

SDR: SOLUCION PARA LA MONITORIZACIÓN DE RADIOFAROS NO DIRECCIONALES.

Yuneisy Bengochea Arias¹, Liset Martínez Marrero², Jorge Torres Gomez³

¹Centro de Control Aéreo, Empresa Cubana de Aeropuertos y Servicios Aeronáuticos (ECASA), Carretera Wajay km 2 ½, Boyeros,

^{2,3}Departamento de Telecomunicaciones y Telemática, CUJAE, Calle 114 e/Rotonda y Ciclovía, Boyeros

¹e-mail: yuneisy@aeronav.ecasa.avianet.cu

RESUMEN

El Radiofaro no Direccional (NDB) fue la primera radioayuda a la navegación que existió. Consiste en un transmisor que emite una portadora en la banda de 190 kHz a 1750 kHz, modulada en amplitud. Su función es permitir que las aeronaves se ubiquen respecto a la estación del NDB. La Aviación Civil Cubana ha distribuido 26 estaciones NDB no atendidas por todo el país. Sin embargo el funcionamiento de las estaciones no está siendo monitoreado como establece la Organización Internacional de la Aviación Civil (OACI). Este artículo constituye la fase inicial en el diseño de un sistema de monitoreo de NDB empleando la tecnología SDR. El procesamiento de la señal digital incluye métodos de detección de energía, estimación de potencia y profundidad de modulación, además de la demodulación, filtrado y decodificación de la señal recibida. De manera que el receptor propuesto es capaz de censar constantemente los parámetros que regula la OACI.

PALABRAS CLAVES: Monitoreo, OACI, Radiofaro no Direccional, SDR.

ABSTRACT

Non-Directional Beacon was the first navigation radioaids used in aeronautic applications. NDB transmitter broadcasts an amplitude modulated carrier over 190 kHz - 1750 kHz band, allowing aircraft localization regarding the NDB station. Around 26 unattended NDB stations have been distributed by the Cuban Civil Aviation. However, in spite of the OACI indications, the stations performance hasnot been monitored. This articles addresses a primary approach for designing an NBD monitoring system based on SDR technology. The proposed system performs some digital processing techniques based on energy detection, estimation of the modulation's parameters, demodulation, filtering and decoding. On this way, the proposed receiver is capable to sense OACI regulated parameters without any interruption.

KEYWORDS: Monitoring, ICAO, NDB, SDR.

INTRODUCCIÓN

Entre los primeros sistemas de radionavegación aérea, instalados con el objetivo de permitir a las aeronaves ubicarse en el espacio aéreo, se encuentran los radiofaros no direccionales. Los radiofaros no direccionales o NDB (Non-Directional Beacon) son los sistemas radiogoniométricos más antiguos y menos precisos que existen, donde un equipo orientable a bordo de la aeronave determina aproximadamente la dirección de procedencia de la energía electromagnética recibida en un punto del espacio aéreo [1]. Al conjunto receptor más antena direccional a bordo se le conoce como radiocompás automático o Automatic Directional Finder (ADF), en inglés.

La Organización Internacional de Aeronáutica Civil, OACI, es una agencia de la Organización de Naciones Unidas que, entre otras funciones, promueve los reglamentos y normas únicos en la aeronáutica mundial a través de anexos. En su Anexo 10, referido a las Telecomunicaciones Aeronáuticas, la organización establece en el epígrafe 3.4.8, que debe existir un sistema de monitorización por cada NDB [2]. Cuya función sea realizar un chequeo continuo del radiofaro durante el tiempo de funcionamiento, tal que detecte, primero una disminución de la potencia de la portadora en más del 50% del valor necesario para mantener la zona de servicio clasificada; segundo, una falla en la transmisión de la señal de identificación; y por último un funcionamiento defectuoso o falla de los medios de control [2].

A los efectos de las últimas inspecciones realizadas por la OACI al IACC (Instituto de Aeronáutica Civil de Cuba), la empresa está incumpliendo con este epígrafe. Las radioayudas en Cuba se encuentran instaladas en estaciones no atendidas, o sea, no existe ningún personal técnico cerca; de ahí la necesidad de un sistema de monitorización para los equipos.

Los estudios de mercado arrojaron que la mayoría de las empresas proveedoras de este tipo de equipamiento suelen vender un sistema integrado de transmisor NDB y receptor de monitorización, lo cual representaría para la empresa sustituir las 26 estaciones instaladas en el país. Esta solución conllevaría una implementación bastante costosa en inversión y fuerza de trabajo. Por otro lado, se detectaron 2 empresas de reconocido prestigio que ofrecen el equipo de monitorización de NDB en la banda de 190 kHz a 1 750 kHz. El inconveniente radica en que las empresas son norteamericanas y por razones políticas sería imposible contratar sus servicios. La compañía Shanghai Advanced Avionics tiene instalado en los aeropuertos de China un sistema de control remoto capaz de monitorear hasta 16 NDB en un área, pero es solo de consumo nacional. La Tabla 1 ilustra el análisis realizado del mercado.

Tabla 1: Comparación de compañías proveedoras de transmisores y/o receptores NDB.

