En la Figura 1-17 se muestran los percentiles mensuales de la intensidad de la señal recibida para los meses desde noviembre de 1966 a junio de 1967.

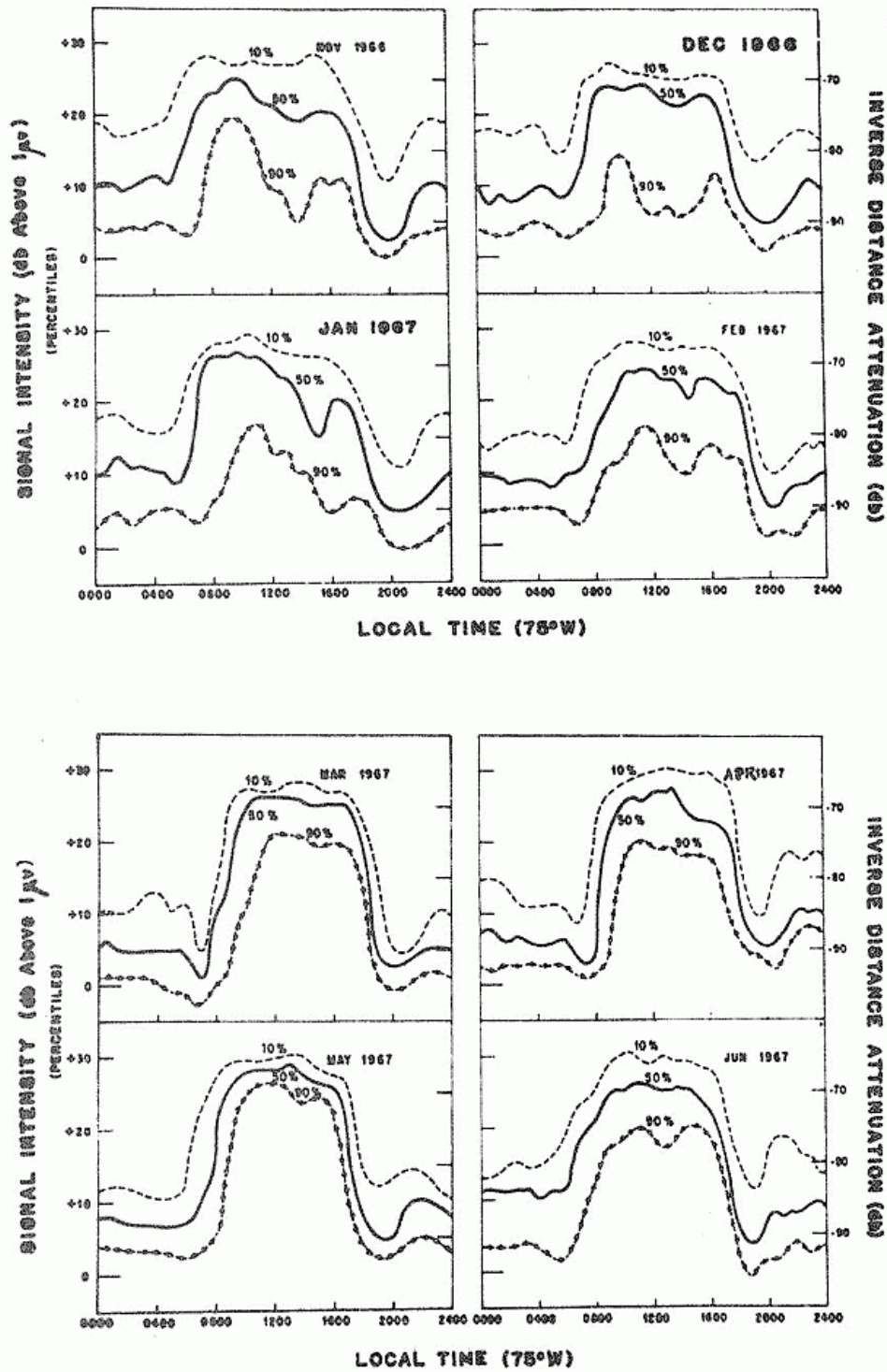


Figura 1-17 Percentiles mensuales de la intensidad de señal recibida (Romero Et. Al., 1968)

Las principales conclusiones de este experimento, **referidas al Electrochorro Ecuatorial**, fueron las siguientes:

- Las variaciones diarias en la intensidad de la señal recibida tienen un máximo durante el día del orden de 27dB respecto a 1uV. Durante la noche el máximo es del orden de 10dB respecto a 1uV. Los mínimos de intensidad de señal ocurren en las horas de reversión en la dirección del flujo del Electrochorro Ecuatorial.
- La tasa de desvanecimiento de la señal es mínima durante las horas del día y la noche: 20 Hz y 50 Hz respectivamente. Además, tiene máximos relativos en los periodos de reversión del Electrochorro Ecuatorial.
- Aún en el periodo mínimo del ciclo de manchas solares y durante periodos de mediana actividad solar, el nivel de la señal propagada por dispersión frontal en el Ecuador Geomagnético es considerablemente mayor que en latitudes templadas. La influencia del ciclo solar es muy pequeña.
- En contraste a lo que ocurre en latitudes templadas donde las perturbaciones no tienen un efecto apreciable en la intensidad de la señal dispersada, las tormentas magnéticas y las perturbaciones ionosféricas súbitas afectan adversamente la intensidad de la señal.
- Una muy definida variación estacional fue observada, especialmente para los máximos de señal durante la noche y para los mínimos de señal diurna y nocturna. Para los mínimos, la más baja intensidad de señal es durante el equinoccio de marzo (otoño) y la más alta es durante los solsticios de diciembre (verano) y junio (invierno). Sin embargo, la intensidad de la señal durante el día –lo cual es de mucha importancia desde el punto de vista de las comunicaciones– no muestra una variación estacional apreciable para los percentiles 10% y 50%. Para el percentil 90%, ocurre un efecto de variación estacional inversa; es decir, es mínima durante el solsticio de diciembre.
- Otra variación estacional observada fue para las horas de ocurrencia de la reversión en la dirección del flujo del Electrochorro Ecuatorial (Figura 1-18). La reversión matutina ocurre más tarde durante marzo y abril, mientras que la reversión vespertina ocurre más tarde durante febrero.

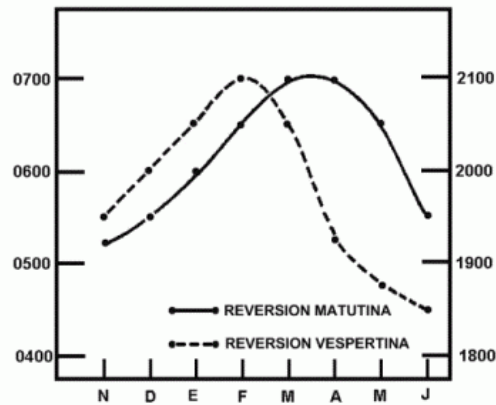


Figura 1-18 Variación estacional de la reversión del EEJ, (Romero et al., 1968)

- El 12 de noviembre de 1966 tuvo lugar un eclipse total de sol. El efecto de este fenómeno fue la reducción de la intensidad de la señal dispersada en el EEJ.
- Los altos niveles en la intensidad de la señal recibida durante el día, prácticamente independiente del ciclo solar, sugieren la posibilidad de explotar la propagación por dispersión en VHF para establecer circuitos ecuatoriales de comunicación. El uso de las señales más débiles y de rápido desvanecimiento también es factible al menos para telegrafía.

1.6.3 Otros Experimentos (1967 – 1971)

Otra referencia bibliográfica acerca de experimentos en comunicaciones vía Electrochorro Ecuatorial, posterior al experimento de Romero et al. (1967), es el trabajo de Valladares y Woodman (1975):

“En 1966, Romero, Giesecke y Pérez repitieron el experimento entre las ciudades Lima y Juliaca... Posteriormente, Romero estableció la primera comunicación de voz vía Electrochorro Ecuatorial utilizando un equipo comercial de Banda Lateral Única (BLU), obteniendo una transmisión de baja calidad causada por dos factores:

- Una variación en la fase de la señal originada por el medio
- Un “Lloriqueo” superpuesto debido al “fading” del Electrochorro

En setiembre de 1971, Heraud (*) estableció transmisiones de señales de voz empleando modulación de frecuencia de banda angosta y obteniendo una mejor inteligibilidad que aquella obtenida por Romero en BLU, pero sujeta a ruido impulsivo que originaba un golpeteo a una frecuencia aproximada de 20 Hz. Se obtuvo buena inteligibilidad para una SNR de 30 dB y una muy pobre para una SNR de 15 a 10 dB.

(*) Heraud, J., “Estudios de Propagación utilizando el fenómeno de dispersión en el Electrochorro Ecuatorial”. Informe Preliminar #1, Instituto Geofísico del Perú. 1972...”

En la cita anterior se hace mención a un Informe Preliminar que no pudo ser ubicado debido a que en el incendio de la biblioteca del IGP, en mayo del 2000, se perdieron éste y muchos otros documentos.

1.6.4 Simulación Análogo-Digital del Electrochorro Ecuatorial (1975)

En el III Congreso de Ingeniería Mecánica y Ramas Afines (III CONIMERA. Lima, 1975), C. Valladares y R. Woodman presentaron un artículo en el cual mostraban una técnica para simular comunicaciones por dispersión en el Electrochorro Ecuatorial en un computador.

El artículo describe la implementación de un sistema análogo–digital: Análogo porque hacía uso de amplificadores, integradores, filtros, micrófonos, parlantes, grabadores y reproductores de cinta magnética; Digital porque hacía uso de los digitalizadores y computadoras del Radio Observatorio de Jicamarca y el procesamiento vía software de las señales digitalizadas. El objetivo era determinar, mediante la simulación, la calidad de un sistema de comunicaciones sin la necesidad de tener que implementarlo. Para esto, la simulación permitía ensayar con diversos tipos de transmisiones y técnicas no convencionales de recepción.

En la publicación se describe matemáticamente los siguientes procesos:

- Respuesta de un medio dispersivo a un impulso de entrada
- Función de transferencia de un medio dispersivo
- Función de densidad de Rayleigh
- Función de densidad de Procesos Gaussianos
- Señal FM de banda angosta
- Convolución de una señal FM banda angosta con la función de transferencia de un Proceso Gaussiano
- Adición de ruido aleatorio Gaussiano
- Demodulación de una señal FM banda angosta, etc.

En sus resultados y conclusiones Valladares y Woodman mencionan que se logró simular el comportamiento del EEJ para diferentes niveles de SNR.

1.6.5 Simulación Digital del Electrochorro (En desarrollo)

Actualmente, el Radio Observatorio de Jicamarca viene desarrollando una versión más moderna y sofisticada de la simulación anterior, donde la totalidad de los procesos están siendo realizados por medios digitales.

La simulación en desarrollo hace uso de dos modelos del Electrochorro Ecuatorial: (1) EEJ de capa simple (Figura 1-19) y (2) EEJ de capas múltiples (Figura 1-1):

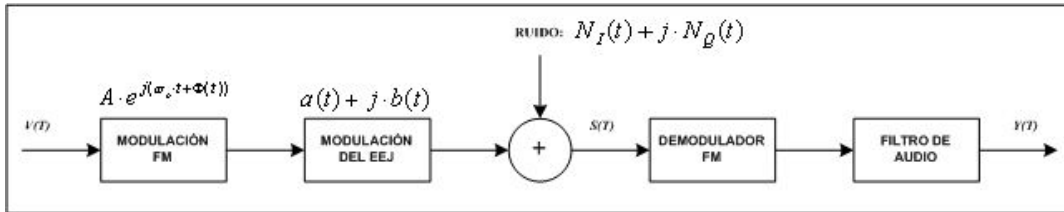


Figura 1-19 Diagrama de bloques del modelo de simulación del canal de comunicaciones vía el Electrochorro Ecuatorial. (Sarango, 2005 - a)

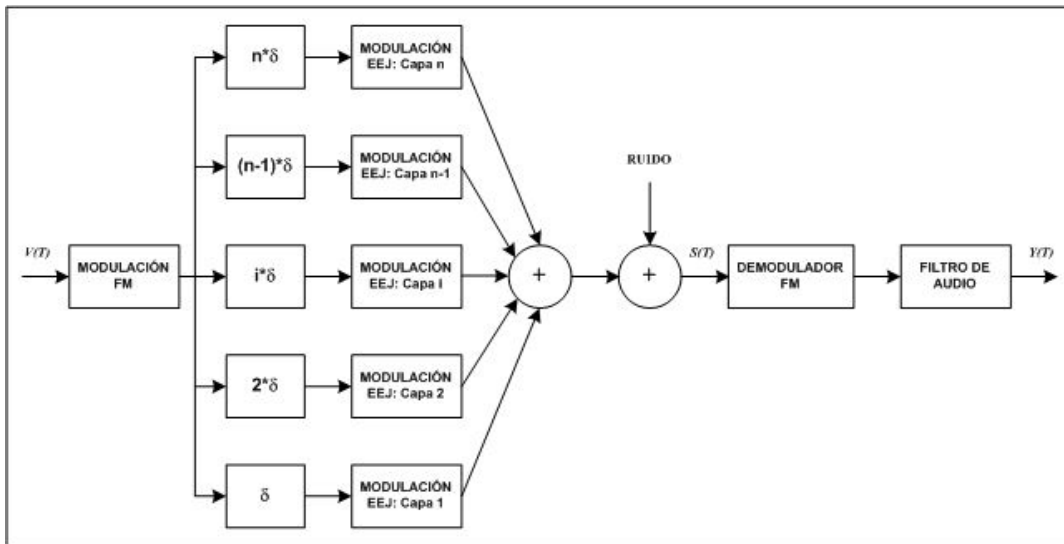


Figura 1-20 Diagrama de bloques del modelo de simulación del canal, incluyendo Electrochorro de múltiples capas (Sarango, 2005 - a)

(*) NOTA: La descripción de los detalles de estas simulaciones está fuera de los alcances de esta tesis.

2 ESQUEMAS DE MODULACIÓN UTILIZADOS

2.1 Introducción

Un sistema de comunicación transmite señales con información a través de un canal de comunicaciones que une el transmisor con el receptor.

Se denomina **banda base** a la banda de frecuencias que ocupa la señal original que lleva la información.

La utilización eficiente del canal de comunicación requiere desplazar las frecuencias de la banda base a otro rango de frecuencias más adecuado para la transmisión. En recepción se realizará el desplazamiento inverso en frecuencia al rango original de la banda base. El desplazamiento del rango de frecuencias se consigue mediante un proceso llamado **Modulación** que se define como: el proceso por el que alguna de las características de una **Portadora** se modifica de acuerdo con la señal que tiene la información. La señal en banda base se denomina: **Señal Moduladora**; y la señal resultante del proceso de modulación: **Señal Modulada**. Para recuperar la señal modulada, es necesario que en el extremo receptor se devuelva a la señal modulada su forma original. Este proceso se denomina **Demodulación** y es el inverso de la **Modulación**.

2.2 Esquemas de Modulación Analógica

Los esquemas de modulación analógica utilizados en las comunicaciones vía Electrochorro Ecuatorial fueron los siguientes:

- Amplitud Modulada (AM)
- Banda Lateral Única (BLU ó SSB)
- Frecuencia Modulada (FM)

A continuación se describirá brevemente cada uno de estos esquemas, señalando sus características, ventajas, desventajas y aplicaciones:

2.2.1 Amplitud Modulada (AM) y Banda Lateral Única (SSB)

En modulación por Amplitud Modulada (AM), la señal de portadora modulada tiene la siguiente forma:

$$x_c(t) = A_c \cdot [1 + m \cdot x(t)] \cdot \text{Cos}(\omega_c \cdot t) \quad \dots 2-1$$

Donde $x(t)$ es la señal modulante y $x_c(t)$ es la señal modulada por la señal portadora $c(t) = \cos(\omega_c \cdot t)$ con frecuencia $\omega_c = 2\pi f_c$. La envolvente de la señal modulada $[1 + m \cdot x(t)]$, sigue la forma de la señal modulante. Normalmente se utiliza $m \leq 1$ para evitar distorsiones de la envolvente e inversiones de fase en la señal portadora.

La Amplitud Modulada es considerada una modulación lineal, pues un parámetro de la señal de salida -amplitud de la señal portadora- es modificado en forma proporcional por una señal de entrada -la señal modulante-. Este proceso se aprecia mejor en las siguientes figuras que muestran las señales involucradas tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia.

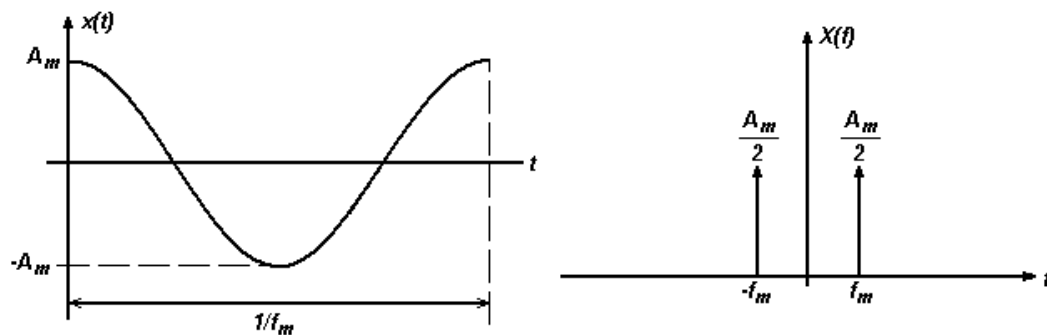


Figura 2-1 Señal Modulante en los dominios del tiempo y de la frecuencia

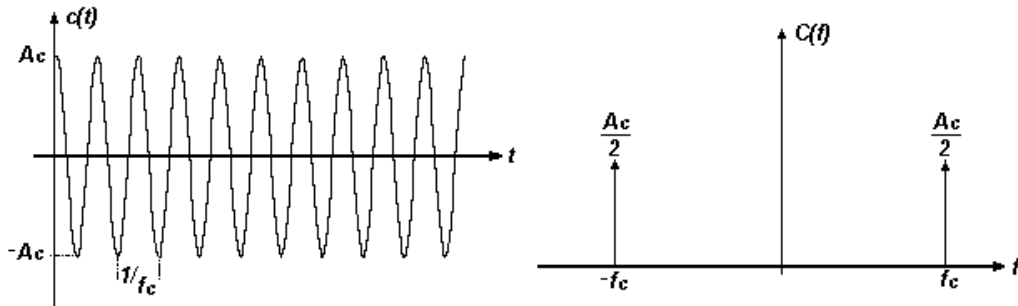


Figura 2-2 Señal Portadora en los dominios del tiempo y de la frecuencia

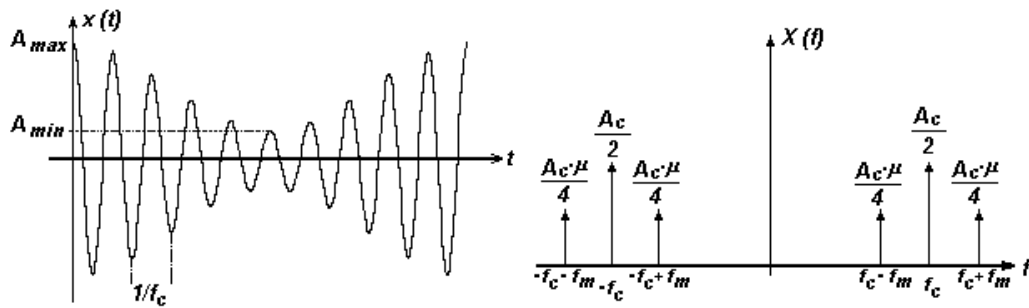


Figura 2-3 Señal Modulada en los dominios del tiempo y de la frecuencia

En la Figura 2-1 se asumió como señal modulante a un tono sinusoidal. Por lo tanto el espectro de Fourier positivo de la señal modulada es:

$$X_c(f) = \frac{A_m}{2} [\delta(f + f_m) + \delta(f - f_m)] \quad \dots 2-2$$

En general, el ancho de banda de transmisión de una señal AM es: $BT=2 \cdot fm$; es decir, dos veces el ancho de banda de la señal modulante. Se dice que AM es una modulación que desperdicia ancho de banda pues el mensaje podría ser transmitido en banda base, sin modulación, en la mitad del ancho de banda de transmisión en AM.

La potencia promedio de una señal transmitida en AM esta dada por:

$$S_T = \left(1 + m^2 \cdot x^{\wedge 2}\right) \cdot \frac{A_C^2}{2} \quad \dots 2-3$$

En la Figura 2-3 se precia que la mitad de la potencia transmitida reside en la portadora. Por lo tanto, se puede decir que parte de la potencia transmitida es desperdiciada pues es independiente del mensaje y no lleva información.

Por otra parte, la eficiencia está limitada a 33% para evitar la sobremodulación y evitar la distorsión en la recepción.

Existen muchos tipos de arreglos para generar AM. Uno de ellos, mostrado en la Figura 2-4, utiliza un mezclador balanceado para obtener el producto $m \cdot x(t)$ con la señal portadora $A_c \cdot \cos(\omega_c \cdot t)$. Este producto es luego sumado a la señal portadora para producir la señal modulada AM $x_c(t)$

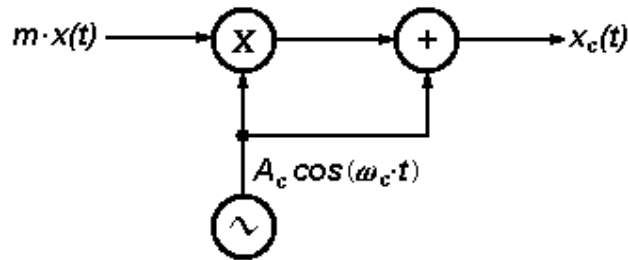


Figura 2-4 Generación de AM utilizando un mezclador balanceado

Este es el esquema más sencillo para generar AM. Existen otros métodos que generan modulación en amplitud sin necesidad de inyectar una señal portadora, pero no son materia de estudio.

La manera más simple de recuperar o demodular una señal AM es empleando el circuito Detector de Envolvente mostrado en la Figura 2-5:

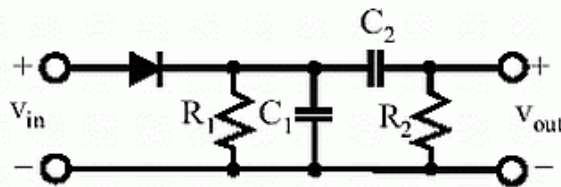


Figura 2-5 Detector de envolvente

Aunque existen otros tipos de circuitos de demodulación AM, este circuito es preferentemente utilizado por su simplicidad y bajo costo. Además, en este caso no es necesario conocer la frecuencia y fase de la señal portadora.

Existe un método de modulación llamado AM con Portadora Suprimida, el cual es más eficiente que el AM común. Ya no se desperdicia potencia en la portadora y esta es aprovechada en las bandas laterales para transmitir información. Sin embargo, los

circuitos de recepción son más complicados de implementar pues se necesita conocer la frecuencia y fase de la señal portadora original (detección síncrona).

Existe otro método que es más utilizado y se llama AM con Banda Lateral Única (SSB: Single Side Band, por sus siglas en inglés). Este método suprime tanto la portadora como una de las bandas laterales de información de AM, logrando con esto reducir el ancho de banda de transmisión y mejorar la eficiencia.

Un esquema simple para generar SSB es el siguiente:

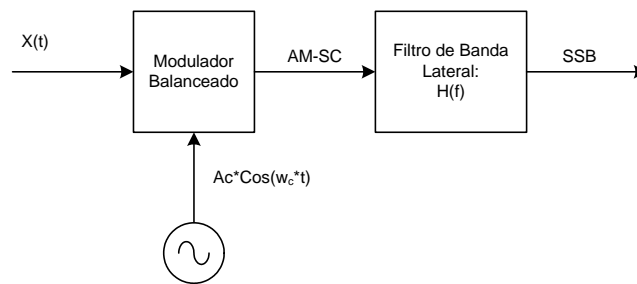


Figura 2-6 Modulación de SSB usando filtro de banda lateral

Un método alternativo para generar SSB se muestra en la Figura 2-7. Este circuito puede producir ambos tipos de modulación, banda lateral superior (USB: Lower Side Band) y banda lateral inferior (LSB: Lower Side Band) dependiendo si se suma o resta los productos de los dos moduladores balanceados.

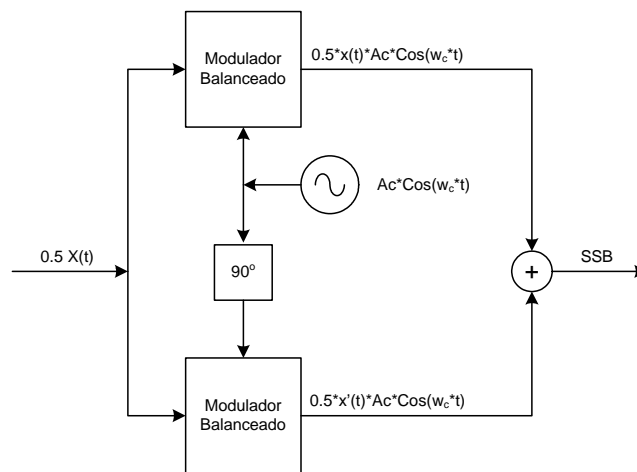


Figura 2-7 Modulación de SSB usando cuadratura

En las siguientes figuras se muestran los espectros de una señal en banda base y luego de esta misma señal modulada en USB y en LSB por una portadora de frecuencia f_c . En la Tabla 2-1 se resumen las ventajas y desventajas de estas técnicas de modulación.

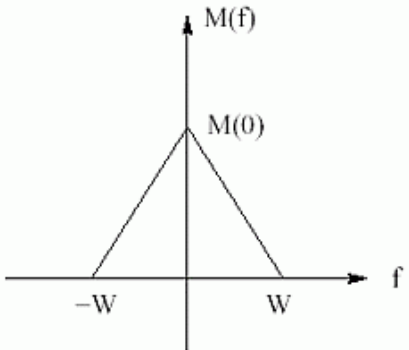


Figura 2-8 Espectro de señal moduladora limitada en banda

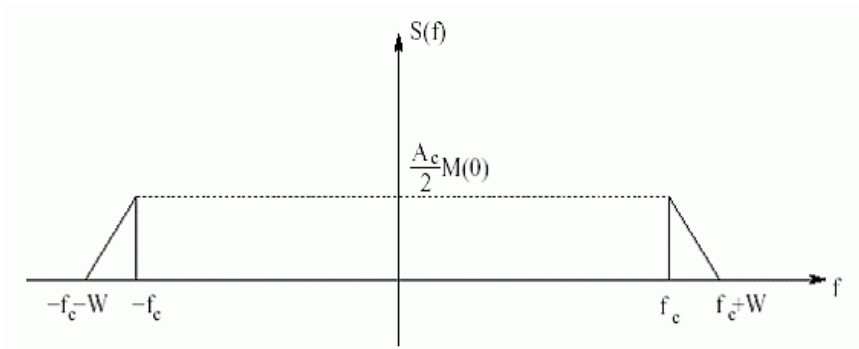


Figura 2-9 Espectro de señal USB

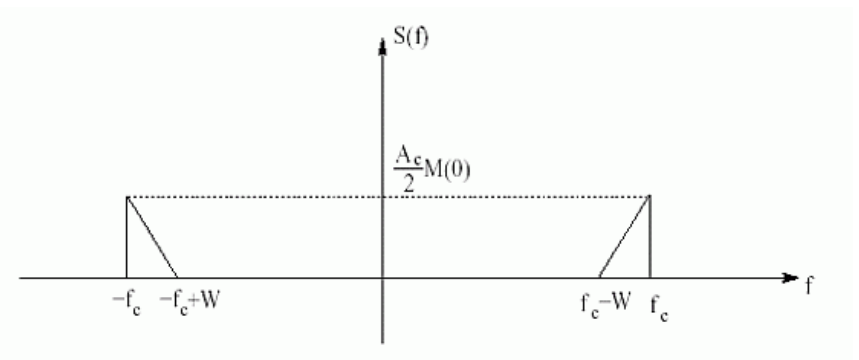


Figura 2-10 Espectro de señal LSB

Tabla 2-1 Ventajas y desventajas de AM y SSB

MODULACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
AM	Fácil de generar: moduladores sencillos de construir	Ancho de banda ineficiente: igual a dos veces el ancho de banda de la señal modulante
	Receptores sencillos de construir	La eficiencia máxima de transmisión es igual a 33%
		La frecuencia portadora está presente en la transmisión, así no se transmite ninguna información
		Es vulnerable a interferencias de ruido estático, eléctrico y atmosférico
	APLICACIONES: Radiodifusión comercial, comunicaciones marítimas, comunicaciones aeronáuticas, radioaficionados, etc.	
SSB	Ancho de banda eficiente: Igual al ancho de banda de la señal modulante	Difícil de generar: moduladores complejos de construir
	La eficiencia máxima de transmisión es cercana al 100%	Receptores complejos de construir, la voz no suena natural al ser reconstruida.
	Se pueden utilizar más estaciones debido al reducido ancho de banda	Es vulnerable a interferencias de ruido estático, eléctrico y atmosférico
	APLICACIONES: Radioaficionados, comunicaciones marítimas y aeronáuticas, comunicaciones por satélite, comunicaciones militares, etc.	

2.2.2 Frecuencia Modulada (FM)

La Modulación en Frecuencia o FM, es el proceso de producir una señal cuya frecuencia instantánea varía en función de la amplitud instantánea de la señal modulante o información (Figura 2-11).

El valor absoluto del máximo rango de frecuencias en que varía la portadora es conocido como Constante de Desviación de Frecuencia: f_{Δ}

$$f(t) = f_c + f_{\Delta} \cdot x(t) \quad \dots 2-4$$

Como la frecuencia es la derivada de la fase con respecto al tiempo, la señal de portadora modulada en FM puede ser expresada como:

$$x_c(t) = A_c \cdot \cos \left[\omega_c \cdot t + 2\pi \cdot f_{\Delta} \cdot \int x(t) \cdot d\lambda \right] \quad \dots 2-5$$

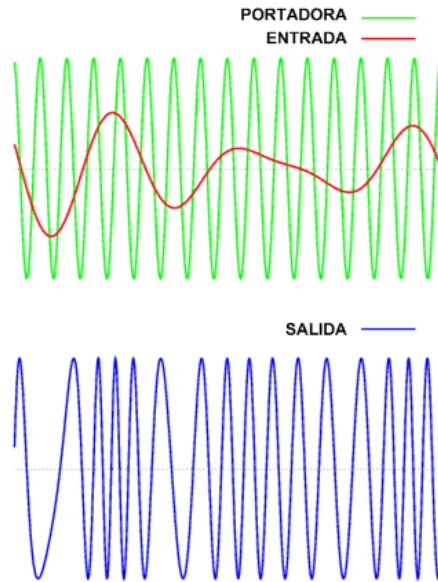


Figura 2-11 Modulación en frecuencia de una señal

Si la señal modulante cambia en el tiempo a una velocidad mucho más lenta que la señal portadora, se puede considerar a la señal modulada como una sucesión de ondas sinusoidales con periodos de variación lentos. El valor RMS de una onda sinusoidal es independiente de su periodo; por lo tanto, se puede concluir que la potencia de la señal modulada es la misma que la de la señal portadora. En FM, la potencia transmitida no varía con la modulación a diferencia de la modulación por amplitud (AM).

Para determinar el ancho de banda de transmisión es necesario resolver la señal modulada en sus bandas laterales. Este cálculo es más difícil que en AM. A continuación se hará el análisis para el caso de señal modulante de tipo tono sinusoidal, en donde la señal modulada tiene la siguiente forma:

$$x_c(t) = A_c \cdot \text{Cos} \left[\omega_c \cdot t + 2\pi \cdot f_\Delta \cdot \int \text{Cos}(\omega_m t) \cdot d\lambda \right] \quad \dots 2-6$$

$$x_c(t) = A_c \cdot \text{Cos} \left[\omega_c \cdot t + \frac{2\pi \cdot f_\Delta}{\omega_m} \cdot \text{Sen}(\omega_m t) \right] \quad \dots 2-7$$

El cociente entre f_Δ y f_m es conocido como el Índice de Modulación m_p

$$m_p(t) = \frac{2\pi \cdot f_\Delta}{\omega_m} = \frac{f_\Delta}{f_m} \quad \dots 2-8$$

$$x_c(t) = A_c \cdot \text{Cos} \left[\omega_c \cdot t + m_p \cdot \text{Sen}(\omega_m t) \right] \quad \dots 2-9$$

Si se expande la ecuación 2-9 usando Fourier se obtiene la ecuación 2-10:

$$x_c(t) = A_c \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(m_p) \cdot \text{Cos}(\omega_c + n \cdot \omega_m) \cdot t \quad \dots \text{2-10}$$

Donde $J_n(m_p)$ son expresiones matemáticas conocidas como Funciones de Bessel y cuyo desarrollo se presenta en la Figura 2-12

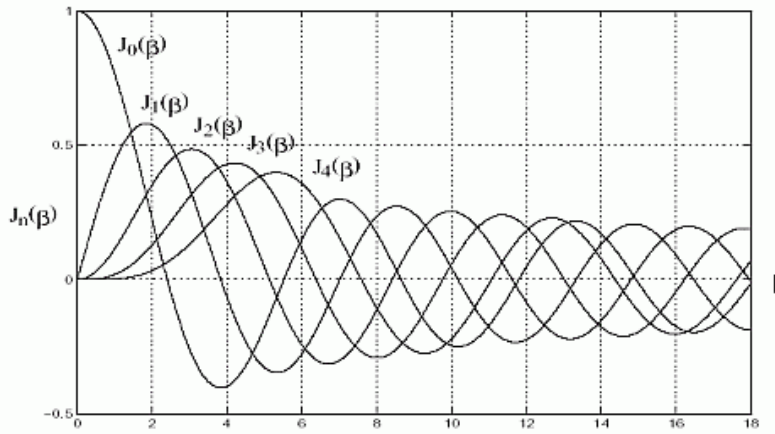


Figura 2-12 Desarrollo de las curvas de Bessel

Las funciones de Bessel determinan la amplitud de la portadora y sus bandas laterales. La portadora J_0 varía de uno a cero según aumenta el índice de modulación. Esto hace que también aumenten las bandas laterales a partir de cero siguiendo la secuencia J_1, J_2, J_3 , etc. Normalmente se ignoran las bandas laterales de amplitud menor que 1% de la señal portadora.

Tabla 2-2 Bandas Laterales significativas con respecto al Índice de Modulación

<i>Índice de Modulación</i>	<i>Bandas Laterales Significativas</i>	<i>Ancho de Banda como Múltiplo de f_m</i>
0.1	2	2
0.3	4	4
0.5	4	4
1.0	6	6
2.0	8	8
5.0	16	16
10.0	28	28
20.0	50	50
30.0	70	70

Se debe observar que con respecto al ancho de banda de la señal modulante, para índices de modulación pequeños, el ancho de banda es aproximadamente dos a cuatro veces. En cambio, para índices de modulación elevados el ancho de banda es mucho mayor.

Dependiendo del índice de modulación m_p , existen dos casos:

- FM Banda Angosta: Cuando $m_p \ll 1$ rad. Se utilizan aproximaciones de identidades trigonométricas y series de Taylor.
- FM Banda Ancha: Cuando $m_p \gg 1$ rad. Se utilizan aproximaciones de funciones de Bessel de primer orden.

Un ejemplo de FM banda ancha es la radiodifusión comercial, en donde se transmite con un ancho de banda de 150 KHZ para un ancho de banda de la señal de audio limitado a 15 KHZ, es decir un índice de modulación $m_p=10$.

Resumiendo:

Tabla 2-3 Ventajas y desventajas de FM

<i>MODULACIÓN</i>	<i>VENTAJAS</i>	<i>DESVENTAJAS</i>
FM	Excelente calidad de audio, debido al mayor ancho de banda utilizado.	Requiere mayor ancho de banda que AM y SSB
	Inmunidad a interferencias externas de ruido eléctrico, estático o atmosférico	Moduladores y receptores de construcción compleja
	Se obtienen señales con buena relación señal a ruido.	
	APLICACIONES: Radiodifusión comercial, comunicaciones móviles, comunicaciones satelitales, radioaficionados, comunicación digital, televisión, etc.	

2.3 Esquemas de modulación digital

El único esquema de modulación digital que se utilizó durante las comunicaciones vía Electrochorro Ecuatorial fue un modo digital utilizado por los radioaficionados y que es conocido como PSK-31:

2.3.1 PSK-31

PSK-31 es un modo de comunicación digital creado por radioaficionados y diseñado para realizar comunicaciones radiales punto a punto, “teclado a teclado”, en forma similar al Radio Teletipo (RTTY)

Este modo utiliza como módem a la tarjeta de sonido de una computadora para convertir los mensajes que se escriben en el teclado en señales de audio moduladas; asimismo, convierte las señales de audio recibidas en mensajes que son mostrados en la pantalla. Para ello utiliza un programa de computadora dedicado a la modulación–demodulación de la comunicación y al control de la interfase gráfica con el usuario. Existen muchos programas, la mayoría de ellos de distribución gratuita, diseñados para operar PSK-31; estos hacen uso del Procesamiento Digital de Señales (DSP) para mejorar el desempeño y el análisis de las comunicaciones.

La computadora necesita ser conectada a un radio transceptor a través de una interfase de aislamiento que evita dañar la tarjeta de sonido y que sirve también para controlar, a través del puerto serial o el paralelo, al interruptor de transmisión/recepción de la radio. Más detalles acerca de esta interfase se pueden ver en el capítulo 4.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) ha designado al modo PSK-31 con el indicativo: 60H0J2B. Transmite a una velocidad de 31.25 baudios (aproximadamente 50 palabras por minuto) y ocupa un ancho de banda de 60Hz a –26dB, por lo cual es bastante resistente al ruido (Figura 3-13). Utiliza modulación BPSK sin corrección de errores o también modulación QPSK con corrección de errores, que implica codificación convolucional y decodificación Viterbi. Antes de ser transmitido recibe filtraje cosenoidal para eliminar los armónicos propios de la modulación PSK. Durante una transmisión en PSK-31, la trama se inicia con una señal de preámbulo y finaliza con una de prólogo, de manera que el receptor conoce en que momento se empieza o termina una trama. El modo hace uso de caracteres de código variable o Varicode, los cuales son una combinación de bits de longitud variable, en donde los caracteres más utilizados son los de menor longitud. Con esto se obtiene una velocidad de transmisión promedio más rápida.

Debido a su alta resistencia al ruido, producto de su ancho de banda estrecho, la potencia de transmisión es muy baja, siendo ideal para comunicaciones rurales en donde los transmisores son operados con baterías.