Nombre de Compañía	Procedencia	Años de Experiencia	Banda de Frecuencias	Productos
ASHCOM	Reino Unido	35	190-540 kHz	NDB
Interscan	Australia	7	190-1750 kHz	NDB
MOOG	Estados Unidos	63	190-1750 kHz	NDB
AirportSupplier	Reino Unido	23	190-1750 kHz	NDB
HSC System	Emiratos Árabes Unidos	13	190-1750 kHz	NDB
TELERAD	Francia	35	190-1750 kHz	NDB
SSA s.a.	Grecia	32	250-550 kHz	NDB
ShanghaiAdvancedAvionics	China	9	190-1750 kHz	NDB y Remoto Central
SouthernAvionicsCompany	Estados Unidos	51	190-1750 kHz	NDB y Monitor
Nautel NAV	Estados Unidos	45	190-1750 kHz	NDB y Monitor

La situación actual tributa a que la solución más factible es diseñar y construir un sistema de Recepción / Monitoreo de Radiofaros no direccionales en la banda de 190 a 650 kHz. Para esto se plantea la tarea de hacer un estudio de las especificidades técnicas de los NDB y de los equipos de monitorización que existen en el mundo.

La tecnología de Radio Definido por Software (SDR, *Software-Defined Radio*) es empleada por su flexibilidad de diseño. En hardware se implementa el acondicionamiento de la señal, mientras que en software las funcionalidades de procesamiento. Esta variante permite la implementación de diversas técnicas de detección, demodulación y decodificación empleando el mismo dispositivo, lo cual redundará en beneficios prácticos. En este sentido, el presente artículo analiza las facilidades de SDR que ofrece como solución para el diseño en una primera fase. En una segunda fase, estaría el diseño de las partes integrantes del receptor/monitor y la programación de un software para el procesamiento digital de la

señal. La solución obtenida debe permitir la escalabilidad del sistema para que pueda ser utilizado como monitorización de otras radioayudas. El presente artículo traza una línea de trabajo de acuerdo a las tareas planteadas, que conducirá a la construcción final del receptor de monitorización en un futuro mediato.

DESCRIPCIÓN DEL RADIOFARO NO DIRECCIONAL

El Radiofaro no direccional u omnidireccional NDB forma parte de un sistema de radiolocalización muy empleado en Cuba, a pesar de su obsolescencia en la aviación moderna, debido a su bajo costo y versatilidad. Constituye un trasmisor omnidireccional de una señal modulada en amplitud, donde la frecuencia de la portadora está en la banda de 190 kHz a 1750 kHz. Este sistema incluye además un receptor ADF a bordo del avión que emplea el principio de radiogoniometría para determinar la posición relativa y la dirección de la aeronave; basándose en la geolocalización del NDB conocida a priori.

Mayoritariamente existen 2 elementos esenciales en la señal emitida por el NDB: la portadora que le muestra al piloto el curso relativo que debe tomar hacia la estación NDB en comparación con la línea central del avión, denominada marcación; y un tono de audiofrecuencia que modula en amplitud a la portadora para transmitir de 1 a 3 letras de Código Morse Internacional, las cuales identifican a la estación [1]. El tono de modulación de frecuencia $1020 \text{ Hz} \pm 50 \text{ Hz}$ ó $400 \text{ Hz} \pm 25 \text{ Hz}$ se interrumpe por tiempos cortos o largos simulando los puntos y rayas que conforman las 3 letras en Código Morse [1]. La frecuencia de transmisión de la identificación debe ser tal que por lo menos se transmita 3 veces cada 30 segundos, a intervalos iguales en ese período de tiempo, o sea aproximadamente de 7 palabras por minuto, principalmente en los NDB con un radio de cobertura nominal igual o menor que 92.7 km (50 millas náuticas) [1]. Los períodos de tiempo se corresponden con el carácter a transmitir, o sea, un punto puede durar de 115 ms a 125 ms, mientras una raya demora de 345 ms a 375 ms. Por otro lado el espacio entre caracteres (punto o raya) demora lo mismo que un punto, así mismo el espacio entre letras es equivalente a la transmisión de una raya [1].

En el NDB, para que las características de las emisiones sean tales que se logre la identificación satisfactoria en el límite de la cobertura nominal, el índice de modulación debe ser elevado (95%) [1]. Además, la potencia de la portadora no debe disminuir, salvo en los radios medios de cobertura superiores a 92.7 km (50 millas náuticas) [1]. La antena del trasmisor NDB presenta un patrón de radiación omnidireccional, radiando la misma potencia en todas las direcciones (salvo en su vertical, donde presenta un nulo). La potencia va desde 20 W hasta varios kW [1].

En la actualidad, existe un grupo de trabajo del Departamento de Control Técnico y Desarrollo en la UEB Servicios Aeronáuticos, que trabaja en el diseño y construcción de diferentes modelos de radiofaros (NDB) en la banda de 190 kHz a 450 kHz. Estos se han ido perfeccionando para sustituir la red nacional de NDB (26 estaciones), y así obtener equipos de mayor calidad y eficiencia en el servicio a la navegación aérea. Las estaciones de radiofaros no direccionales incluyen transmisores duplicados de funcionamiento continuo y con transferencia automática [1]. Los transmisores tienen distinta frecuencia

de modulación: 1020 Hz y 400 Hz respectivamente. En tanto, el bloque de transferencia automática se encarga de conmutar entre uno y otro en caso de fallo del transmisor activo o cuando ha arrancado la planta por fallo en la alimentación de la estación [1]. Este bloque le provee una total autonomía a la estación pero no alerta a los técnicos de los desperfectos. Actualmente los técnicos dependen de las aeronaves dotadas de ADF para saber si el NDB está dando servicios.