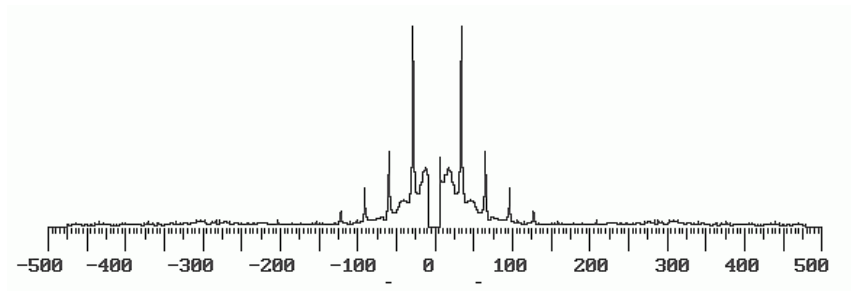


Figura 2-13 Espectro de una señal PSK-31

3 DISEÑO DEL ENLACE JICAMARCA-PARACAS

3.1 Cálculo de la Geometría del Enlace

3.1.1 Cálculo del Locus de Perpendicularidad

Como se mencionó en el apartado 1.4.3, para calcular el Locus de Perpendicularidad entre dos estaciones es necesario conocer las características del campo magnético y las coordenadas geográficas de ambas estaciones.

Las coordenadas geográficas de las estaciones ubicadas en Jicamarca y Paracas se obtuvieron utilizando un receptor de satélites GPS y se muestran en la Tabla 3-1,

Tabla 3-1 Coordenadas geográficas de las dos estaciones

PARÁMETRO	JICAMARCA	PARACAS
LATITUD	11.950° S	13.852° S
LONGITUD	76.867° O	76.249° O
ALTITUD	524 m.s.n.m.	12 m.s.n.m.

El cálculo del Locus de Perpendicularidad se hizo mediante un programa que fue desarrollado en el Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ) utilizando el paquete de

programación *Interactive Data Language* (IDL). Este programa calcula la posición del lugar geométrico de aquellos puntos sobre el EEJ que cumplen con la condición de dispersión de Bragg para comunicar dos estaciones predeterminadas. Obtiene las características del campo geomagnético del modelo IGRF: Campo Geomagnético Internacional de Referencia y entrega como resultado una gráfica con la ubicación de las estaciones, el Ecuador Magnético y el Locus de Perpendicularidad

La Figura 3-1 muestra la gráfica del enlace Jicamarca–Paracas. La línea irregular representa el litoral de la costa central del Perú.

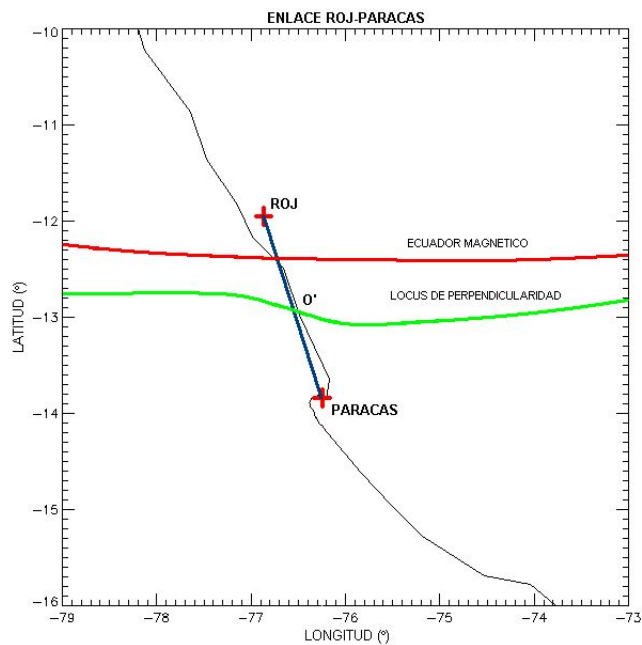


Figura 3-1 Locus de Perpendicularidad del Enlace ROJ – Paracas

3.1.2 Cálculo de la geometría Azimutal y de Elevación de las Antenas.

La Figura 3-2 muestra los elementos que intervienen en el cálculo de la distancia entre dos estaciones sobre la superficie de la Tierra: La ubicación de los lugares, el radio terrestre (R), el ángulo formado entre las dos estaciones y el centro de La Tierra (α), la distancia real entre ambas estaciones (d) y la distancia entre ellas sin considerar la curvatura de la tierra (d').

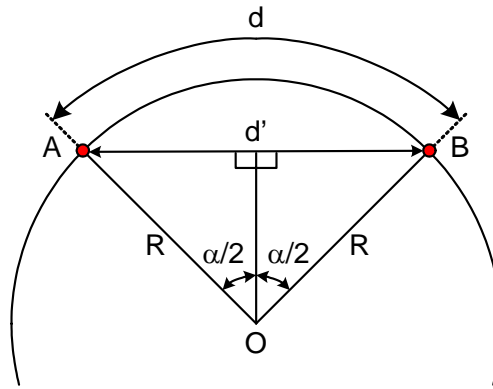


Figura 3-2 Cálculo de la distancia entre dos estaciones

De la Figura 3-2 se deducen las siguientes ecuaciones:

$$\frac{d}{\text{Perimetro}} \equiv \frac{\alpha}{360^\circ} \quad \dots 3-1$$

$$\frac{d}{2\pi R} \equiv \frac{\alpha}{2\pi} \quad \dots 3-2$$

Despejando de 3.1 y 3.2:

$$d = R * \alpha \quad \dots 3-3$$

Por otra parte, en el triángulo formado entre la bisectriz de α y la distancia d' se calcula la siguiente expresión:

$$\text{Sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{\left(\frac{d'}{2}\right)}{R} \quad \dots 3-4$$

Despejando d' :

$$d' = 2 * R * \text{Sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad \dots 3-5$$

Para no considerar la curvatura de la Tierra en los cálculos de distancias, se busca que $d \cong d'$. Entonces, de las ecuaciones 3.3 y 3.5 se despeja:

$$R * \alpha \cong 2 * R * \text{Sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad \dots 3-6$$

Reordenando términos se tiene:

$$\text{Sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cong \left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad \dots 3-7$$

Para que el error de la ecuación 3-7 sea menor que 0.1%, se debe de cumplir:

$$\varepsilon < 0.1\% \Leftrightarrow \left(\frac{\alpha}{2}\right) < 5^{\circ} \quad \dots \text{3-8}$$

Por lo tanto, α deberá ser menor a 10° para que el error sea menor al 1%:

$$\varepsilon < 0.1\% \Leftrightarrow \alpha < 10^{\circ} \quad \dots \text{3-9}$$

Como la diferencia en ángulos entre las coordenadas de Jicamarca y Paracas es inferior a 2° se pueden aproximar todos los cálculos a un terreno plano, es decir, **sin considerar la curvatura de la Tierra.**

El radio y perímetro aproximado de la Tierra son respectivamente:

$$R = 6372 \text{ Km} \quad \dots \text{3-10}$$

$$\phi = 2 * \pi * R = 40036 \text{ Km} \quad \dots \text{3-11}$$

Así, un grado terrestre es aproximadamente equivalente a:

$$1^{\circ} \cong 111.2 \text{ Km} \quad \dots \text{3-12}$$

La diferencia en grados de latitud y longitud entre el ROJ y Paracas es respectivamente:

$$1.902^{\circ} \cong 211.52 \text{ Km} \quad \dots \text{3-13}$$

$$0.618^{\circ} \cong 68.73 \text{ Km} \quad \dots \text{3-14}$$

Por lo tanto, la distancia entre el ROJ y Paracas es aproximadamente:

$$d \cong d' = \sqrt{211.52^2 + 68.73^2} = 222.41 \text{ Km} \quad \dots \text{3-15}$$

Para definir la geometría de un enlace radial hay que determinar los ángulos de elevación y azimut de las antenas en cada una de las estaciones:

De las ecuaciones 3-13 y 3-14 se calcula que **el Ángulo de Azimut** es S 18° E en Jicamarca y N 18° O en Paracas. (Ver Figura 3.3)

$$\angle \text{Azimut} = A \tan\left(\frac{0.618}{1.902}\right) = 18^{\circ} \quad \dots \text{3-16}$$

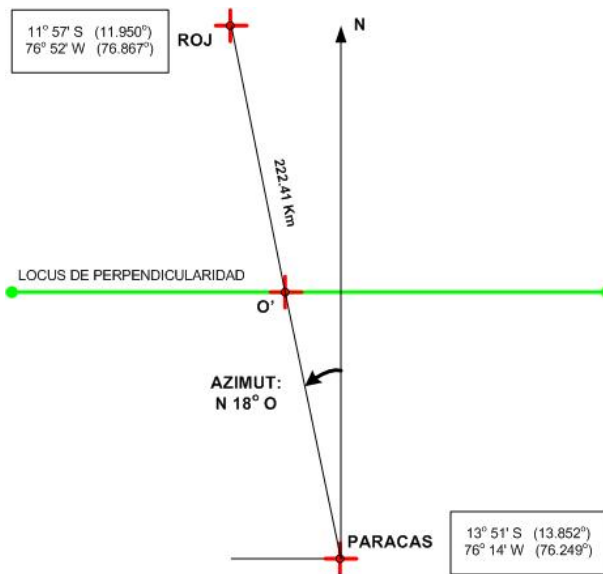


Figura 3-3 Plano azimutal del enlace ROJ-Paracas

Como la distancia entre el ROJ y Paracas es 222.41 Km, la altura promedio del Electrochorro Ecuatorial es 100Km y el locus de perpendicularidad está ubicado aproximadamente en el centro de la línea que une ambas estaciones. Entonces, el **Ángulo de Elevación** de las antenas en ambas estaciones es igual a 41.96° (Figura 3.4):

$$\angle \text{Elevación} = \arctan\left(\frac{100}{222.41/2}\right) = 41.96^\circ \quad \dots 3-17$$

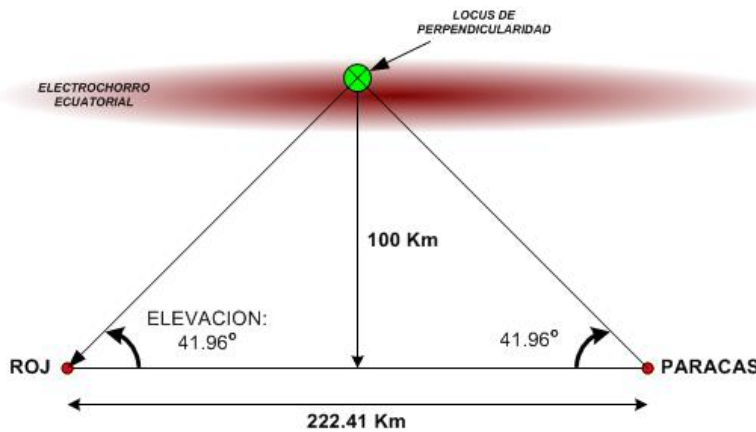


Figura 3-4 Plano de elevación del enlace ROJ-Paracas

3.2 Configuración del Hardware de las estaciones de radio

3.2.1 Introducción

La configuración del sistema de comunicaciones utilizado en cada estación se muestra en la Figura 3-5. Como se puede observar, cada una de ellas lleva los siguientes componentes:

- Antenas
- Radio transceptor
- Fuente de alimentación
- Líneas de transmisión
- Interfase entre la computadora y el radio transceptor
- Medidor de potencia / ROE
- Computadora
- Sistema de sincronismo: Receptor GPS o Internet.

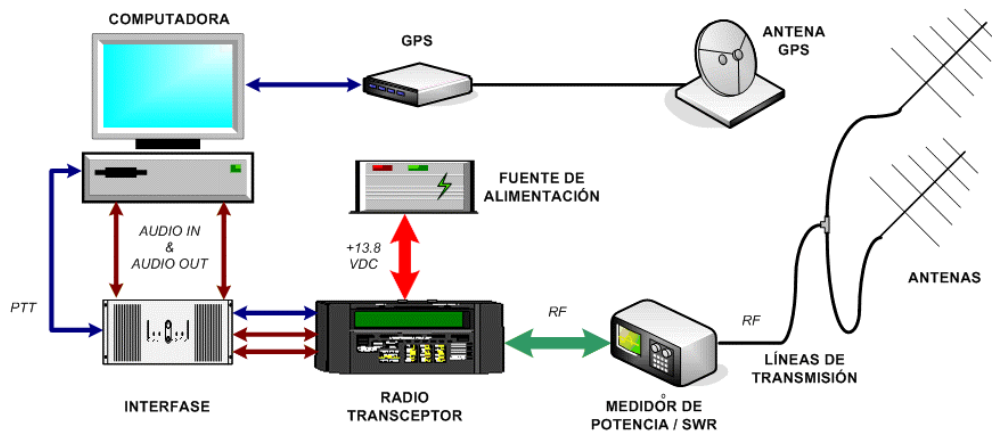


Figura 3-5 Configuración de los componentes de una estación de comunicaciones

3.2.2 Descripción de las Antenas

Las antenas son los transductores que convierten las señales eléctricas provenientes del radio transceptor en ondas electromagnéticas. También realizan el proceso inverso: las ondas electromagnéticas recibidas del espacio son convertidas en señales eléctricas que son enviadas al transceptor a través de las líneas de transmisión.

En el enlace de comunicaciones se utilizó el arreglo de antenas del Radar Biestático JICAMARCA–PARACAS que el Instituto Geofísico del Perú tiene en estas estaciones y que es utilizado para obtener perfiles de densidad de electrones en la Región E. Sus principales características se muestran en la Tabla 3-2. Observar que la frecuencia de trabajo de las antenas es $f= 49.920$ MHz.

Tabla 3-2 Especificaciones de las antenas del enlace Jicamarca – Paracas

<i>PARÁMETRO</i>	<i>ANTENAS EN JICAMARCA Y PARACAS</i>
TIPO	YAGI DE 4 ELEMENTOS. POLARIZACIÓN CRUZADA - DIPOLO DOBLADO (<i>CROSS POLARIZATION - FOLDED DIPOLE</i>)
CANTIDAD	16 ANTENAS EN ARREGLO TRANSVERSAL A LA LÍNEA QUE UNE AMBAS ESTACIONES
IMPEDANCIA	50 Ω POR ANTENA INDIVIDUAL Y POR ARREGLO
FRECUENCIA DE OPERACIÓN	49.920 MHz
ANCHO DE BANDA	7.4 MHz @ ROE < 2.0 (44.85 MHz – 52.25 MHz)
GANANCIA	18 dBi

La respuesta en frecuencia y el ancho de banda del arreglo de antenas en el ROJ se muestra en la Figura 3-6; el criterio para calcular el ancho de banda fue considerar los valores de ROE inferiores a 2.0.

RADAR BIESTATICO - ARREGLO DE ANTENAS ROJ

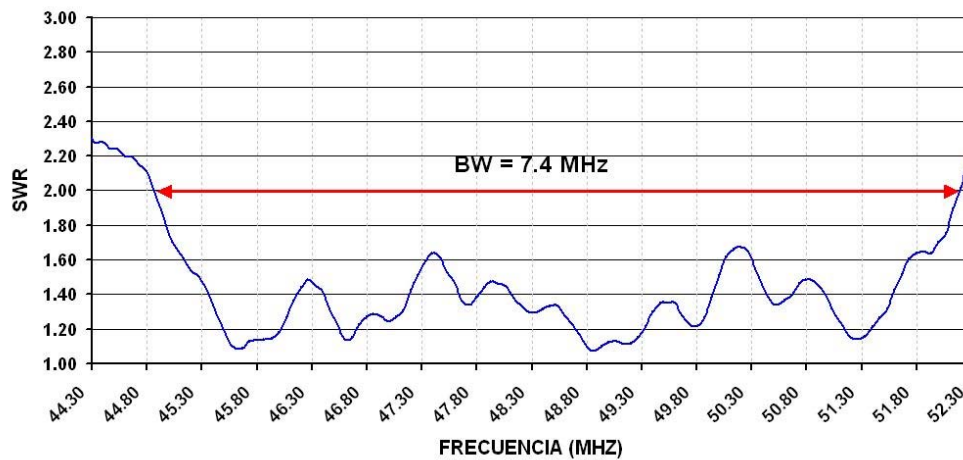


Figura 3-6 Respuesta en frecuencia y ancho de banda del arreglo de antenas en el ROJ

El arreglo de antenas en su conjunto debe tener la misma impedancia que las líneas de transmisión y que el radio transceptor, de lo contrario ocurriría un desbalance de impedancias y la transmisión ineficiente de potencia podría dañar los equipos. El acoplamiento y balance de las 16 antenas se realizó mediante transformaciones de impedancia de longitud $\lambda/4$, tema que será desarrollado en el apartado 3.2.5 referido a las Líneas de Transmisión.

En las Figura 3-7 y Figura 3-8 se muestran los arreglos de antenas en las estaciones de Paracas y Jicamarca respectivamente:



Figura 3-7 Arreglo de antenas tipo Yagi en Paracas



Figura 3-8 Arreglo de antenas tipo Yagi en el Radio Observatorio de Jicamarca

3.2.3 Radio Transceptores

Los radio transceptores cumplen dos funciones básicas en el enlace de comunicaciones: 1) Convierten la información de audio en señal eléctrica a transmitir mediante procesos de modulación y amplificación, y 2) Convierten la señal eléctrica recibida en información audible mediante procesos de demodulación y amplificación.

Se han seleccionados radio transceptores que han sido diseñados para el uso de radioaficionados debido a que permiten controlar la potencia de transmisión, transmitir y recibir en diversos rangos de frecuencias y operar con diferentes tipos de modulación: AM, FM, SSB, CW, *Packet Radio*, etc. Sus especificaciones se muestran en la Tabla 3-3. y en la Figura 3-9 se aprecia una fotografía de ambos equipos.

Tabla 3-3 Características de los Radio Transceptores utilizados

<i>PARÁMETRO</i>	<i>JICAMARCA</i>	<i>PARACAS</i>
MARCA	YAESU	YAESU
MODELO	FT-847	FT-897
POTENCIA MÁXIMA	100W	100W
BANDAS	HF, 6M, 2M, 70CM – Conectores para 4 antenas	HF, 6M, 2M, 70CM - Conectores para 2 antenas
MODOS	AM, FM, SSB, CW, <i>PACKET RADIO</i> a 1200 Y 9600 BPS, AFSK	AM, FM, SSB, CW, <i>PACKET RADIO</i> a 1200 Y 9600 BPS, AFSK
SENSIBILIDAD EN FM	-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
OTROS	Diseñado para trabajar con satélites radioaficionados, DSP incorporado	DSP incorporado



Figura 3-9 Radio Transceptores YAESU FT-897 y FT-847

3.2.4 Fuentes de Alimentación

Los radio transeptores utilizados están diseñados para funcionar con tensión continua nominal de 13.8VDC, que puede ser proporcionado por baterías de automóvil o fuentes de alimentación diseñadas para este fin.

En el enlace de comunicaciones se utilizaron dos fuentes de alimentación de uso comercial con las siguientes especificaciones:

Tabla 3-4 Especificaciones de las Fuentes de Alimentación

<i>PARÁMETRO</i>	<i>JICAMARCA</i>	<i>PARACAS</i>
MARCA	ASTRON	ALINCO
MODELO	RS-20A	DM-330MVT
TIPO	LINEAL	CONMUTADA (SWITCHING)
CORRIENTE MÁXIMA	25 A @ 13.8VDC	30 A @ 13.8VDC

3.2.5 Líneas de Transmisión

Se utilizan para interconectar los radio transeptores con las antenas. Además, permiten adaptar las impedancias del arreglo de antenas haciendo uso de los transformadores de impedancia.

La teoría de líneas de transmisión (Swartz, 2002) nos dice que un transformador de impedancias de longitud $\lambda/4$ (Figura 3-10) cumple la siguiente ecuación:

$$Z_o = \frac{Z_c^2}{Z_i} \quad \dots 3-18$$

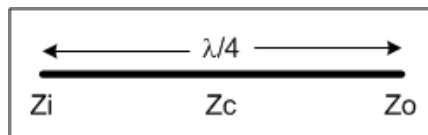


Figura 3-10 Transformador de impedancias

Donde la impedancia de entrada Z_i puede ser transformada en la impedancia de salida Z_o usando un cable de impedancia Z_c de longitud $\lambda/4$. Observar que si se utilizan dos tramos de longitud $\lambda/4$, es decir una longitud $\lambda/2$, se obtiene en la salida la misma impedancia de la entrada, sin importar la impedancia de la línea de transmisión utilizada.

En el enlace de comunicaciones se utilizaron diferentes tipos de cable coaxial, tanto para interconectar las antenas con los transceptores como para realizar el balance de impedancias. En la Tabla 3-5 se muestran las especificaciones de los cables utilizados.

Tabla 3-5 Especificaciones de las líneas de transmisión utilizadas

<i>Tipo de cable</i>	<i>Impedancia (Ω)</i>	<i>Atenuación en 50 MHz (dB/100m)</i>	<i>Factor de velocidad (%)</i>	<i>Capacitancia (pf/m)</i>
RG-8	52	2.95	66	96.8
RG-11	75	2.95	66	67.3
RG-17	52	1.64	66	96.8
RG-58	50	10.82	66	93.5
LÍNEA 3"	50	< 0.3	100	50.9

Para el enlace propuesto, la frecuencia de trabajo seleccionada es 49.92 MHz, que tiene una longitud de onda igual a $\lambda = 6.009\text{m} \approx 6\text{m}$. Por lo tanto, si la velocidad de propagación fuera 66%, entonces un transformador $\lambda/4$ mediría 1m; y si la velocidad de propagación fuera 100%, el transformador mediría 1.5m. Las impedancias y longitudes de los transformadores de impedancia utilizados se muestran en la Tabla 3-1:

Tabla 3-6 Transformadores de impedancia utilizados

<i>Z_i (Ω)</i>	<i>Z_c (Ω)</i>	<i>Z_o (Ω)</i>	<i>LONGITUD</i>
25	50	100	$\lambda/4$
100	75	≈ 50	$\lambda/4$
25	50	25	$\lambda/2$

En la Figura 3-11 y la Figura 3-12 se muestran los esquemas de conexión y las longitudes de los cables utilizados en ambas estaciones. A no ser que se indique lo contrario, los cables de 50Ω son del tipo RG/8 y los de 75Ω son del tipo RG-11.

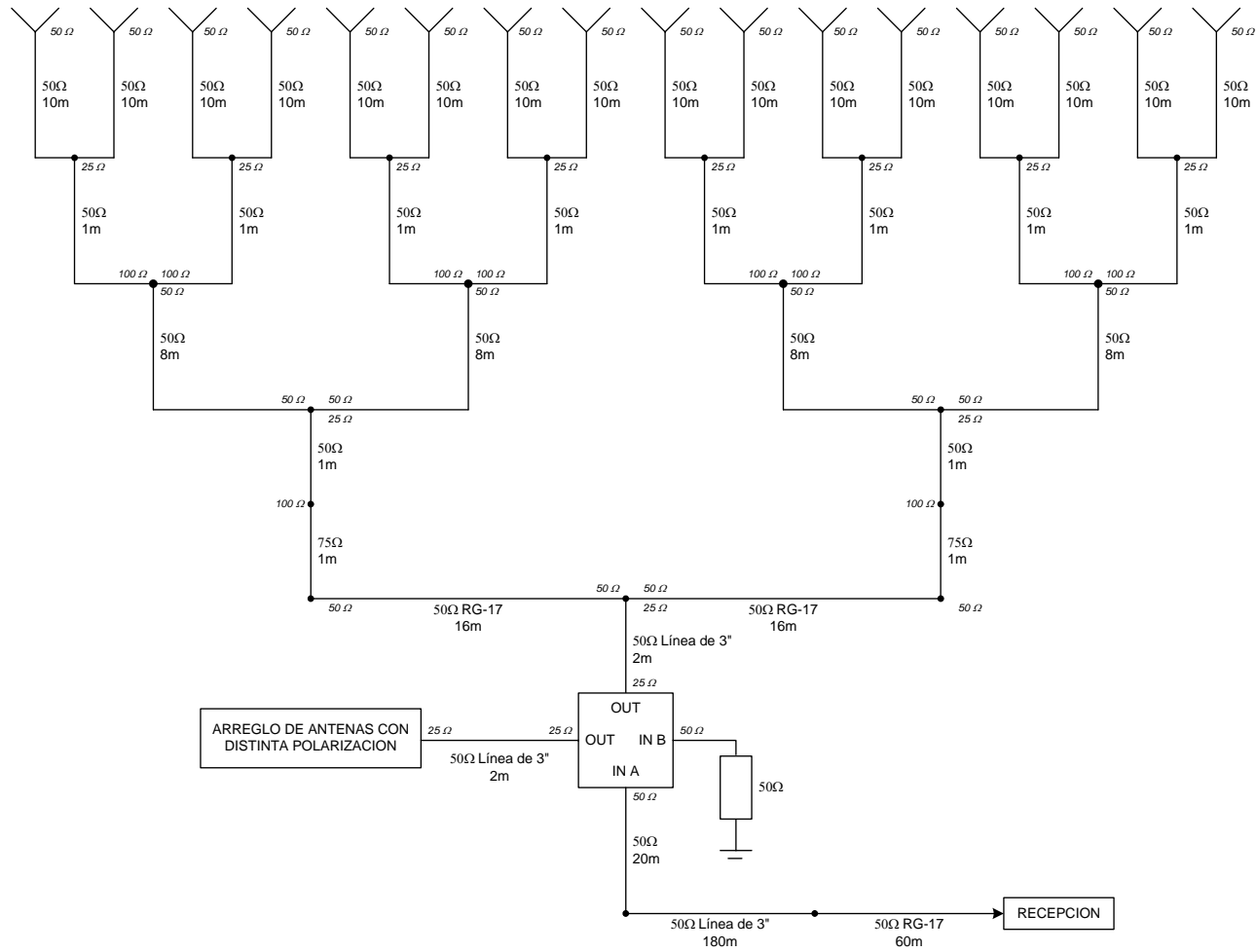


Figura 3-11 Arreglo de antenas y red de adaptación de impedancias en el ROJ

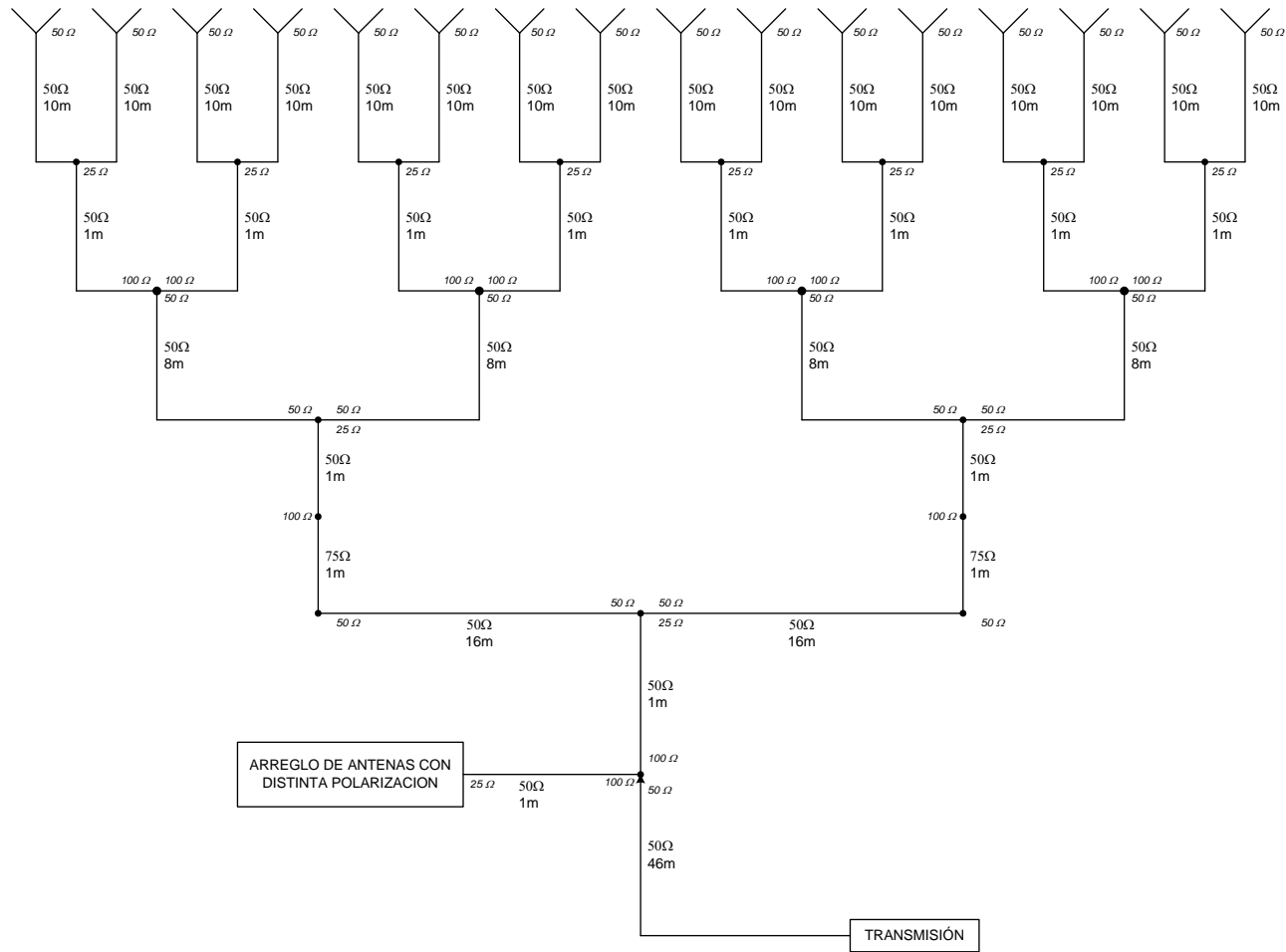


Figura 3-12 Arreglo de antenas y red de adaptación de impedancias en Paracas

3.2.6 Medidor de Potencia y ROE

Este instrumento se utiliza para medir la potencia que está siendo transmitida. También se utiliza para medir la Relación de Ondas Estacionarias (ROE), este parámetro permite verificar que las antenas presenten la impedancia requerida (50Ω) y no exista un desbalance de impedancias.

El instrumento que se utilizó durante las pruebas se muestra en la Figura 3-13 y sus especificaciones se muestran en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7 Especificaciones del instrumento utilizado

<i>VATÍMETRO / MEDIDOR DE ROE</i>	
MARCA	YAESU
MODELO	YS-60
RANGO DE FRECUENCIAS	1.6 – 60 MHZ
RANGO DE POTENCIAS	3-2000 W
RANGO DE ROE	1.0 - INFINITO
PRECISIÓN	$\pm 10\%$
IMPEDANCIA	50Ω
ALIMENTACIÓN	13.8 VDC @ 200 mA



Figura 3-13 Vatímetro / Medidor de ROE YAESU YS-60

3.2.7 Interfase entre el Radio Transceptor y la Computadora.

Para interconectar un radio transceptor con una computadora, se necesita una interfase que realice las siguientes interconexiones:

- La salida de audio en el radio transceptor (SPK o AUDIO OUT) con un canal de entrada en la tarjeta de sonido (MIC o LINE IN)

- La entrada de audio del radio transceptor (MIC o AUDIO IN) con una salida de la tarjeta de sonido (SPK o LINE OUT)
- El interruptor de TX / RX del radio transceptor (*PTT: Push To Talk*) con un Puerto de la computadora (Serial o Paralelo).

La Figura 3-14 muestra el diagrama electrónico de la interfase comercial RASCAL–BUXCOMM que fue utilizada en el enlace de comunicaciones:

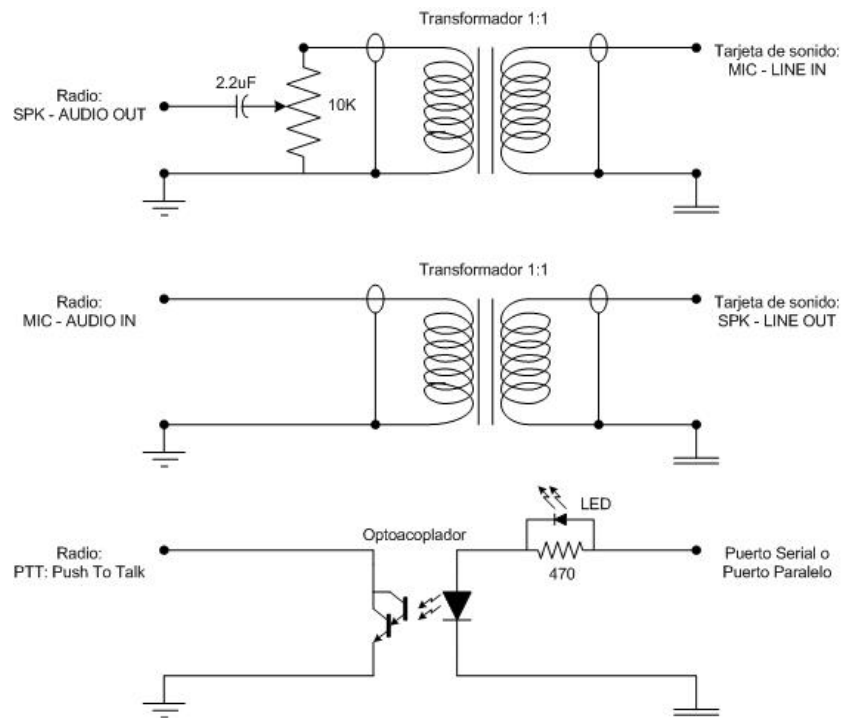


Figura 3-14 Interfase Rascal–Buxcomm entre la computadora y el transceptor

3.2.8 Computadora

En el enlace de comunicaciones vía EEJ se utilizó una computadora para realizar las siguientes tareas:

- Ordenar al transceptor en que momento se va a iniciar una transmisión.
- Ordenar al transceptor en que momento se va a detener una transmisión.
- Reproducir los archivos de audio que se van a transmitir.
- Grabar y almacenar las comunicaciones recibidas.
- Generar los registros de tiempo y duración de las comunicaciones.
- Sincronizarse con el receptor GPS o con un servidor en la Internet.

Para el enlace se requiere en cada estación una computadora con las siguientes características: Pentium II o superior, tarjeta de sonido Sound Blaster o compatible, capacidad de disco duro superior a 2 GB, puerto serial y paralelo disponibles.

En la Figura 3-15, se observa la computadora portátil utilizada en la estación de Paracas; así como el transceptor, la fuente de alimentación, la interfase y el vatímetro.



Figura 3-15 Equipos de radio y registro de datos utilizados en Paracas

3.2.9 Sistema de Sincronización

Para garantizar la correcta interpretación de los resultados, y su comparación posterior con datos obtenidos de otras fuentes como magnetómetros o radares, se necesita que las computadoras en ambas estaciones tengan la misma hora, es decir que estén sincronizadas. Para ello se busca que ambas computadoras estén sincronizadas con la Hora Coordinada Universal (UTC: *Coordinated Universal Time*).

En el enlace de comunicaciones se utilizaron dos formas de sincronización:

- En el ROJ el sincronismo se obtuvo mediante un programa que se conecta a un servidor de tiempo de la Internet y que actualizaba el reloj de la PC periódicamente.
- En Paracas el sincronismo se obtuvo del receptor GPS Motorola Oncore M12+, el cual se conecta a la computadora a través del puerto serial y sincroniza la hora de la PC con la hora UTC proporcionada por los satélites GPS.

3.3 Configuración del Software

3.3.1 Software de Transmisión

Para determinar como varía la calidad de las comunicaciones vía EEJ durante el día, es necesario probar el enlace de comunicaciones permanentemente. Al ser ésta una tarea rutinaria, la mejor opción es hacerlo mediante un programa de computadora que se encargue de reproducir periódica y automáticamente un archivo de sonido que será enviado al radio transceptor , a través de una interfase apropiada, para ser transmitido.

Con este objetivo se desarrolló un programa en lenguaje C, de Microsoft Visual NET, denominado “**ROJ BEACON**”. Este programa reproduce periódicamente un archivo de sonido a intervalos de tiempo de 1 minuto. El tiempo es proporcionado por el reloj interno de la computadora y es posible configurar a los cuantos segundos iniciar una transmisión. La conmutación entre la transmisión y la recepción se hace a través de la línea PTT del radio transceptor (PTT: *Push To Talk*), el cual es controlado por la línea RTS del puerto serial de la computadora.

En la Figura 3-16 se muestra el diagrama de flujo del programa ROJ BEACON:

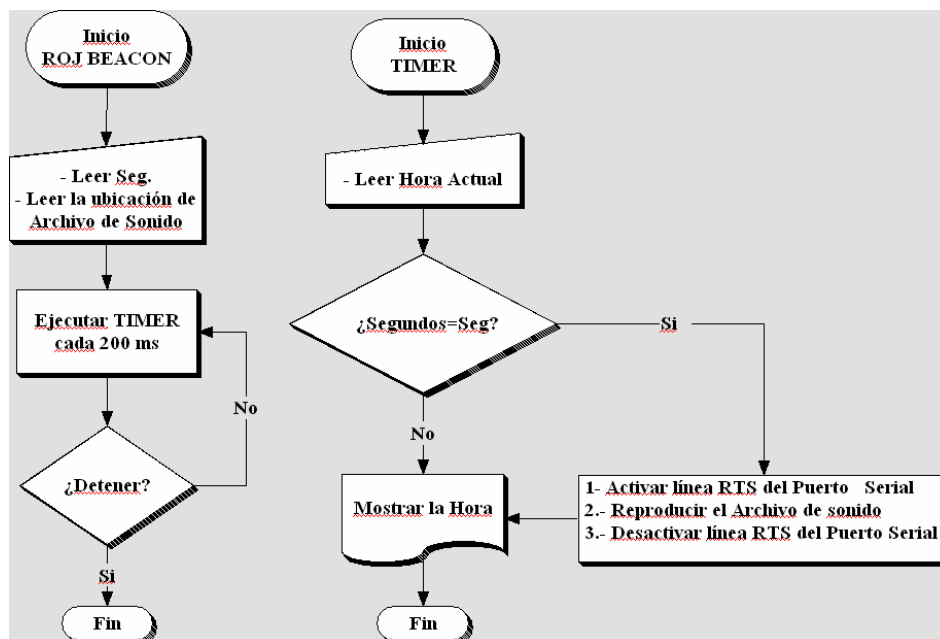


Figura 3-16 Diagrama de flujo del programa ROJ BEACON

Con el uso de este programa, la operación de transmisión periódica de un sonido se ha automatizado, evitando así que el operador de radio este operando la radio permanentemente. En la Figura 3-17 se muestra el panel de control del programa de transmisión “ROJ BEACON”.



Figura 3-17 Panel de control del programa de transmisión automática ROJ BEACON

3.3.2 Software de Adquisición de Datos

Para grabar y llevar el registro de las comunicaciones recibidas se utilizó un programa comercial utilizado por los radioaficionados llamado “**SCANNER RECORDER**”.

Este es un programa que graba automáticamente los comunicados radiales, procedentes del radio transceptor y que llegan a través del micrófono de la tarjeta de sonido de la computadora, y que superan un determinado umbral de amplitud. El programa guarda estos comunicados en archivos de audio en formato WAV y crea un archivo de texto con la información de la hora en que ocurrió cada comunicado, así como su duración y posición relativa en el archivo de audio generado.

En la Figura 3-18 se muestra el panel de control del programa “SCANNER RECORDER”.