De ahí que su control sea de especial interés en la aviación cubana, para el cumplimiento de las normativas y la garantía de la seguridad aeronáutica en el espacio aéreo cubano.

Se pretende al final aprovechar las características de propagación de los NDB para colocar equipos receptores de monitorización en los aeropuertos circundantes y retransmitir vía IP cada uno de los parámetros controlados hacia el Centro de Control Aéreo. De manera que en el Centro se realice la integración de la información de todos los equipos, para controlar remotamente todas las estaciones. Una solución efectiva para lograr todo esto con un gasto mínimo puede ser SDR.

CARACTERISTICAS DE DISEÑO DEL RECEPTOR DE MONITOREO

Los sistemas de Radio Definido por Software (SDR) están conformados por bloques con funcionalidades de radio implementadas en software. En el receptor la señal electromagnética (señal analógica o continua) que llega a la antena es convertida a señal digital con un conversor A/D. Las muestras digitales son llevadas a banda base con un DDC (Digital Down Converter) y pasadas al dispositivo que realizará el procesamiento digital: computadora de propósitos generales, FPGA (Arreglo de Compuertas Programables), microcomputadoras, microprocesadores, etc. La fortaleza principal de estos sistemas radica en su capacidad de reconfiguración.

Si se tiene en cuenta, que las estaciones NDB son no atendidas pero que, geográficamente y haciendo un análisis de cobertura, es posible colocar un equipo monitor en los aeropuertos circundantes, la solución SDR puede resultar muy atractiva. Al colocar una tarjeta acondicionadora de la señal en una computadora de la Sala Técnica del Aeropuerto o el Aeródromo es posible saber el estado de la estación. La computadora a emplear no requiere altas prestaciones: un microprocesador de más de 1 GHz con 500 MB de RAM, una tarjeta de audio (o audio en la placa base) de más de 44 kHz de frecuencia de muestreo, una entrada USB 2.0 (Bus Universal en Serie) o superior, trabajando sobre el Sistema operativo Windows XP o superior, de manera que pueda ser instalada la plataforma de programación MatLab 2011 o superior. La mayoría de las computadoras en los aeropuertos cumplen con estos requisitos por lo que no será preciso comprar nuevas máquinas para que funjan como receptores. Esta es una facilidad que hace viable el proyecto.

Esencialmente el receptor de monitorización en cuestión será el mostrado en la figura 1, compuesto por un receptor analógico, los conversores Analógico/Digital (A/D) y viceversa y el bloque de procesamiento digital. El receptor analógico no será más que el hardware que realizará las funciones resumidas en la figura 2. Esta tarjeta tendrá una entrada de radiofrecuencia conectada, a través de una línea de transmisión, a la antena; una salida de audio conectada a la entrada de línea estéreo de la tarjeta de sonido de la computadora y una entrada serie USB (Bus Serie Universal) desde donde recibirá alimentación y las instrucciones de control. Para la conversión A/D y viceversa se emplearán los

convertidores de la propia tarjeta de sonido. El procesamiento digital de la señal se programará en la propia computadora a través de un software compilado en MatLab.

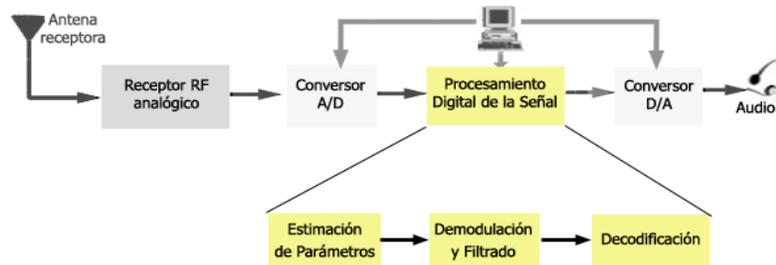


Figura 1: Diagrama en bloques del Receptor propuesto.

Funciones del receptor analógico

El receptor analógico tiene una estructura circuital como se muestra en la figura 2, sus salidas representan la envolvente compleja de la señal de entrada dadas por las ramas en fase y cuadratura. La función de este receptor está en detectar la señal, filtrarla para eliminar componentes fuera de banda. A las señales I y Q en cuadratura se les aplica un Control Automático de Ganancia con un amplificador operacional. Ambas señales son enviadas a la entrada de línea estéreo de la tarjeta de sonido de la computadora.

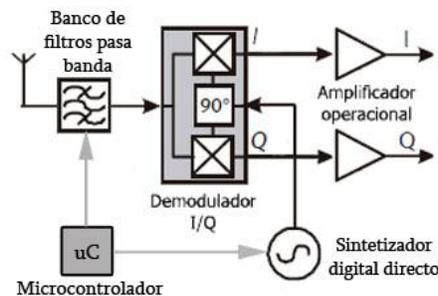


Figura 2: Esquema del receptor analógico.