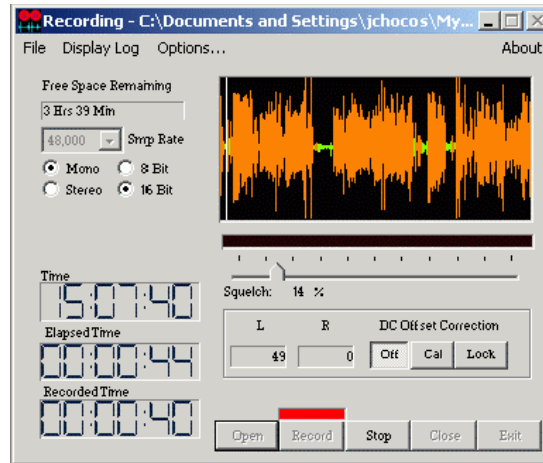


Figura 3-18 Programa de recepción “SCANNER RECORDER”

En la Figura 3-19 se muestra un extracto de un archivo de registro de comunicaciones.

Date	Time	Duration	Relative Time
2005/03/05,	11:07:06,	000001.3,	00:00:00
2005/03/05,	11:07:08,	000001.3,	00:00:01
2005/03/05,	11:07:11,	000017.7,	00:00:02
2005/03/05,	11:07:30,	000002.5,	00:00:20
2005/03/05,	11:08:03,	000001.3,	00:00:22
2005/03/05,	11:08:09,	000001.3,	00:00:24
2005/03/05,	11:08:11,	000017.4,	00:00:25
2005/03/05,	11:09:04,	000001.3,	00:00:43
2005/03/05,	11:09:05,	000001.3,	00:00:44
2005/03/05,	11:09:11,	000017.8,	00:00:45
2005/03/05,	11:09:29,	000001.3,	00:01:03
2005/03/05,	11:10:05,	000001.3,	00:01:04
2005/03/05,	11:10:09,	000001.3,	00:01:06
2005/03/05,	11:10:11,	000004.5,	00:01:07
2005/03/05,	11:10:17,	000012.5,	00:01:12
2005/03/05,	11:10:30,	000001.3,	00:01:24

Figura 3-19 Ejemplo del contenido de un archivo de registro de comunicaciones

3.3.3 Software de Sincronización

El sincronismo entre las estaciones de transmisión y recepción es importante porque permite determinar en qué instante han ocurrido las comunicaciones. Las computadoras en ambas estaciones deben estar sincronizadas, pues son las encargadas de transmitir y registrar los comunicados. Para sincronizarlas con la hora UTC se utilizaron dos programas:

- DIMENSION 4. Permite sincronizar la computadora con un servidor de tiempo en la Internet o en la red local, para lo cual es necesario conocer el número IP o el URL de dicho servidor.
- TAC-32. Permite sincronizar la computadora con la referencia de tiempo entregado por un receptor GPS (Sistema de Posicionamiento Global). Es conocido que los satélites de dicho sistema llevan a bordo un reloj de precisión atómica sincronizado con la hora UTC.

3.3.4 Software de Análisis de Datos

Los datos que se obtienen durante las comunicaciones automáticas vía el EEJ son de tres tipos:

- i. **Archivos de audio.** Son generados por el programa de adquisición SCANNER RECORDER y están en formato WAV. (Figura 3-18)
- ii. **Registros de tiempo y duración de los comunicados.** Son generados también por el programa de adquisición y están en formato texto. (Figura 3-19)
- iii. **Archivos con valores del $\Delta H_{\text{ROJ-Piura}}$.** Son tomados de la base de datos de los magnetómetros del ROJ y están en formato texto.

Estos datos son procesados y analizados utilizando los siguientes programas:

COOL EDIT 2000: es un laboratorio de audio que permite escuchar y editar archivos de audio, generar silencios y tonos, realizar filtraje y análisis espectral, amplificar y atenuar la señal entre otras múltiples funciones.

Este programa se utilizó para grabar y editar los archivos de audio a ser transmitidos, reproducir los comunicados recibidos así como observarlos y analizarlos en el dominio del tiempo y la frecuencia.

En la Figura 3-20 y la Figura 3-21 se muestran los análisis que este programa realiza en ambos dominios:



Figura 3-20 COOL EDIT 2000: Análisis en el dominio del tiempo

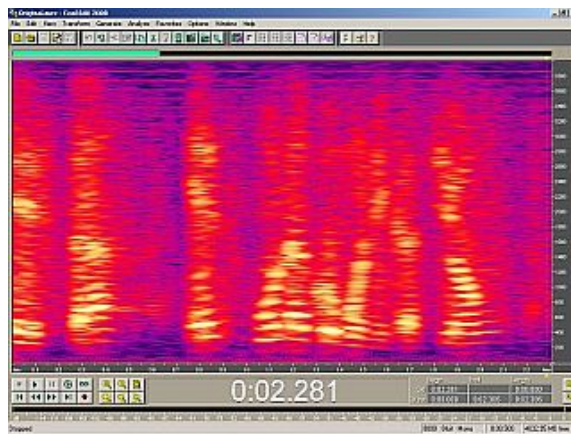


Figura 3-21 COOL EDIT 2000: Análisis en el dominio de la frecuencia

MATLAB: Es una poderosa herramienta informática, que se utiliza en simulaciones de sistemas y procesamiento de datos.

Este paquete se utilizó en las siguientes tareas:

- a. Unificar los tres tipos de datos obtenidos durante los comunicados (Archivos de audio, hora y fecha de los comunicados y valores de $\Delta H_{ROJ-PIURA}$) en un solo tipo de dato con un formato estándar más sencillo de procesar.
- b. Cálculo de los Coeficientes de Correlación: Los comunicados recibidos por comunicaciones vía el Electrochorro Ecuatorial se correlacionan con un comunicado recibido por comunicaciones en condiciones de línea de vista. Así, se puede determinar como varía la calidad de las comunicaciones vía EEJ en el tiempo tomando como referencia a una comunicación en condiciones ideales.

- c. Graficar los resultados obtenidos. Curvas de variación de la calidad de las comunicaciones y del $\Delta H_{ROJ-PIURA}$ en el tiempo.
- d. Simulación de los efectos en la potencia recibida de la variación de los parámetros que intervienen en el enlace como por ejemplo: Potencia transmitida, ganancia de las antenas, distancia entre estaciones, etc. (Ver Figura 3-22)

La descripción de los programas en MATLAB utilizados al procesar las comunicaciones automáticas se hará al final de este capítulo.

3.4 Análisis de Ganancias y Atenuaciones

El presupuesto de ganancias y pérdidas del enlace radial vía el Electrochorro Ecuatorial entre Jicamarca y Paracas se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - PEL - P_{EEJ} - P_{CC} + G_{RX} \quad \dots 3-19$$

Donde:

- P_{TX} : Potencia de transmisión, donde la máxima potencia que entregan los radio transceptores es:

$$P_{TX} = 100W = +50 \text{ dBm.}$$

- G_{TX} y G_{RX} : Ganancia máxima de los arreglos de antenas utilizados.

$$G_{TX} = G_{RX} = +18 \text{ dB}$$

- PEL: Pérdidas en Espacio Libre, dependen de la longitud de onda (λ) utilizada y de la distancia recorrida por la señal transmitida. Se calculan a partir de la siguiente ecuación:

$$PEL = \left(\frac{4 * \pi * d}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4 * \pi * d * c}{f_{TX}} \right)^2 \quad \dots 3-20$$

- f_{TX} : Frecuencia de operación. $f_{TX} = 49.92 \text{ MHz}$

- c : Velocidad de la Luz. $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

- d : Distancia recorrida, ver Figura 3-4. $d = 305.6 \text{ Km}$

Resolviendo la ecuación 3-20:

$$PEL = -116.11 \text{ dB}$$

- P_{CC} : Pérdidas en líneas de transmisión y conexiones:

Como los arreglos de antenas utilizados en ambas estaciones guardan simetría, tanto en las longitudes como en las conexiones, las pérdidas en cables y conectores se calculan para una sola antena pues luego se le agrega la ganancia del arreglo total.

Basándonos en los datos de la Tabla 3-5 y en los diagramas mostrados en las Figura 3-11 y Figura 3-12, se tabuló la Tabla 3-8 en donde se muestran las longitudes de cada tipo de cable, los conectores e híbridos utilizados y las atenuaciones que introduce que cada uno de estos elementos.

Tabla 3-8 Atenuaciones en cables y conectores para una sola antena.

<i>Elemento</i>	<i>JICAMARCA</i>		<i>PARACAS</i>	
	<i>Longitud (m)</i>	<i>Atenuación (dB)</i>	<i>Longitud (m)</i>	<i>Atenuación (dB)</i>
RG-8	20	0.59	83	2.45
RG-11	1	0.03	1	0.03
RG-17	96	1.58	0	0
RG-58	4	0.43	4	0.43
LÍNEA 3"	182	0.55	0	0
Conectores	24 unidades	0.24	20 unidades	0.20
Híbridos	1 unidad	0.20	0 unidades	0
	TOTAL:	3.62	TOTAL:	3.11

Así, las pérdidas totales en las antenas, debido a atenuaciones en conectores y líneas de transmisión, suman en total:

$$P_{CC} = -6.73 \text{ dB}$$

- Resolviendo la ecuación 3-19 se obtiene la siguiente ecuación:

$$P_{RX} \text{ (dBm)} = -36.84 - P_{EEJ} \quad \dots 3-21$$

Donde P_{EEJ} es la atenuación de potencia que sufre la señal transmitida en el EEJ. También puede entenderse como la cantidad de energía que es dispersada por el EEJ.

- Según el fabricante, la sensibilidad de los receptores en FM para una relación señal a ruido (SNR) de 12 dB es:

$$S = -0.25 \text{ uV} = -119 \text{ dBm} @ \text{SNR}_{\text{FM}} = 12 \text{ dB}$$

Por lo tanto, para que las comunicaciones entre Jicamarca y Paracas, utilizando la máxima potencia de transmisión, se reciban con una SNR mayor a 12dB se debe de cumplir, de acuerdo a la ecuación 3-21, que la atenuación por dispersión en el EEJ sea menor que 82.16 dB:

$$P_{\text{RX_MIN}} = S = -119 \text{ dBm} < -36.84 \text{ dB} - P_{\text{EEJ}} \quad \dots 3-22$$

$$P_{\text{EEJ_MAX}} < +82.16 \text{ dB} \leftrightarrow \text{SNR} > 12 \text{ dB}$$

Por ejemplo, si se asume que la atenuación de la señal debido a la dispersión en el Electrochorro Ecuatorial es de 70dB (es decir, el EEJ sólo dispersara una diez millonésima parte de la energía recibida) y se transmite con una potencia de 40 W; entonces, la señal se recibiría con una relación señal a SNR = 20 dB para esa condición del Electrochorro Ecuatorial. En la Figura 3-22 se muestra una curva de la potencia recibida (en dBm) en función de la potencia transmitida (en vatios).

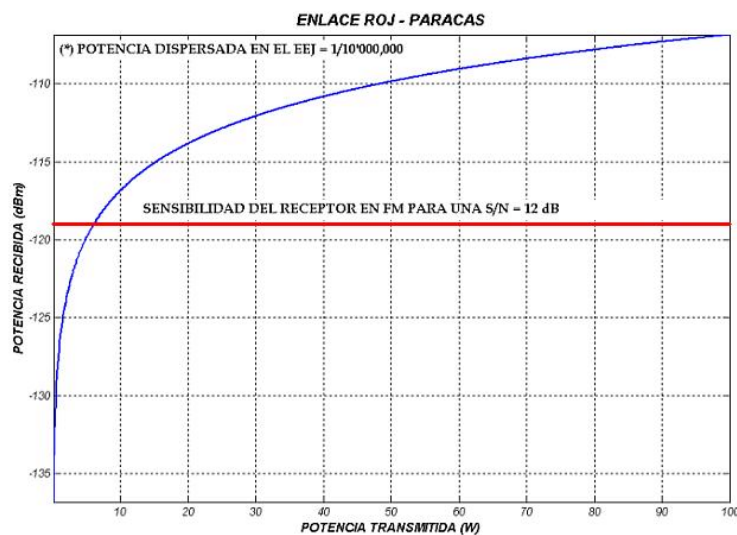


Figura 3-22 Potencia transmitida Versus Potencia recibida

3.5 Técnicas de Toma de datos y Evaluación de Resultados

Determinar la calidad o nivel de inteligibilidad de una comunicación es una tarea subjetiva pues dicho parámetro es difícil de cuantificar en términos absolutos. Si se pregunta a un grupo de personas acerca de la inteligibilidad de una comunicación recibida, se obtendrían diferentes opiniones pues ellas dependen de factores tales como el nivel de entrenamiento y sensibilidad del oyente, la calidad de los equipos reproductores de sonido, etc.

Tomando en cuenta lo anterior, se ha adoptado la siguiente solución para evaluar la “calidad” de las comunicaciones vía Electrochorro Ecuatorial: Asumiendo como patrón de referencia una comunicación realizada con propagación de línea de vista, se busca determinar cuán parecida es ésta a una comunicación recibida por dispersión en el Electrochorro Ecuatorial.

Para comparar ambas señales se utiliza la función matemática de Correlación Cruzada (*Cross Correlation*). Al resultado obtenido se le denominará **Índice de Correlación (I)**, donde:

$$I = \max[X_{LDV}(t) \otimes X_{EEJ}(t)] \quad \dots 3-23$$

X_{LDV} : Comunicación recibida en condiciones de Línea de Vista

X_{EEJ} : Comunicación recibida vía dispersión en el Electrochorro Ecuatorial

La función Correlación Cruzada es una función matemática que se utiliza para comparar dos señales diferentes. El resultado nos da información de qué tan parecida es una señal a la otra. El rango de valores de esta función varía entre cero (0) y uno (1) donde el significado de cada uno de estos límites es el siguiente:

I = 0: Indica que las dos comunicaciones no se parecen en nada

I = 1: Indica que las dos comunicaciones son idénticas.

Tomando en cuenta el método descrito, la técnica de toma de datos que se utilizó para determinar la calidad de las comunicaciones fue la siguiente:

- Utilizando el sistema de audio de una computadora con capacidad multimedia, se grabó un archivo de audio que contenía un mensaje de voz al cual llamaremos: “Discurso original”.
- El discurso original fue transmitido entre dos estaciones de radio cercanas, es decir con propagación de línea de vista. La comunicación recibida fue grabada para ser utilizada posteriormente como patrón de referencia y ser comparada con las comunicaciones vía EEJ.
- Durante los experimentos de comunicaciones vía EEJ, una de las estaciones transmitía periódicamente el discurso original, en la otra estación los comunicados recibidos eran grabados en un archivo de sonido. Ambas estaciones tenían los relojes de sus computadoras sincronizados así que el tiempo de ocurrencia de los comunicados eran registrados en un archivo de texto.
- Posteriormente, utilizando MATLAB, los datos obtenidos fueron procesados y correlacionados (comparados) con el patrón de referencia de recepción. Para estas tareas, se utilizaron los siguientes programas que utilizan los datos mencionados en el apartado 3.3.

La siguiente es una breve descripción de los programas utilizados al procesar los tres tipos de datos mencionados en el apartado 3.3.4. La explicación de cada uno de estos programas y funciones está en la cabecera de ayuda y en los comentarios de cada línea del código. Los archivos con el código MATLAB de dichos programas están dentro del CD de anexos que acompaña a esta tesis.

1) **CREAR_BINARIO.M:**

Este programa se utiliza para juntar los tres tipos de datos mencionados en un solo archivo binario. Esto se hace con la finalidad de facilitar las tareas de procesamiento posterior.

En el programa se hace uso de la función “Binario.m”, el cual a su vez, hace uso de las sub-funciones “Lee_DH.m”, “Lee_LOG.m”, “Asigna_DH.m” y “Busca_Fin.m”.

Cada archivo contiene las muestras de audio tomadas en el lapso de un minuto pues ese fue el periodo de repetición de las comunicaciones automáticas. Los archivos binarios que se crean tienen el siguiente formato:

Tabla 3-9 Formato de los archivos binarios

<i>Formato</i>	<i># Bytes</i>	<i>Contenido</i>
Char	8	Hora del comunicado
Float32	4	Valor de muestra de audio (Entre -1 y +1)
Float32	4	Valor del ΔH en el instante del comunicado

El nombre de cada archivo binario contiene los siguientes campos:

"D" + Año + Día del año + Orden + Número de archivo + ".EEJ2"

Por ejemplo: D200506203025.EEJ es un archivo binario con información del comunicado número 25, orden 3, del 3 de marzo de 2005

2) **CREAR_CORR.M:**

Es el programa principal que realiza las correlaciones entre los archivos binarios y el archivo de audio original recibido en condiciones de LOS (Línea de Vista). Hace uso de la función "Correlacionar.m".

Se correlaciona no solo todo el archivo original transmitido, sino también una palabra representativa del archivo total.

El programa genera un archivo de texto que contiene, en forma tabulada el tiempo de ocurrencia de cada comunicado, los índices de correlación y los valores de $\Delta H_{ROI-PIU}$

3) **CREAR_GRAFICOS.M:**

Es un programa que sirve para graficar los resultados de las comunicaciones, para ello hace uso de los datos tabulados que genera el programa "crear_corr.m". Como resultado, genera un archivo en formato JPG que contiene un cuadro con

las curvas de variación de los índices de correlación y los valores de $\Delta H_{ROJ-PIURA}$ en función del tiempo.

En la Figura 3-23 se muestra el diagrama de flujo de cómo interactúan los diferentes programas y funciones MATLAB:

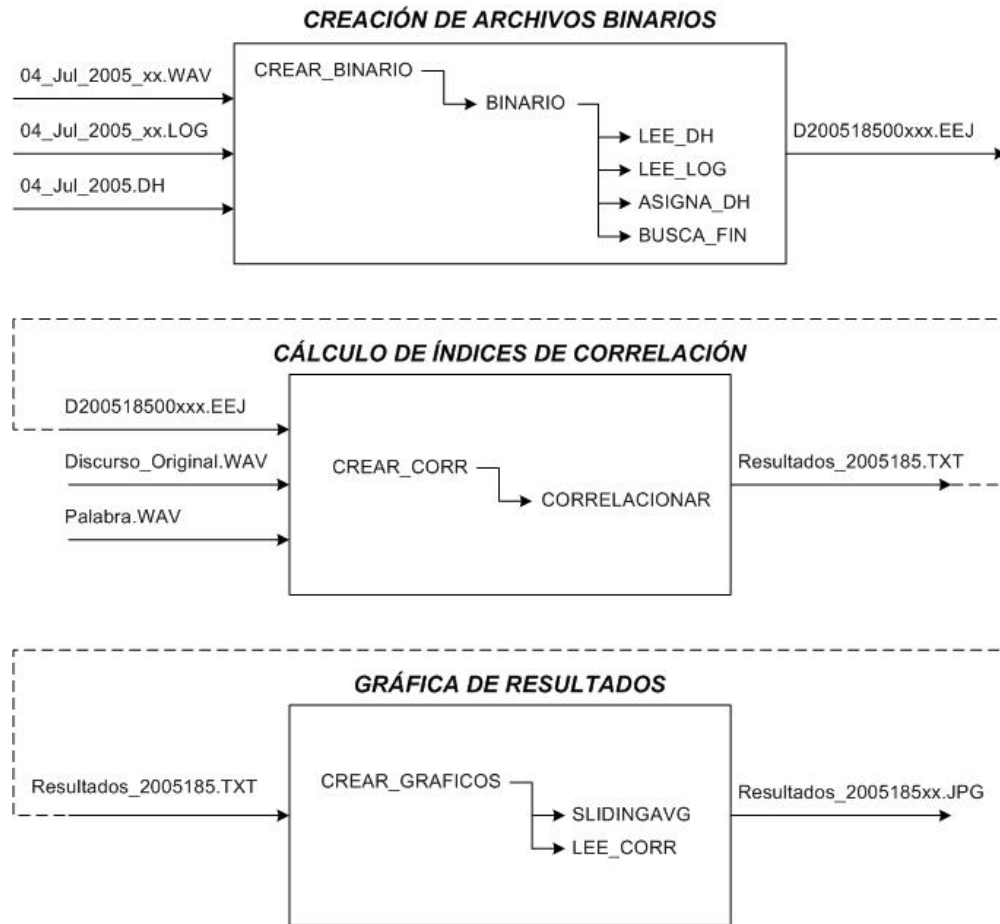


Figura 3-23 Procesamiento en MATLAB de las comunicaciones automáticas

4 RESULTADOS DE LAS COMUNICACIONES VÍA ELECTROCHORRO ECUATORIAL

4.1 Introducción

Como se describió en el capítulo anterior, el método que se utilizó para medir y cuantificar la calidad de las comunicaciones recibidas vía el Electrochorro Ecuatorial fue mediante el cálculo del llamado “Índice de Correlación”. Éste es un coeficiente que se obtiene de comparar los mensajes recibidos por comunicaciones vía el EEJ con el mismo mensaje recibido con comunicaciones en condiciones de línea de vista. Con este fin se realizaron comunicaciones automáticas en las cuales se transmitía un audio conocido durante todo el día con un periodo de repetición de 1 minuto.