Las señales analógicas I y Q se digitalizan con el conversor A/D de la tarjeta de audio a una frecuencia de 48 kHz y 16 bits de resolución, lo cual limita el ancho de banda de la señal de entrada a un máximo de 24 kHz según el criterio de Nyquist. Estas tarjetas tienen incorporado un filtro pasa bajo antisolapamiento previo a la conversión, para evitar que el ruido aditivo de las altas frecuencias se superponga con las componentes de baja frecuencia durante el muestreo.

El software ejecutado por la computadora contará con los 3 bloques de procesamiento mostrados en la figura 1: Estimación de parámetros, Demodulación y filtrado y Decodificación. El programa se desarrolló en MatLab y se comprobó su efectividad a partir de una señal simulada en el propio MatLab igual a la emitida por las estaciones NDB.

Métodos de estimación de parámetros

Previo a la demodulación es necesario aplicar una serie de técnicas que permitan el reconocimiento de los parámetros necesarios de acuerdo con lo establecido en el Anexo 10 de la OACI. Contribuye al análisis el saber de antemano que la señal $x(t)$ a recibir se trata de una portadora de radiofrecuencia $x_c(t)$ determinada por la expresión (1) que de manera intermitente es modulada en amplitud por un tono $x_m(t)$ expresado en la ecuación (2). La expresión (3) muestra el resultado de la modulación donde μ es la profundidad de la modulación y viene dada por la ecuación (4) [3].

$$X_c(t) = A_c \cdot \cos(\omega_c t) \quad (1)$$

$$X_m(t) = A_m \cdot \cos(\omega_m t) \quad (2)$$

$$X(t) = A_c(1 + \mu \cdot \cos(\omega_m t)) \cdot \cos(\omega_c t) \quad (3)$$

$$\mu = \frac{A_m}{A_c} \quad (4)$$

Dado que en un medio radioeléctrico es posible encontrar disímiles ondas electromagnéticas, para saber qué estaciones NDB se reciben desde una ubicación determinada y además controlar que exista transmisión constante de la portadora, es preciso emplear técnicas de detección de energía. Conjuntamente con esto, si se desea detectar la disminución de potencia de la portadora en más del 50% del valor necesario, se precisa de técnicas de estimación de potencia. Además, para estar alerta ante interrupciones en la transmisión de la señal de identificación se necesita extraer el índice de modulación. Una manera de saber si ha habido fallo en los transmisores o los medios de control es detectar y monitorizar la frecuencia de modulación, dado que está establecido que ante cualquier anomalía se conmutarán los transmisores. Es importante destacar que para comprobar la veracidad de los resultados de las técnicas de sensado de espectro aplicadas se generó una señal aperiódica que se asemeja a las enviadas por los sistemas NBD, solo que está libre de distorsión, desvanecimiento o ruido debido al canal.

Existe un gran número de métodos de sensado de espectro reportados en la literatura. Entre los más conocidos y de mayor utilización se encuentran el detector de energía (ED) [4] [5] [6] [7], el filtro adaptado [8] [9], el detector ciclo estacionario [10] [11], el detector basado en valores propios [12] entre otros. De estos métodos, el ED es el detector no coherente más simple reportado. Solo necesita una determinación previa del umbral para comparar la energía recibida y tomar la decisión de ocupación de la banda.

El ED puede ser aplicado a cualquier tipo de señal, incluso cuando sus parámetros son totalmente desconocidos [13] [14] [15]. Con el objetivo de determinar las estaciones que se reciben en un puesto de control se propone el empleo de un ED convencional, como el mostrado en la figura 3.

La decisión de detección está descrita completamente por las siguientes hipótesis [16]:

$$\begin{aligned} H_0: y[n] &= w[n] \\ H_1: y[n] &= x[n] + w[n] \end{aligned} \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

Donde $y[n]$ es la señal recibida a la salida del conversor A/D, $w[n]$ es el ruido blanco aditivo gaussiano (AWGN) del canal de media cero y varianza σ_n^2 , $x[n]$ es la señal modulada en amplitud emitida por la estación NDB y N es el número de muestras adquiridas en una ventana de observación que depende del tiempo de sensado, del ancho de banda de la señal y de la frecuencia de muestreo.

A la señal a la salida del conversor A/D (figura 1) se le calcula su potencia cuadrada y se promedia. El bloque *cuadrado y suma* requiere para su implementación de la varianza de ruido del entorno, parámetro que varía en dependencia de las condiciones climáticas, el deterioro de los equipos de captura, y otros factores que no son posibles controlar por el hombre. Para lograr un sistema de control automático es necesario estimar σ_n^2 .

El test estadístico que se comprueba es el planteado en el bloque decisión (figura 3), determinando que está ocupada la banda cuando se verifica la hipótesis H_1 .

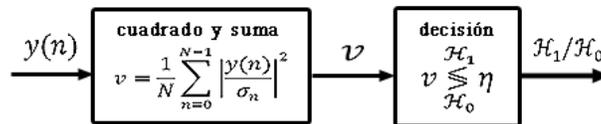


Figura 3: Esquema de un detector de energía convencional.

Para la estimación de la varianza de ruido se propone el algoritmo 1. Donde la señal $Y(w)$ es la transformada de Fourier de $y[n]$. Se recomienda usar ventanas con el 10% de las muestras totales de la señal.

Algoritmo 1 Estimación de la varianza de ruido

1. Realizar la FFT de $y[n]$.
2. Dividir en ventanas la señal $Y(w)$.
3. Crear un arreglo con los valores de potencia de cada ventana.
4. Organizarlo descendientemente.
5. Promediar los valores que se encuentran por debajo del 90% de energía.

A partir del umbral η se determinó donde inicia y termina el espectro. Si se ha trabajado bien en este método, se supone que el pico de amplitud esté en el centro de los valores definidos como inicio y fin [4]. Para comprobar el funcionamiento del ED diseñado se trabajó con una señal obtenida a partir de un receptor WINRADIO G313i sintonizado a la frecuencia del NDB UJM 339 kHz. Esta tarjeta entrega la señal con una frecuencia intermedia (FI) de entre 10 y 22 kHz muestreada a 48 kHz. De manera que la gráfica resultante del algoritmo 1 fue la mostrada en la figura 4, donde FI es de 11,15 kHz. Los puntos de intersección de la transformada de Fourier de la señal recibida con el umbral η definen la frecuencia de modulación f_m con un valor de 398 Hz (aproximado a 400 Hz, que corresponde a la frecuencia de modulación de uno de los transmisores de la estación). Este mecanismo se debe aplicar constantemente porque es esencial detectar a tiempo un cambio en el tono de modulación.

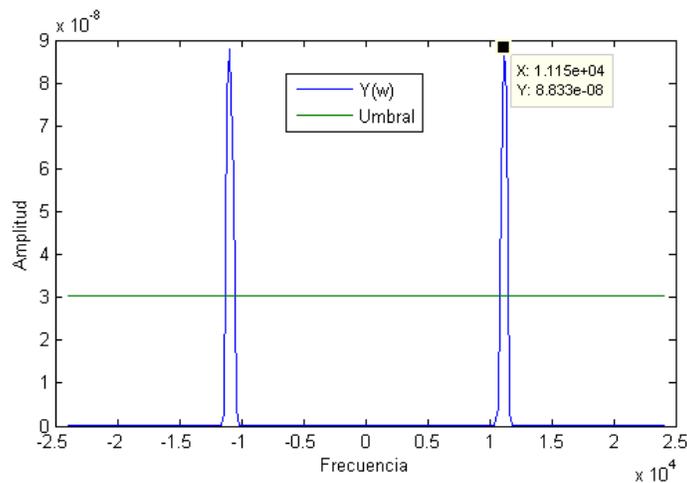


Figura 4: Gráficas de $Y(w)$ y η .

El cálculo de la potencia promedio es más sencillo y depende de la ecuación (6) [17]. Por su parte la amplitud de la señal se podría obtener despejando de la ecuación (7) [17]. Luego se compara la potencia calculada con la que se obtuvo como parte del cálculo del radioenlace a realizar luego de definir la ubicación exacta que tendrá el receptor. Para determinar el valor de potencia promedio de referencia es necesario tener en cuenta que la línea de transmisión y el hardware del receptor introducen pérdidas. Por otro lado, para el cálculo del radioenlace se debe comprobar desde la estación del NDB que los transmisores estén trabajando correctamente.

$$P = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x^2(n) \quad (6)$$

$$P = \frac{A_c^2}{2} \quad (7)$$

Para el caso de una señal ideal simulada en MatLab se definió el valor de A_c por 1 V implica un valor de potencia de $0.5V^2$, los resultados fueron $A_c = 1.0958V$ y $P = 0.6004V^2$. Lo cual da muestra de la efectividad del procedimiento aplicado. Con la gráfica de la señal en el dominio del tiempo es posible

obtener el índice de modulación μ de acuerdo con la ecuación (4). En la figura 5 la amplitud máxima de la onda en el período de tiempo donde la onda no esté modulada corresponde a A_c , mientras el máximo de amplitud en los intervalos donde se modula con un tono de frecuencia f_m es $(A_c + A_m)$. Estos valores no son absolutos, o sea, se deben hallar valores promedio de amplitud a partir de secciones en las que se divida la señal para su análisis. De esta manera se evita que fenómenos como la interferencia y el desvanecimiento provoquen resultados erróneos. El análisis anterior arrojó que $\mu=0,9502$ en un caso donde se moduló en amplitud la señal con una profundidad de 0.95.