Los resultados se presentan por medio de curvas que muestran la variación en el tiempo del Índice de Correlación. Además, con la finalidad de disponer de una referencia acerca la intensidad del Electrochorro Ecuatorial, se ha graficado también la variación de la componente horizontal del Campo Geomagnético: $\Delta H_{ROJ-PIURA}$ (Ver apartado 1.5)

4.2 Pruebas Preliminares

Antes de establecer el enlace de comunicaciones por dispersión en el EEJ entre Jicamarca y Paracas se realizaron tres campañas preliminares con los siguientes objetivos: a) Adquirir experiencia en el uso y manejo de los equipos electrónicos, b) conocer empíricamente el efecto del Electrochorro Ecuatorial en las comunicaciones y c) determinar que técnicas de adquisición y procesamiento de datos utilizar en las pruebas definitivas.

Las campañas mencionadas se realizaron en las siguientes fechas:

- 1) Enlace preliminar Jicamarca–Paracas: 10, 11 y 12 de agosto de 2004
- 2) Enlace preliminar Jicamarca–Lima: 20, 21 y 22 de setiembre de 2004
- 3) Enlace preliminar Jicamarca–Lima: 7, 8 y 9 de febrero de 2005

La descripción de la geometría y el equipamiento utilizado en los enlaces se pueden encontrar en el CD de anexos que acompaña a este trabajo de tesis.

Durante las comunicaciones preliminares se realizaron pruebas utilizando diferentes esquemas de modulación con la finalidad de determinar cuál de ellos era el más adecuado para las comunicaciones vía EEJ, los resultados fueron los siguientes:

- Con Amplitud Modulada (AM) no se pudo realizar ningún comunicado inteligible, incluso cuando se hicieron pruebas en momentos con valores de $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$ superiores a 50 nT (es decir, “buena” intensidad del Electrochorro Ecuatorial).
- Con AM-Banda Lateral Única (USB y LSB) sí se pudieron establecer comunicaciones inteligibles. Sin embargo, éstas tenían el inconveniente de presentar una distorsión en la voz, parecida a un “lloriqueo” o temblor permanente, no importando cuan elevado sea el valor del $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$.
- Utilizando Frecuencia Modulada (FM) se consiguieron los mejores resultados de inteligibilidad. Los comunicados recibidos ya no presentaban el “lloriqueo” que se observó en las comunicaciones utilizando AM–SSB, sino que tenían otro tipo de distorsión: la presencia de “cracks” de corta duración que afectaban la inteligibilidad del mensaje. Éste ruido impulsivo estaba presente incluso cuando los valores de $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$ eran mayores a 50 nT, es decir la intensidad del Electrochorro Ecuatorial era “buena”. Al analizar los comunicados recibidos utilizando comunicación FM, los “cracks” presentaron una frecuencia de aparición entre 50 y

100 Hz, lo cual coincide con las observaciones realizadas por Romero et al. (1968) y Sarango et al. (2005 - b).

4.3 Comunicaciones por dispersión frontal en el Electrochorro Ecuatorial

Con el objetivo de evaluar la variación instantánea de la calidad de voz en las comunicaciones vía EEJ, se realizaron experimentos de transmisión automática utilizando el esquema de modulación con que se obtuvo mejores resultados durante las comunicaciones preliminares: Frecuencia Modulada y 100 W de potencia transmitida. Estas pruebas se realizaron bajo diversas condiciones de Campo Geomagnético, es decir, tanto días calmados como días disturbados.

A continuación se van a presentar y discutir las gráficas correspondientes a las curvas de variación del Índice de Correlación para algunos días representativos. También se han graficado las curvas de variación del $\Delta H_{ROJ-PIURA}$ como un indicador de la intensidad del EEJ, y por lo tanto de las posibilidades de comunicación, tal como se mencionó en el apartado 1.5.

En la Figura 4-1 se muestra los resultados de las comunicaciones realizadas el 9 de febrero de 2004. Este fue un día medianamente disturbado pues hasta las 1:30 p.m. el $\Delta H_{ROJ-PIURA}$ presentó valores positivos fluctuantes a intervalos de aproximadamente 50 minutos; por la tarde estuvo completamente negativo hasta aproximadamente las 4:20 p.m. en que nuevamente presenta valores ligeramente positivos.

En esta gráfica se comprueba el alto grado de concordancia que existe entre la calidad de las comunicaciones vía EEJ, representado por la variación del Índice de Correlación, y la variación de la componente horizontal del campo magnético. Se puede observar claramente que mientras el $\Delta H_{ROJ-PIURA}$ tuvo valores positivos, el comportamiento de la calidad de las comunicaciones fue muy similar a este indicador, corroborándose la dependencia cuantitativa que encontró Anderson et al. (2002). Cuando el campo presentó valores negativos, en horas de la tarde, las comunicaciones ya no fueron posibles y por lo tanto el Índice de Correlación fue igual a cero.

Se puede observar que las comunicaciones fueron posibles durante varias horas de la mañana, la calidad de los comunicados recibidos estuvo entre regular y buena de acuerdo a la escala subjetiva mostrada en la Tabla 5-1 del apartado de recomendaciones.

La comunicación de mejor calidad se recibió a las 10:45 a.m. con un Índice de Correlación de 0.83 (muy buena inteligibilidad). Observar que el $\Delta H_{ROJ-PIURA}$ presentaba un valor de 60 nT en ese momento.

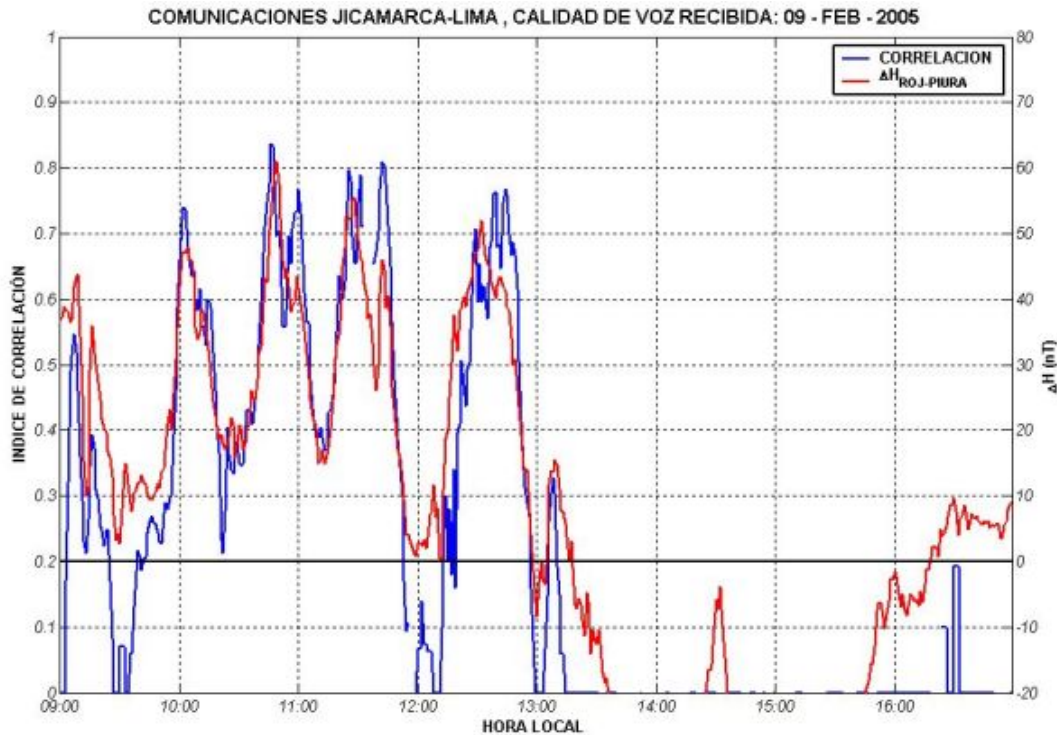


Figura 4-1 Índice de Correlación y $\Delta H_{ROJ-PIURA}$, 9 de Febrero de 2005.

Un ejemplo de típico día tranquilo (ver apartado 1.5) es el que se observa en la Figura 4-2, el cual corresponde a las comunicaciones realizadas el 4 de marzo de 2005. La imagen ha sido tomada de Sarango et al. (2005 - a) y en ella se grafican tres curvas: La variación del Índice de Correlación que indica la calidad de las comunicaciones recibidas, la intensidad del EEJ representada por la Relación Señal a Ruido (SNR) y la variación del $\Delta H_{ROJ-PIURA}$. La curva de intensidad del EEJ (SNR) fue obtenida de las mediciones realizadas por el radar del ROJ que ese día estuvo tomando datos del EEJ en forma paralela a los experimentos de comunicaciones.

Como se mencionó anteriormente, éste fue un día en que se observa que el campo magnético estuvo tranquilo o calmado, la variación del $\Delta H_{ROJ-PIURA}$ tuvo a lo largo de este día un comportamiento estable, con valores que fluctuaban entre -10 nT y 20 nT. Gracias a la ayuda de la curva de intensidad del EEJ se pudo determinar que el

$\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$ presentaba ese día un valor de aproximadamente 10 nT por debajo de su valor real. Este error de calibración se hizo evidente pues, a pesar de que los magnetómetros decían que el campo estaba negativo, sí se podía recibir las señales de radar y comunicaciones.

Éste fue un día en que las comunicaciones vía EEJ fueron posibles durante la mayor parte del día, obteniéndose por la tarde comunicados con una calidad entre regular y buena. Cabe resaltar que a pesar de ser éste un día tranquilo, no fue necesariamente al mediodía el momento de mayor intensidad del EEJ, lo normal es que eso ocurra (ver Figura 1-10) pero no siempre es así.

El momento de mejor calidad de comunicaciones ocurrió a las 3:08 p.m. cuando el Índice de Correlación presentaba un valor de 0.85 (muy buena inteligibilidad) y el $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$ tenía un valor de 18 nT (en realidad eran 28 nT).

La caída brusca en la calidad de las comunicaciones que se observa a las 3:00 p.m. fue debido a un corte de energía en la estación de transmisión en Paracas.

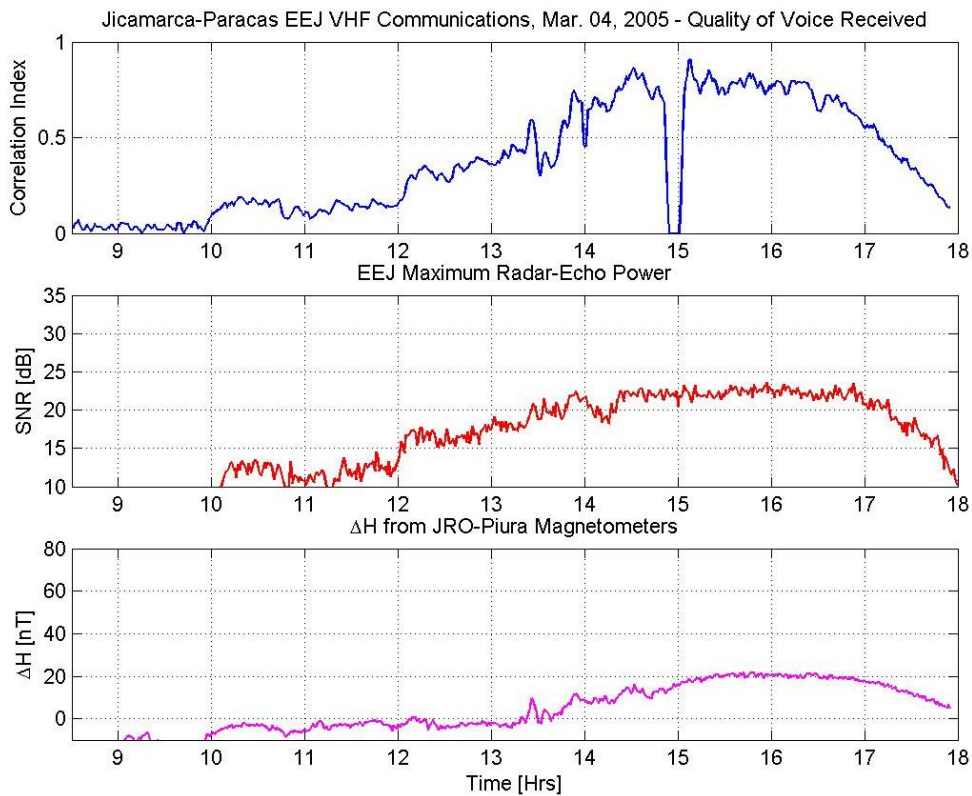


Figura 4-2 Índice de Correlación, SNR y $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$, 4 de Marzo de 2005. (Sarango et al., 2005 - a)

La Figura 4-3 muestra los resultados del día 6 de marzo de 2005, típico día con campo magnético “disturbado” (ver apartado 1.5). La variación del $\Delta H_{ROJ-PIURA}$ tuvo a lo largo de este día un comportamiento inestable, con valores fluctuantes entre -65 nT y 52 nT.

Las comunicaciones vía EEJ solamente fueron posibles durante pocas horas del día (durante la mañana entre las 9:30 a.m. y 11:00 a.m. y a partir de las 3:40 p.m. hasta el final de la tarde) y sólo cuando el $\Delta H_{ROJ-PIURA}$ presentaba valores positivos. Cabe resaltar el hecho que a pesar de que los comunicados se recibieron solamente durante pocas horas, éstos presentaron una buena inteligibilidad (Índices de Correlación > 0.6).

El momento de mejor calidad de las comunicaciones ocurrió a las 10:30 a.m. cuando el Índice de Correlación alcanzó un valor de 0.76 y el $\Delta H_{ROJ-PIURA}$ presentaba un valor de 52 nT.

Observar que hubieron momentos en que el $\Delta H_{ROJ-PIURA}$ estuvo positivo y sin embargo no hubieron comunicaciones (por ejemplo, de 1:00 p.m. a 1:30 p.m. y de 2:40 p.m. a 3:30 p.m.). Este hecho se podría atribuir a que pese a haber presencia del EEJ, las irregularidades no estaban alineadas con el Campo Geomagnético, lo cual es un requisito indispensable para que ocurran las comunicaciones por dispersión.

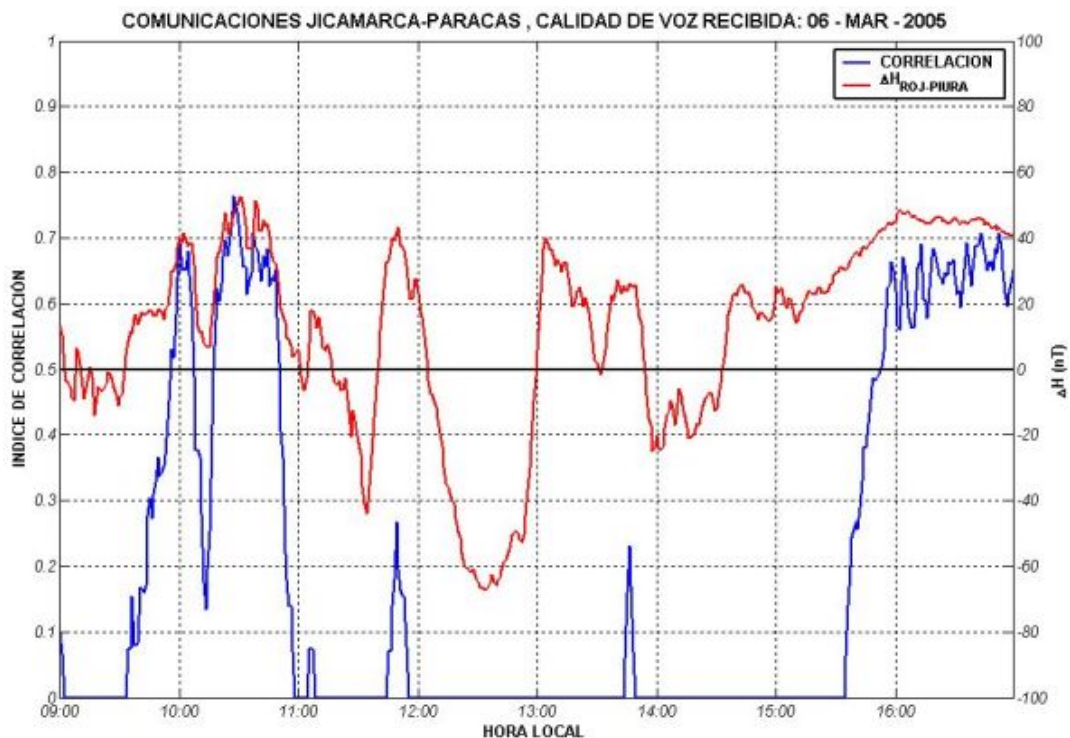


Figura 4-3 Índice de correlación del 6 de marzo 2005

La Figura 4-4 muestra los resultados de las comunicaciones realizadas el 7 de febrero de 2004 y es otro ejemplo de un día con campo magnético fuertemente disturbado. El $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$ presentaba un comportamiento inestable, predominantemente negativo, y con valores que variaban entre los -100 nT y 64 nT.

Lo que hace representativo a este día es que a las 10:37 a.m. hubo una ocurrencia del fenómeno conocido como Contraelectrochorro Ecuatorial (CEEJ: *Counter Equatorial ElectroJet*). Mientras duró, el $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$ presentó valores que variaron entre -38 nT y -86 nT. Es interesante observar que a pesar de que alrededor del mediodía este parámetro presentó valores aun más negativos (≈ 100 nT) no volvió a presentarse otra ocurrencia del CEEJ. Como ya se ha mencionado en el apartado 1.3, éste es un fenómeno que se presenta muy esporádicamente y las razones que provocan su aparición son aun materia de estudio.

Durante el tiempo que duró el CEEJ, aproximadamente 20 minutos, los comunicados que se recibían se caracterizaron por presentar una buena inteligibilidad, los Índices de Correlación tenían valores superiores a 0.6, calidad que fue incluso superior a la calidad de las comunicaciones recibidas ese mismo día bajo condiciones normales de Electrochorro Ecuatorial:

El momento con mejor calidad en las comunicaciones ocurrió a las 10:40 a.m. bajo condiciones de CEEJ, el Índice de Correlación alcanzó un valor de 0.83 cuando el $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$ tenía un valor de -56 nT. Bajo condiciones normales del EEJ, el mejor Índice de Correlación fue de 0.6 y se obtuvo a las 5:00 p.m. cuando el valor del $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$ era 44 nT.

Observar que nuevamente hubieron momentos en que el $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$ estuvo positivo y sin embargo no hubieron comunicaciones (por ejemplo, de 9:00 a.m. a 10:00 a.m. y de 2:50 p.m. a 3:15 p.m.). Nuevamente éste hecho se podría atribuir al no alineamiento de las irregularidades del EEJ con el Campo Geomagnético.