Demodulación y filtrado de la señal

El diseño del receptor analógico de la señal incluye la demodulación en cuadratura de la misma, sin embargo, para un mejor análisis previo a la construcción del receptor se digitalizó este procedimiento. Como muestra la figura 2, para obtener las muestras ortogonales I y Q se multiplica la señal recibida $x(n)$ por ondas cosinusoidales y sinusoidales respectivamente generadas a la frecuencia de la portadora f_c . De manera que la amplitud y fase instantáneas (m_t y φ_t) [3] de la señal original podrían estimarse a través de las operaciones matemáticas (8) y (9) respectivamente:

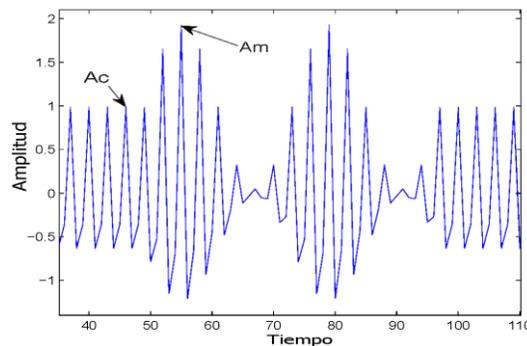


Figura 5: Gráfica de señal recibida en el dominio del tiempo.

$$m = \sqrt{I_t^2 + Q_t^2} \quad (8)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{Q_t}{I_t} \right) \quad (9)$$

La figura 7 muestra las gráficas de las señales en cuadratura I y Q en el dominio de la frecuencia que se obtienen a partir de la señal de la figura 6b. En los incisos c y d de la figura 7 se observa que se han eliminado las componentes de señal al doble de la frecuencia de la portadora, lo cual se logró luego de filtrar pasa bajo la señal con un filtro pasa bajo Kaiser [17] de frecuencia de corte $w_0 = 2\pi f_c$.

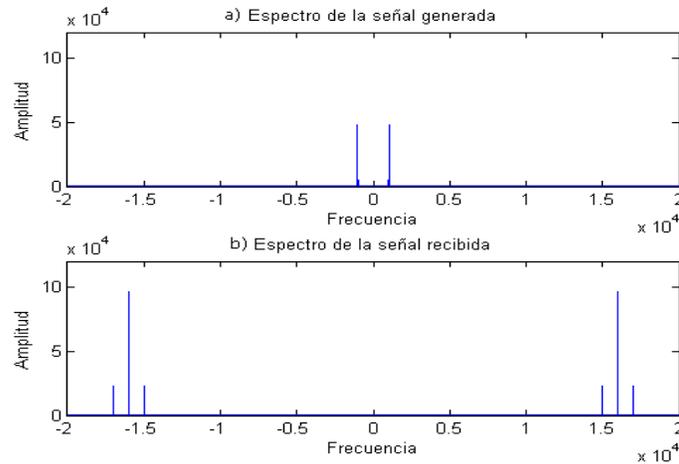


Figura 6: Espectros de a) señal transmitida y b) señal recibida.

La señal resultante que se observa en la figura 8a) corresponde a resolver la ecuación (8) con I y Q filtradas. Una vez realizada la demodulación en cuadratura solo resta eliminar la componente de directa que se generó durante la operación (3) en el transmisor. Para esto se aplica un filtro supresor (filtro Notch) a la frecuencia de corte $\omega_0 = 0$ [rad/s], cuya respuesta de frecuencia es la mostrada en la ecuación (10) [17].

$$H(z) = \frac{1+r^2}{2} \cdot \frac{1+2\cos(\omega_0)z^{-1}+z^{-2}}{1+(1+r^2)\cos(\omega_0)z^{-1}+r^2z^{-2}} \quad (10)$$

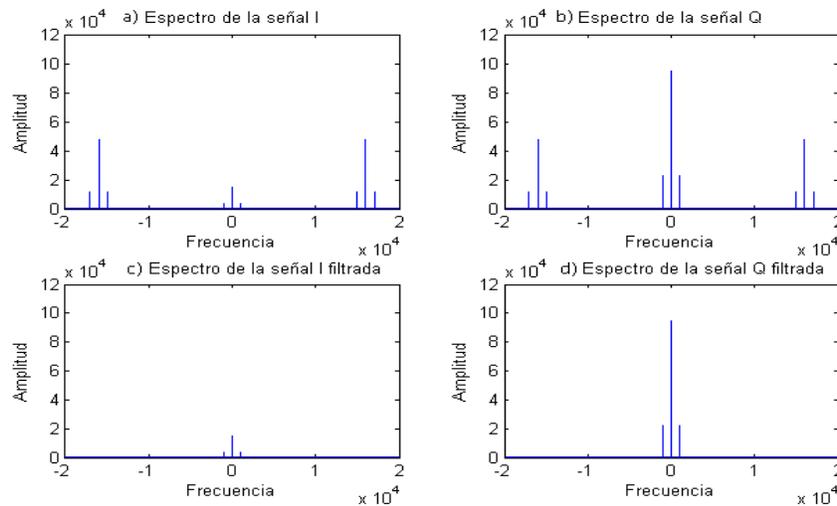


Figura 7: Espectros de las señales ortogonales I/Q antes y después del filtrado pasa bajo.