En los días “disturbados” observados, los comunicados se recibieron sólo durante pocas horas del día. Sin embargo, éstos presentan una calidad regular (Índices de Correlación > 0.4) lo cual es aceptable en aquellas aplicaciones donde el envío de información es no urgente y de poco volumen, por ejemplo: Telemetría, mensajería no importante, etc.

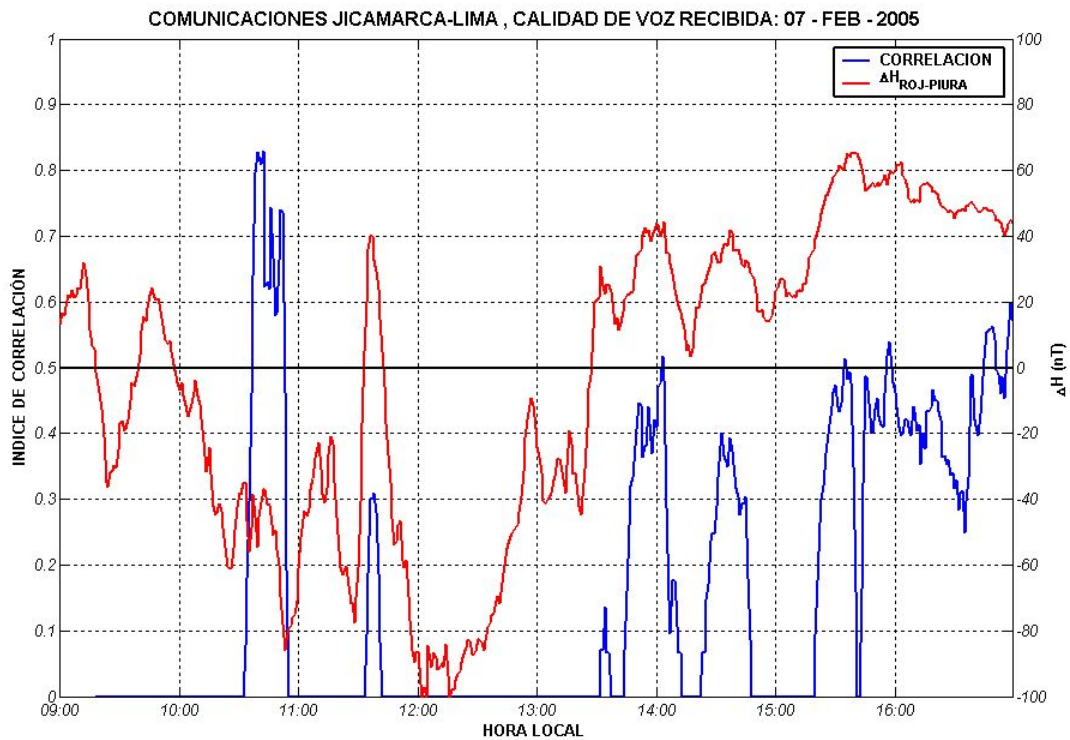


Figura 4-4 Índice de Correlación y $\Delta H_{ROJ-PIURA}$, 7 de Febrero de 2004.

Otro típico día con Campo Magnético tranquilo o calmado es el que se muestra en la Figura 4-5 y corresponde a los resultados del 21 de septiembre de 2004. En este día solamente se hicieron transmisiones automáticas durante las horas en que se muestran los Índices de Correlación.

Lo interesante de este día es que el $\Delta H_{ROJ-PIURA}$ estuvo positivo la mayor parte del día (durante las 9:10 a.m. y las 4:00 p.m.), este parámetro presentó valores que variaban entre -10 nT y 54 nT.

Los comunicados se pudieron recibir durante casi todo el día con una inteligibilidad que iba de regular a muy buena (Índices de Correlación > 0.4). A las 12:30 p.m. se obtuvo el comunicado de mejor calidad durante ese día, el Índice de Correlación fue de 0.93 (muy buena inteligibilidad) y el $\Delta H_{ROJ-PIURA}$ tenía un valor de 54 nT. Éste fue el comunicado de mayor calidad obtenido durante todas las pruebas de comunicaciones vía Electrochorro Ecuatorial.

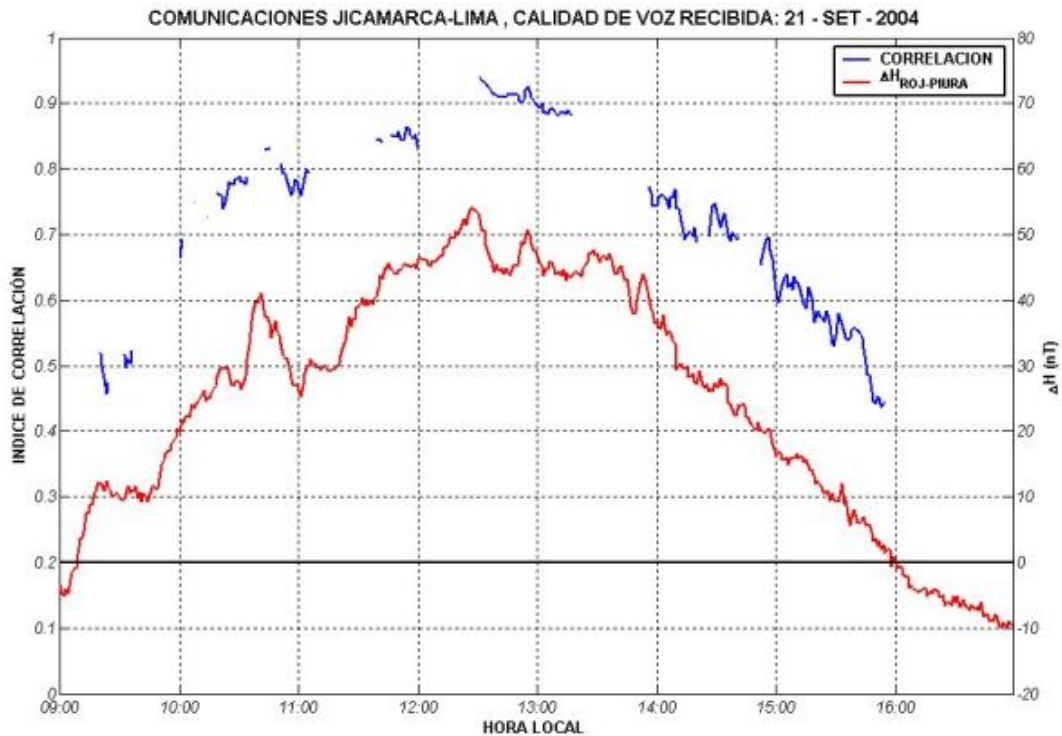


Figura 4-5 Índices de correlación del 21 de septiembre de 2004

Como ya se mencionó anteriormente, las pruebas de comunicaciones automáticas se realizaron empleando la máxima potencia que permitían los radio transeceptores: 100 W. El 21 de septiembre, en los momentos en que no se hicieron las pruebas de transmisión automática, se realizó un experimento utilizando diferentes niveles de potencia de transmisión con la finalidad de determinar la potencia mínima con que se podía realizar una comunicación vía el EEJ.

Es así como después del mediodía, cuando el $\Delta H_{ROJ-PIURA}$ presentaba valores superiores a 50 nT (máxima intensidad del EEJ durante ese día), se empezó transmitiendo un mensaje con 100W (50 dBm) usando modulación FM para luego repetir la transmisión disminuyendo la potencia a la mitad de su valor anterior y así sucesivamente: (50 W, 25 W, etc.).

Las comunicaciones se pudieron recibir hasta con 6.25W (38 dBm) de potencia transmitida. Por lo tanto, se puede deducir que la señal recibida tenía una SNR mayor que 12 dB. En la Figura 4-6 se puede observar como la relación señal a ruido va disminuyendo conforme la potencia transmitida disminuye.

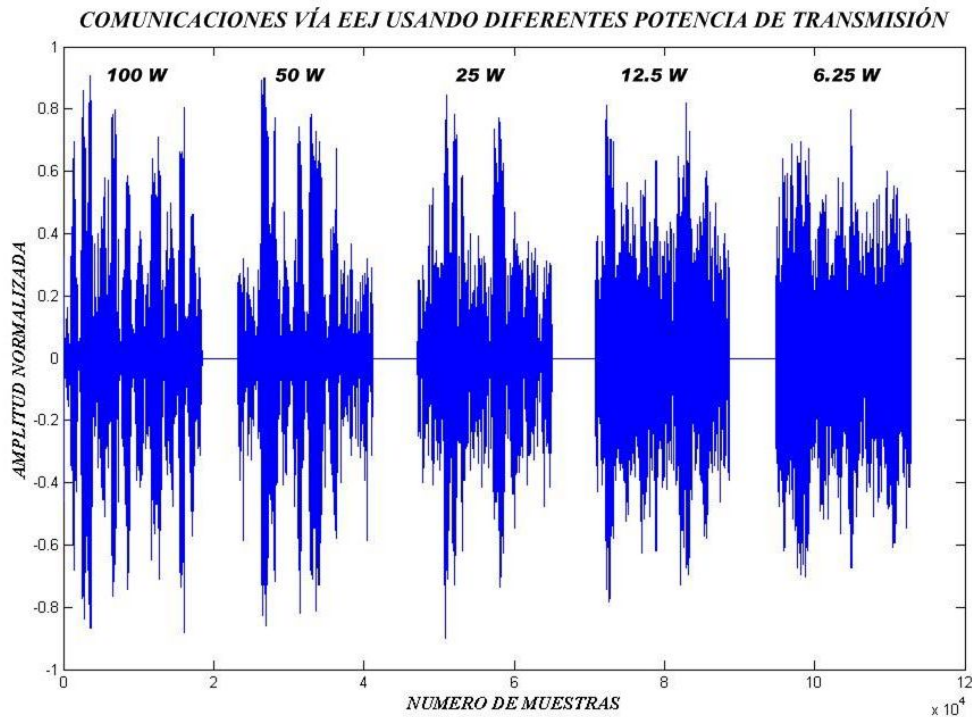


Figura 4-6 Comunicaciones recibidas con diferentes potencias de transmisión

Otro experimento similar se llevó a cabo al día siguiente, 22 de setiembre de 2004 a la 1:30 p.m., cuando la intensidad del EEJ presentaba un valor similar al experimento del día anterior ($\Delta H_{ROJ-PIURA} \approx 50$ nT): Se transmitió un mensaje en modulación FM con 100W de potencia, pero en esta ocasión la señal proveniente de la antena de recepción fue atenuada gradualmente hasta que ya no era posible recibirla, para ello se utilizaron atenuadores calibrados de la marca Hewlett Packard.

Las comunicaciones se pudieron recibir hasta cuando la señal era atenuada en un factor de -15dB (3.125 W); es decir, las comunicaciones presentaron una SNR superior a 15 dB. En la Figura 4-7 se puede observar como la relación señal a ruido va disminuyendo conforme la potencia de la señal recibida es atenuada.

Es importante mencionar que estas pruebas de comunicaciones fueron hechas durante las pruebas preliminares entre Jicamarca y Lima cuya geometría está descrita en el CD de anexos que acompaña a esta tesis. Dicho enlace, debido a que utiliza otro tipo de antenas, tiene una ganancia mayor en 6 dB a la del enlace Jicamarca – Paracas.

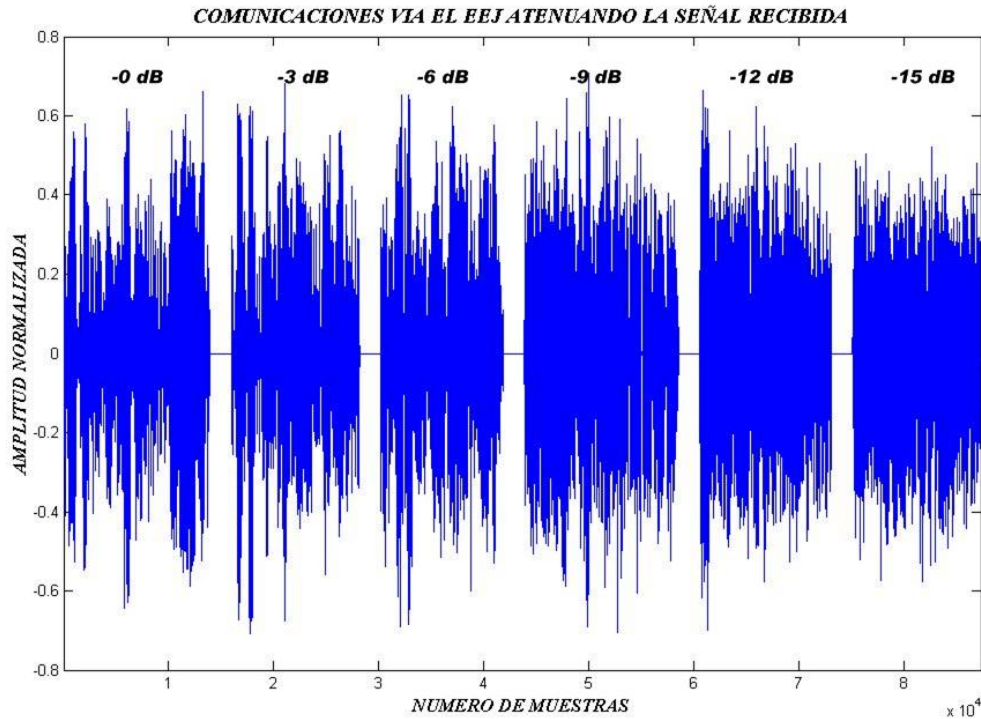


Figura 4-7 Comunicaciones recibidas atenuando la señal proveniente de la antena de recepción

Por otra parte, además de las comunicaciones de voz también se hicieron pruebas de comunicaciones de datos empleando el modo digital PSK-31. Como ya se mencionó, este es un modo de comunicación digital que permite realizar conversación escritas en tiempo real de manera parecida a los “Chats” de Internet.

Con este modo sólo se pudieron recibir comunicados empleando FM (Frecuencia Modulada). Cuando se intentó emplear AM Banda Lateral (USB o LSB), no fue posible decodificar los datos a pesar que la señal transmitida se podía escuchar con claridad. Una probable razón puede ser debido a que el “lloriqueo” observado en los comunicados de voz realizados con esta modulación, distorsiona la fase de la señal recibida impidiendo su correcta demodulación.

Cuando el $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$ presentaba valores superiores a 50 nT (es decir que la intensidad del EEJ era alta), la información enviada con PSK-31 se podía decodificar al 100%, obteniéndose un mensaje completamente inteligible. Sin embargo, se pudo comprobar que cuando el $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$ presentaba valores entre 0 y 20 nT (intensidad débil del EEJ) y a pesar de que los comunicados de voz ya no eran inteligibles, los comunicados con PSK-31 aún se podían decodificar con errores entre el 80% y el 90%.

Esto se debe principalmente al menor ancho de banda que ocupa esta modulación (31.25 Hz) a comparación del ancho de banda utilizado por la voz (4 KHz). Otra razón para la mejor inteligibilidad de las comunicaciones en PSK-31 es que en el lenguaje escrito la ausencia de algunos caracteres no necesariamente implica que el mensaje no se pueda entender: el texto que se recibía era aún inteligible a pesar de algunos errores presentes.

A continuación se muestra un ejemplo de comunicación en PSK-31 realizado el 10 de agosto de 2004 a las 10:53 a.m. con un valor de $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$ de 25.8 nT. El campo magnético estaba disturbado así que los mensajes fueron transmitidos con redundancia. Sin embargo, a pesar de que existían errores en la decodificación, la inteligibilidad de la información aún era posible:

```
TX> 10:53:10 LOCAL, 10/AGO/2004
     "ola Jica#arca,
     Hola Jicamarcx,
     Como me copias?
     Como me co9ias?
RX> 10:54:02 LOCAL, 10/AGO/2004
     Tn copio pero jon bart?=te tgido
     Te rhpio pero con klstante ryido
TX> 10:54:55 LOCAL, 10/AGO/2004
     Yo también te co9io con errores
     Yo tgmbién te copiq con erfores
RX> 10:55:42 LOCAL, 10/AGO/2004
     La? Con>iciones no 4stan buenas
     Las condicio%es no estan buemas
```

El siguiente texto es una muestra de una comunicación en PSK-31 realizado el 11 de agosto de 2004 a las 2:00 p.m. con un valor de $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$ igual a 59.6 nT (buena intensidad del EEJ). En esta oportunidad los mensajes se decodificaron en su totalidad y el mensaje se entendía perfectamente.

```
TX> 14:00:25 LOCAL, 11/AGO/2004
     Como llego lo ultimo?
RX> 14:00:49 LOCAL, 11/AGO/2004
     El ultimo mensaje llego al 100%
TX> 14:01:08 LOCAL, 11/AGO/2004
     Tu tambien llegas bastante bien
RX> 14:01:28 LOCAL, 11/AGO/2004
     El campo esta bueno, lo veo en el magnetometro
```

Finalmente y a modo de anécdota, se observó que en algunas ocasiones se recibían comunicaciones de muy alta calidad (Índice de Correlación entre 0.9 y 0.95) a pesar de que el campo magnético estaba disturbado o la intensidad del EEJ era baja y los comunicados vía el EEJ no ocurrían. Dichos comunicados no presentaban ninguna periodicidad y ocurrieron principalmente durante las primeras horas del día, entre las 5:00 a.m. y las 7:00 a.m. y tenían una duración entre 0.2 y 8 segundos.

Se presume que dichos comunicados de buena calidad podrían deberse a la dispersión de la señal transmitida en la estela que dejan los meteoros que ingresaban a la atmósfera y atraviesan la zona correspondiente al volumen común de dispersión (intersección de los haces de las antenas de transmisión y recepción). La estela de estos meteoros normalmente está compuesta por material altamente ionizado y si la estela forma un plano de dispersión que cumpla con la condición de Bragg mencionada en el apartado 1.2, entonces se están dando las condiciones para que ocurra una comunicación de alta calidad que va a durar mientras esté presente la ionización.

En la Figura 4-8 se observa como la SNR de una comunicación vía EEJ mejora considerablemente por un periodo de unos 8 segundos, presumiblemente debido a la dispersión de la señal transmitida en la estela ionizada de un meteoro.

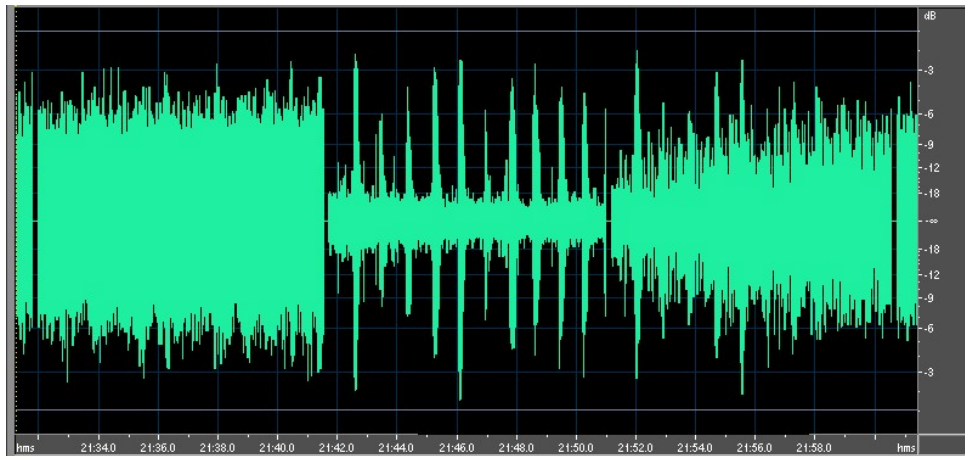


Figura 4-8 Aumento repentino de la SNR en una comunicación vía el EEJ.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES:

1. Los objetivos de esta tesis: “Determinar los parámetros de diseño de las estaciones de transmisión-recepción y evaluar el potencial del EEJ como canal de comunicaciones”, se han cumplido satisfactoriamente. El enlace Jicamarca–Paracas fue establecido con éxito y fue probado durante las campañas de comunicaciones. Los resultados mostrados en el capítulo anterior demuestran que el potencial del EEJ como medio de comunicación es viable, las comunicaciones son posibles utilizando equipos de radiocomunicaciones de uso comercial. Los usos y aplicaciones de este tipo de comunicaciones serán propuestos en el apartado de recomendaciones.
2. En la publicación de Anderson et al. (2004), los autores encontraron una relación **cuantitativa** entre la intensidad del Electrochorro Ecuatorial y la diferencia entre las componentes horizontales registradas por dos magnetómetros ubicados uno dentro y otro fuera de la zona del EEJ, por ejemplo entre Jicamarca y Piura: $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$. Esta relación de dependencia se ha verificado durante las campañas de comunicaciones, se ha comprobado que por lo general existe buena concordancia entre este parámetro y la calidad de voz en las comunicaciones recibidas.