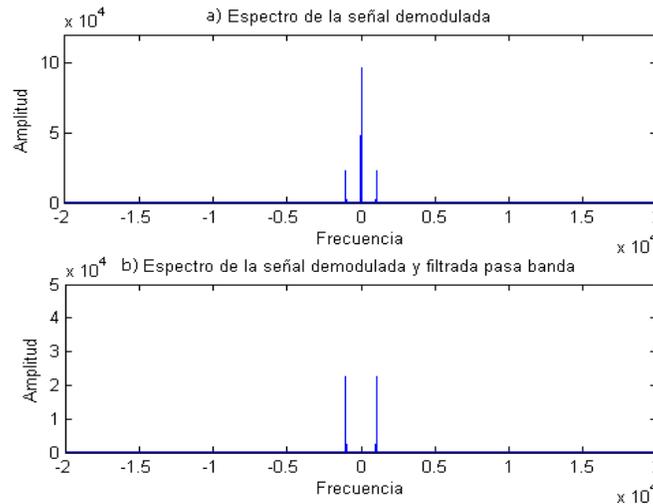


Figura 8: Espectros de a) señal demodulada y b) señal demodulada y filtrada con un supresor de banda.

Decodificación de la señal

Para el proceso de decodificación favorece mucho conocer previamente las características de la señal transmitida por el NDB. Se sabe que la identificación de un NDB consta de 3 letras en código Morse que se repiten ininterrumpidamente, o sea se trasmite una señal sinusoidal solamente durante el tiempo que no corresponde a los puntos y rayas de cada letra. Se procedió entonces a representar cada letra como un código binario de manera que un punto equivale a un 0 mientras una raya son tres ceros. Por otro lado, el intervalo entre símbolos se representó con un 1 y el espacio entre letras se rellena con tres unos.

Con el objetivo de reconocer un 0 o un 1 en el mensaje recibido es necesario establecer un valor umbral. Este valor se obtuvo extrayendo los máximos y los mínimos de la señal para luego promediar ambos valores por separado [18]; luego se halló la media entre ambos promedios [19].

Para mayor ilustración se muestra en la figura 9 gráficos obtenidos en MatLab que representan a la identificación del radiofaro UBA (Baracoa) con frecuencia de portadora 278 kHz y tono de modulación 1020 Hz, muestreada a 5 veces la frecuencia de la portadora. La figura 9a representa la señal recibida, generada a partir de los elementos que se conocen a priori de esta señal, su espectro corresponde con la figura 6a). La figura 8b) muestra las señales I y Q filtradas pasa bajo cuyos respectivos espectros son las figuras 7c) y 7d). La señal Q está alrededor de cero, puesto que la fase de la señal recibida es de cero grados. A la señal demodulada de la figura 9c) ya se le ha extraído la componente de directa mediante un filtro supresor, luego se ajusta con la muestra espectral de la figura 8b). Por último, la figura 9d) resultó de eliminar la frecuencia moduladora del módulo de la señal de la figura 9c), mediante un filtro Kaiser cuya frecuencia de corte es de $w_0 = 2\pi f_m/4$. Este procedimiento se realizó para extraer el mensaje de la onda recibida y facilitar la decodificación.

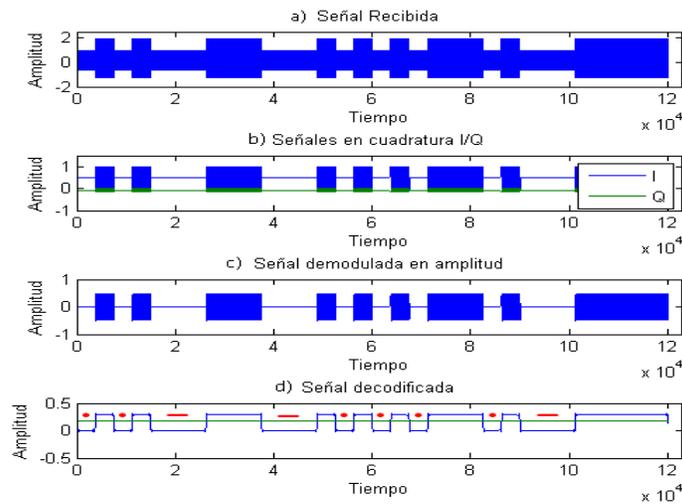


Figura 9: Gráficas en el dominio del tiempo de a) señal recibida modulada, b) señales I y Q, c) señal demodulada, d) señal decodificada y limite; para el radiofaro UBA.

Para llegar a la identificación de la estación de la cual se está recibiendo se hizo un seguimiento de los cambios de niveles de la señal, almacenando los tiempos en que está en 0 y en su valor máximo en una variable. Como se conoce que la transmisión de un carácter corresponde a los niveles nulos, se establece que el menor intervalo de tiempo en un estado corresponde a un 0, que representa a un punto en código Morse, luego serían tres ceros, que corresponde a la trasmisión de una raya. Por último el mayor intervalo de tiempo en un estado sería entre una identificación y otra, lo cual se codificó como cinco ceros. Estableciendo comparaciones con variables establecidas a partir de la codificación correspondiente a cada letra se puede obtener la identificación completa. En este tipo de señal periódica el proceso de sincronismo es esencial para obtener la secuencia correcta de ahí que debe prestarse especial interés durante el procesado digital.

Las potencialidades del receptor propuesto podrán ser ajustables y controlables por el propio usuario a través de una interfaz gráfica. De igual manera la señal recibida podrá ser escuchada a través de algún periférico, toda vez que la tarjeta de audio convierte nuevamente la señal obtenida en una señal analógica. El objetivo final será darle al técnico de guardia la posibilidad de conocer el estado de los transmisores NDB en tiempo real.

CONCLUSIONES.

Los servicios de navegación aérea están obligados a tener calidad máxima y garantizar los requerimientos necesarios y la seguridad aeronáutica. Un incumplimiento en las normativas de la OACI podría llevar a la pérdida de vidas humanas, de ahí la importancia de desarrollar este proyecto. El presente trabajo demuestra que es posible implementar una herramienta integrada y escalable de monitorización de las radioayudas a la navegación aérea, bajo una factura muy económica, empleando tecnología SDR.

En el marco de SDR, a partir de las técnicas de sensado de espectro se pueden programar líneas de códigos que permitan extraer la información suficiente de la señal recibida. El conocimiento previo del funcionamiento de los NDB facilita el trabajo de procesamiento, demodulación y decodificación para dar respuesta a los requerimientos de la OACI. Un primer paso después de este trabajo, sería llegar a la microelectrónica que conformará el hardware del sistema, y paralelamente, diseñar y construir la antena para recibir la señal del NDB. En un nivel más elevado está la programación de la interfaz de usuario con la plataforma de procesamiento de la señal y de control del receptor analógico, para la monitorización remota de la estación.

REFERENCIAS.

1. PINO, Orlando. "Manual NDB IACC 200W". ECASA, La Habana, 2010. 36 pp.
2. OACI. Anexo 10 - Telecomunicaciones Aeronáuticas. Canadá, 2010. Vol. 1.565 pp. ISBN 92-9194-778-4.
3. CARLSON, A. B.; CRILLY, P. B. *Communication Systems An introduction to Signal and Noise in Electrical Communications*, 5ta ed. New York: Mc-Graw Hill Inc, 2009. 768 pp. ISBN 0-07-126332-2.
4. PRIDHAM, R.; URKOWITZ, G. H. "Energy detection of unknown deterministic signals". *Proceedings of the IEEE*, Ago. 1968, vol. 56, núm. 8, pp. 1379–1380.
5. KOSTYLEV, V. "Energy detection of a signal with random amplitude". En actas de IEEE International Conference on Communications, 2002, vol. 3, pp. 1606–1610.
6. DIGHAM, F. F.; ALOUINI, M.S.; SIMON, M. K. "On the Energy Detection of Unknown Signals Over Fading Channels". *IEEE Transactions on Communications*, Ene. 2007, vol. 55, núm. 1, pp. 21-24.
7. CHEN, Y. "Improved energy detector for random signals in gaussian noise," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Feb. 2010, vol. 9, núm. 2, pp. 558–563.

8. TANDRA, R.; SAHAI, A. "SNR Walls for Signal Detection". *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Feb. 2008, vol. 2, núm. 1, pp. 4–17.
9. POLYDOROS, A.; DAGRES, I. "Estimation-based noise-robust sensing". En actas de 7th International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2012, pp. 362–366.
10. CHEN, H.; VARSHNEY, P. K. "Theory of the Stochastic Resonance Effect in Signal Detection; Part II: Variable Detectors". *IEEE Transactions on Signal Processing*, Oct. 2008, vol. 56, núm. 10, pp. 5031–5041.
11. SAGGAR, H.; MEHRA, D. K. "Cyclostationary Spectrum Sensing in Cognitive Radios Using FRESH Filters". *Advances in Wireless Cellular Telecommunications: Technologies & Services*. New Delhi, 2011.
12. ZENG, Liaoyuan; MCGRATH, Sean; LIU, Guanghui. "Cognitive ultra wideband radio spectrum sensing window length optimization algorithm". *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Enero 2014, vol. 2014, núm. 1.
13. URKOWITZ, H. "Energy detection of unknown deterministic signals". *Proceedings of the IEEE*, Abr. 1967, vol. 55, núm. 4, pp. 523–531.
14. UMAR, R; SHEIKH, Auh; DERICHE, M. "Unveiling the Hidden Assumptions of Energy Detector Based Spectrum Sensing for Cognitive Radios". *IEEE Communications Surveys Tutorials*. 2014, vol 16, núm. 2, pp. 713-728.
15. PATIL, C. S.; KARHE, R. R.; NIKAM, M. T. "A Survey of spectrum sensing techniques for cognitive radio networks". *IJATES*, Ago. 2014, vol. 2, núm. 8, pp. 517-524.
16. KAY, S. *Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volumen II: Detection Theory*, Ed.1 Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall, 1998.
17. OPPENHEIM, A.V.; SCHAFER, R.W. *Discrete-time signal processing*. Upper Saddle River: Pearson, 2010. 1136 pp. ISBN 0-13-198842-5.
18. RAMAN, Deep; SINGH, N. P. "An Algorithm for Spectrum Sensing in Cognitive Radio under Noise Uncertainty". *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 2014, vol. 7, núm. 3, pp. 61–68.
19. WANG, B.; LIU, K. J. R. "Advances in Cognitive Radio Networks: A Survey". *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Feb 2011, vol. 5, núm. 1, pp. 5–23.