3. Las comunicaciones vía EEJ empiezan a recibirse cuando el $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$ presenta valores positivos. Se puede observar en la base de datos de los magnetómetros de Jicamarca y Piura, ubicado en la página web del ROJ, que en condiciones tranquilas de campo magnético el $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$ presenta valores mayores que **0 nT** aproximadamente entre las 8:00 a.m. y 5:00 p.m.
4. Para que dos estaciones puedan comunicarse por dispersión frontal en el EEJ es necesario que las estaciones a comunicarse cumplan con la condición de dispersión de Bragg para el EEJ: “El Vector Número de Onda ($k_s = k_t - k_r$) debe de ser perpendicular al campo magnético de la Tierra” (ver apartado 1.2). Por lo tanto, se puede concluir que sólo aquellas estaciones cuyas antenas tienen la geometría adecuada (haces dirigidos al mismo punto del Locus de Perpendicularidad) podrán comunicarse entre sí.
5. Para que las comunicaciones vía EEJ sean posibles, la condición anterior es necesaria pero no suficiente, además deberán de existir irregularidades del EEJ alineadas con el campo magnético. La presencia de estas irregularidades depende del estado del campo magnético, la ocurrencia de tormentas solares, etc. Puede haber presencia del EEJ (elevada densidad de electrones) pero si las irregularidades no están alineadas con el campo magnético, debido por ejemplo a una tormenta solar, las comunicaciones no serán posibles.
6. La modulación AM con portadora no es apropiada para realizar las comunicaciones vía EEJ pues no es eficiente: aprovecha sólo el 33% de la potencia total transmitida para transmitir información. Las comunicaciones que se intentaron realizar en esta modulación fueron ininteligibles.
7. Las comunicaciones utilizando modulación AM-Banda Lateral Única (USB o LSB) al ser demoduladas presentaron un temblor o “lloqueo” permanente lo cual dificultaba su inteligibilidad. Con la potencia utilizada, se pudieron recibir solamente cuando el EEJ presentaba una buena intensidad ($\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}} > 40$ nT aproximadamente).
8. Las comunicaciones en Frecuencia Modulada (FM) fueron las que mayor inteligibilidad presentaron. Cuando el $\Delta H_{\text{ROJ-PIURA}}$ presentaba valores mayores que 50 nT (alta intensidad del EEJ), se pudieron lograr índices de correlación superiores

- a 0.8. Sin embargo, las comunicaciones en este modo también son distorsionadas por ruido impulsivo o “cracks” con un ancho de banda aproximado de 50 a 100 Hz.
9. De acuerdo a Sarango et al. (2005 - b), el “lloriqueo” presente en las comunicaciones utilizando AM-BLU y el ruido impulsivo o “cracks” presentes en las comunicaciones usando FM son producto de la modulación que el Electrochorro Ecuatorial imprime a la señal transmitida. El EEJ al ser un proceso de naturaleza aleatoria con distribución Gaussiana, actúa como un filtro con características particulares que modifica a la señal transmitida haciendo que presente las características mencionadas en cada tipo de modulación.
 10. Las comunicaciones digitales vía EEJ usando PSK-31 sólo fueron posibles en FM. Con modulación AM Banda Lateral Única (USB o LSB) no fue posible realizar ningún comunicado digital, probablemente debido a que la distorsión de fase causada por el EEJ (“lloriqueos”) impide la correcta demodulación de los datos.
 11. Bajo las mismas condiciones de intensidad del EEJ, las comunicaciones digitales usando PSK-31 presentaron un mayor grado de inteligibilidad que las comunicaciones de voz. Por ejemplo, cuando las comunicaciones voz eran prácticamente ininteligibles (0.3 de Índice de Correlación) las comunicaciones en PSK-31 aún se podían recibir sin dificultad. Esto ocurre debido a que el ancho de banda de esta modulación digital (31.25 Hz) es aproximadamente 100 veces menor que el ancho de banda de la voz (3100 Hz). Además, influye el hecho que en una comunicación escrita, como es en el caso de PSK-31, la ausencia de algunos caracteres del mensaje no afecta la inteligibilidad del mensaje. En conclusión, la transmisión de información usando PSK-31 es más lenta que usando la voz pero tiene la ventaja de ser más inteligible.
 12. Las comunicaciones vía EEJ recibidas en condiciones de Contraelectrochorro Ecuatorial (CEEJ) presentaron una buena calidad de voz durante su duración. Los comunicados recibidos alcanzaron valores superiores a 0.8 de Índice de Correlación.
 13. Bajo las condiciones de diseño propuestas, no se pudo establecer ninguna comunicación nocturna vía el EEJ. Como durante la noche la intensidad del EEJ es menor que durante el día, los 100 W de potencia máxima de transmisión de los transceptores utilizados fueron insuficientes para establecer una comunicación.

RECOMENDACIONES:

- La Condición de Bragg acerca de la geometría que deben de tener las estaciones que quieran comunicarse a través del EEJ es de particular utilidad cuando la privacidad y confidencialidad son importantes; por ejemplo: comunicaciones comerciales o militares.
- Las comunicaciones vía el Electrochorro Ecuatorial podrían ser utilizadas en las siguientes aplicaciones:
 - ✓ Comunicaciones larga distancia en zonas aisladas
 - ✓ Comunicaciones comerciales y/o militares de alta seguridad
 - ✓ Telemetría
 - ✓ Telecontrol
 - ✓ Envío de tele mensajes (buscapersonas o beepers)
 - ✓ Envío de documentos y correo electrónico en tiempo diferido
 - ✓ Rastreo de vehículos (*tracking*).
- La determinación de la inteligibilidad o “calidad de la voz” de una comunicación es una tarea subjetiva pues ésta puede ser muy diferente dependiendo de la opinión del oyente. Así, un operador radial entrenado puede opinar que la comunicación es perfecta cuando para un oyente poco acostumbrado a este tipo de comunicaciones puede opinar que la inteligibilidad es mala. Tomando en cuenta lo anterior y basándonos en los Índices de Correlación obtenidos durante las comunicaciones vía Electrochorro Ecuatorial, se propone la utilización de la siguiente escala **SUBJETIVA** para evaluar la calidad o inteligibilidad de las comunicaciones vía EEJ:

Tabla 5-1 Escala Subjetiva de Interpretación de la calidad de las comunicaciones

ÍNDICE DE CORRELACIÓN	INTELIGIBILIDAD
0.0 – 0.2	Nula: No se entiende nada
0.2 – 0.4	Pobre: Se entiende muy poco
0.4 – 0.6	Regular: Se entiende con algo de dificultad
0.6 – 0.8	Buena: Se entiende bien. Existe ruido de fondo
0.8 – 1.0	Muy buena: Se entiende perfectamente

- Otra forma de evaluar la calidad de las comunicaciones podría ser evaluando la Relación Señal a Ruido (SNR). En las comunicaciones que se realizaron no se pudo evaluar este parámetro pues el circuito de control de ganancia automática de los transeceptores amplifica o atenúa la señal recibida, distorsionando así el verdadero valor del SNR. Los transeceptores utilizados son equipos modernos y compactos en los cuales no se tiene acceso a los circuitos interiores para extraer la señal sin distorsión. Por lo tanto, se recomienda realizar experimentos haciendo uso de receptores analógicos o digitales que permitan medir el nivel correcto de SNR y así encontrar una relación entre estos valores y la calidad de la voz recibida.
- Una forma de mejorar la inteligibilidad de las comunicaciones vía EEJ es aumentar la potencia de transmisión. Por ejemplo, si al diseño propuesto se le añade el uso de un amplificador de potencia de 1 KW, se estaría aumentando la SNR en un factor de 10 dB con respecto a los resultados obtenidos en los experimentos donde se utilizaron 100 W de potencia transmitida.
- Se sugiere realizar un estudio estadístico del Electrochorro Ecuatorial y de los valores de $\Delta H_{ROJ-PIURA}$. Dichas estadísticas servirían para determinar cuantas horas en promedio – para periodos de días, semanas, meses y años – éste tipo de comunicaciones está disponible y es más confiable.
- Se recomienda experimentar con nuevos esquemas de modulación digitales como por ejemplo: OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing– Multiplexación Ortogonal por División en Frecuencia). Este es un modo digital similar al PSK31 pero con capacidad *Multistream* o multicanal lo cual le permite alcanzar mayores velocidades de transmisión (Sánchez Et. Al, 2002)
- Para mejorar la confiabilidad y calidad de las comunicaciones, se podría experimentar con el uso de **Técnicas de Diversidad**, tanto en el dominio del tiempo, la frecuencia o el espacio. Éstas técnicas mejoran notablemente la calidad de las comunicaciones en los enlaces por onda de espacio (línea de vista)
- El radar biestático Jicamarca – Paracas es un instrumento del ROJ que sirve para realizar estudios de la capa ecuatorial y del EEJ. Debido a que se utiliza para medir principalmente densidades de electrones, la disposición de las antenas en ambas estaciones es perpendicular a la línea que une ambas estaciones. Así, el

volumen común que forman los haces de las antenas es más angosto en la dirección longitudinal del EEJ (E - O) y más ancho en la dirección transversal (N - S). Esta disposición no es la apropiada para las comunicaciones vía EEJ pues lo que se busca es tener un mayor volumen de dispersión, es decir abarcar la mayor cantidad de irregularidades. Por lo tanto, se podría aumentar la ganancia del sistema en el enlace de comunicaciones Jicamarca – Paracas ubicando las antenas de manera alineada a la línea del enlace. La Figura 5-1 es un diagrama de cómo están ubicadas las antenas actualmente (imagen de la izquierda) y de cómo sería más conveniente ubicarlas para mejorar la ganancia del enlace (imagen de la derecha).

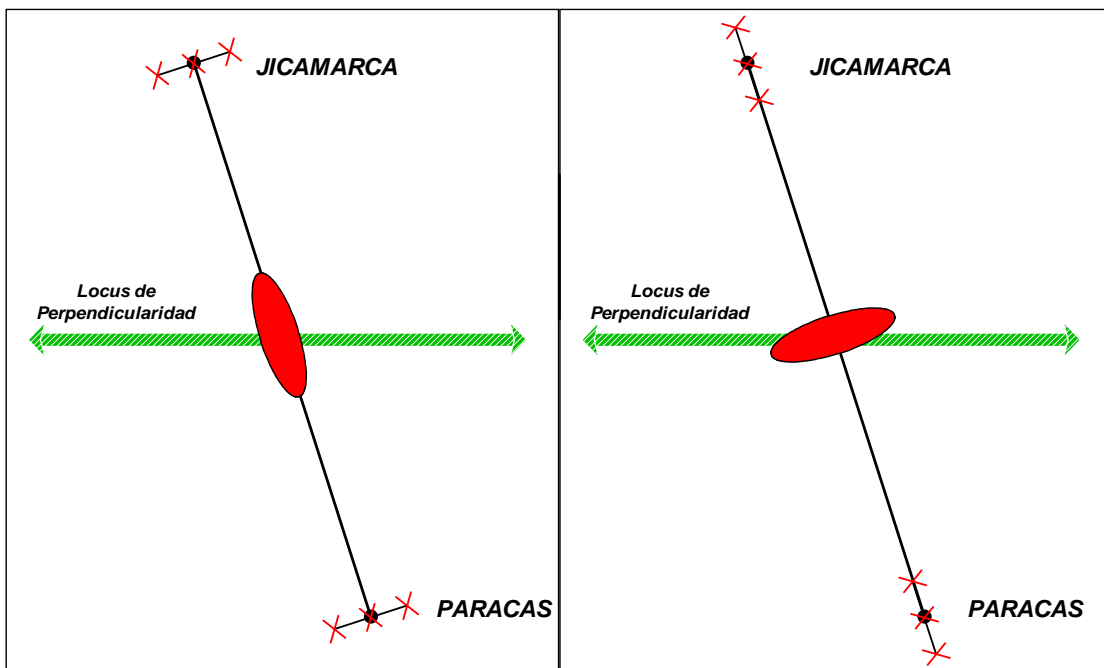


Figura 5-1 Esquema de ubicación de las antenas. Disposiciones actual (izquierda) y recomendable (derecha).

BIBLIOGRAFÍA

1. Anderson, D., A. Anghel, J.L. Chau, O. Véliz (2004). *Daytime vertical $E \times B$ drift velocities inferred from ground-based magnetometer observations at low latitudes*. Space Weather. Vol. 2, No. 11, 1-9.
2. Anderson, D., A. Anghel, K. Yumoto, M. Ishitsuka; E. Kudeki (2002). *Estimating daytime vertical ExB drift velocities in the equatorial F-region using ground-based magnetometer observations*. Geophysical Research Letters, Vol. 29, No. 12, P. 37.
3. Backus, G., R. Parker y C. Constable (1996). *Foundations of Geomagnetism*. Cambridge University Press, Capítulo 1.
4. Balsley, Ben B. (1967). *Evidence for Plasma Turbulence in the Equatorial Electrojet, Institutes for Environmental Research, Technical Memorandum #89*.
5. Bandyopadhyay, P. (1964). *La Ionización de la capa E-Esporádica cerca del Ecuador Magnético*. Reporte Científico, Instituto Geofísico del Perú.
6. Chapman, S. (1963). *Solar Plasma, Geomagnetism and Aurora*. Gordon and Breach, New York. Capítulo 1.

7. Cohen, R. y K. Bowles (1963). *Ionospheric VHF Scattering Near the Magnetic Equator During the International Geophysical Year. Journal of Research of the NBS.* Vol 67D. No.5
8. Davies, K. (1990). *Ionospheric Radio. Peter Peregrinus Ltd, UK.* Capítulos 6 y 13.
9. Denardini, C. (2004) *Estudo da Electrodinamica da Ionosfera Equatorial Durante o Periodo de Maxima Atividade Solar (1999-2002). Tesis de Doctorado en Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) Brasil.* Capítulo 1.
10. Diwakar, T. (2003). *Radar Studies of The Equatorial Electrojet. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Physics. University of Kerala, India.* Capítulo 1.
11. Doviak, R. y D. Zrníc. (1993). *Doppler Radar and Weather Observations. Academic Press.* Capítulo 1.
12. Farley, D.T. (1985). *Theory of Equatorial Electrojet Plasma Waves: New Developments and Current Status. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 47, 729-744
13. Hall, B. y M. Hewitt (1996). *Propagation of Radio Waves. The IEEE, UK.* Capítulos 4 y 16.
14. Hysell, D. y J. Chau (2001). *Inferring E region electron density profiles at Jicamarca from Faraday rotation of coherent scatter. Journal Geophysics Research* 106, 30, 371-380.
15. Ierčić, M. (1980). *Radar Observations of the Equatorial Electrojet Irregularities and Theory of Type I Turbulence. Cornell University, Ph.D. Thesis.* Capítulo 1.
16. Kudeki, E. (1983). *Plasma Turbulence in the Equatorial Electrojet. Thesis for Partial Fulfillment for the degree of Doctor in Philosophy. Cornell University.* Capítulo 1.
17. Ochs, G. (1965). *The Large 50 MC/S Dipole Array at Jicamarca radar Observatory. NBS Report 8772.*
18. Rastogi, P. y S. Bowhill (1975). *Remote Sensing of the Mesosphere Using the Jicamarca Incoherent-Scatter radar. Aeronomy Report No. 68, University of Illinois–Urbana.* Capítulo 1.

19. Reddy, C. (1989). *The equatorial Electrojet. Pure and Applied Geophysics*, v.131, n.3, p. 486-508.
20. Romero, C. (1973). Propagación en la Zona Tropical. Seminario sobre Sistemas de Radiodifusión.
21. Romero, C., A. Giesecke y O. Pérez. (1968). *VHF Ionospheric Scatter Propagation Via The Equatorial Electrojet. IGP Preview Paper*
22. Sarango, Martin F., Jorge A. Chocos y Ronald F. Woodman. (2005 - a). *Point-to-point wireless VHF communications using EEJ forward scatter propagation, Proceedings of the 11th International Symposium on Equatorial Aeronomy (ISEA-11), S6-O-14, Taipei, Taiwan R.O.C.*
23. Sarango, Martin F., Jorge A. Chocos y Ronald F. Woodman. (2005 - b). *Wireless point-to-point communications using forward scatter propagation from the Equatorial Electrojet, Proceedings of the XXVIIIth General Assembly of International Union of Radio Science - URSI, India.*
24. 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. p. 1-8.
25. Swartz W. (2002). *Hardware Implementations of Selected Radar Components.* Seminario dictado en el ROJ.
26. Tomasi, W. (1996). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas.* Prentice Hall. Capítulos 9, 10, 12 y 14.
27. Valladares, C. y R. Woodman (1975). *Simulación Digital-Analógica por Computadora de Comunicaciones Vía Electrochorro Ecuatorial.* III CONIMERA
28. YAESU (1999). FT-847, Manual de Usuario. YAESU Musen Japón.
29. YAESU (2002). FT-897, Manual de Usuario. YAESU Musen Japón.

ENLACES DE INTERNET

1. Cole, P. *Modulation Systems. University of Adelaide.*
<http://www.eleceng.adelaide.edu.au/Personal/peter/peter/>
2. Groves, I. *Fundamentals of Communications. University of London.*
<http://www.ctr.kcl.ac.uk/lectures/Ian/>
3. Palle Preben-Hansen, 1996. *Troposcatter at 50 MHz.*
<http://www.uksmg.org/tropo.htm>
4. Temas de Geofísica y Magnetismo. *Ressenlaer Politechnique Institute, Nueva York.*
<http://gretchen.geo.rpi.edu/>
5. Radio Observatorio de Jicamarca.
<http://jro.igp.gob.pe>

6. Base de datos de los magnetómetros de Piura y Jicamarca, Radio Observatorio de Jicamarca.

<http://jro.igp.gob.pe/database/magnetometer/html/magdata.htm>

7. Información variada de la modulación digital PSK-31

<http://www.psk31.com>

8. Programa para comunicaciones en PSK31: PSK-31 DELUXE

<http://hrd.ham-radio.ch/psk31deluxe.html>

9. Programa de grabación automática de audio: SCANNER RECORDER

<http://www.davee.com>

10. Programa de sincronismo: DIMENSION 4

<http://www.thinkman.com>

11. Programa de sincronismo: TAC-32

<http://cnssys.com>

12. Programa para procesamiento de audio sonido: COOL EDIT 2000

<http://www.syntrillium.com>

13. Fabricante de la interfase Transceptor – Computadora RASCAL–BUXCOMM:

<http://www.packetradio.com>

14. Fabricante de los transceptores YAESU

<http://www.yaesu.com>