

ESTUDIO DE LA IONOSFERA CON SEÑALES DE MUY BAJA FRECUENCIA (VLF)

R. Ezequiel García^{1,2} - Guillermo D. Rodríguez^{1,2} - Leonardo Navarra^{1,2}

regarcia@fcaglp.unlp.edu.ar

¹Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (UNLP) Paseo del Bosque S/N La Plata

²Facultad de Ingeniería (UNLP) 1 y 47 La Plata
Argentina

RESUMEN

El plasma ionosférico es uno de los medios que atraviesan las ondas electromagnéticas en su ingreso desde el espacio exterior hacia la tierra, por lo que, un cabal conocimiento del comportamiento del mismo permite en consecuencia un mejor dimensionamiento de los sistemas de comunicaciones satelitales.

Para el estudio de la ionosfera existen diferentes técnicas en tierra y a bordo de misiones, las cuales en forma complementaria permiten la caracterización de esta. Una de estas técnicas es el análisis de propagación de señales de muy baja frecuencia (Very Low Frequency, VLF) para el estudio de la parte baja de la ionosfera.

Desde hace casi un siglo la propagación de ondas en la banda de VLF ha sido estudiada principalmente con fines estratégicos de comunicaciones. Es bien conocida la influencia que ejerce la ionosfera baja sobre estas ondas electromagnéticas para casos de propagación a grandes distancias ya que la misma se produce a través del canal conformado por la superficie de la tierra y la parte baja del plasma. Dado que existen emisoras, principalmente en el hemisferio norte, que emiten señales VLF de alta potencia capaz de propagarse miles de kilómetros, una técnica de observación utiliza la recepción de estas señales y sus fluctuaciones de intensidad con la finalidad de establecer la dinámica de la ionosfera baja y los fenómenos a los cuales pueden estar asociados.

El presente trabajo describe los desarrollos utilizados para la recepción de señales VLF y un primer análisis de las señales registradas por una estación de recepción experimental instalada en la ciudad de La Plata (34°54'30"S 57°55'54"O) en el año 2020.

1.- INTRODUCCION

La ionosfera es un estrato de la atmósfera que se encuentra entre aproximadamente los 60 Km y los 1000 km conformada por un plasma, con especies atómicas que difieren con la altura.

Este plasma ionosférico es uno de los medios que atraviesan las ondas electromagnéticas provenientes del espacio exterior en dirección a la tierra y un cabal conocimiento del comportamiento del mismo trae aparejado en consecuencia un mejor dimensionamiento de los sistemas de enlace.

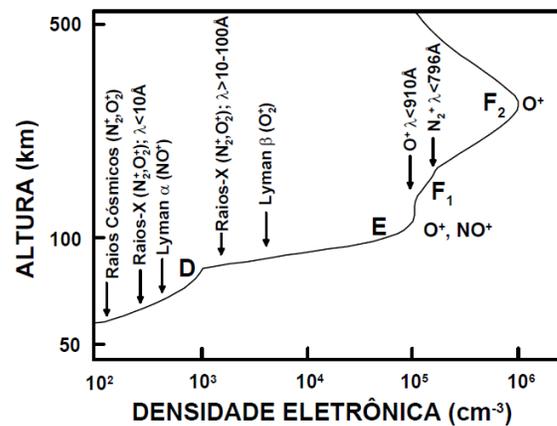


Figura 1: Perfil de densidad electrónica

La principal fuente de ionización, para la formación del plasma, es el sol y en menor medida los rayos cósmicos. Estas fuentes combinadas con la distribución de las especies con la altura provocan que la ionosfera tenga una estructura estratificada, con capas denominadas F, E y D y C, en orden descendente en altura. En la figura 1 podemos observar la distribución de la densidad electrónica con la altura con las distintas capas, los agentes y la especie ionizada [1].

La expresión del campo eléctrico para una onda electromagnética que se propaga a través de un medio de índice de refracción n es representada por la fórmula 1, donde ω es la pulsación de la onda, t el tiempo, c es la velocidad de la luz y x la distancia recorrida por la onda

$$E_{(x,t)} = k.e^{i\omega\left(t-\frac{n}{c}x\right)} \quad (1)$$

En el caso de un plasma en presencia de un campo magnético como es la ionosfera terrestre el índice de refracción se puede modelar por medio de la fórmula de Appleton-Hartree-Lassen (fórmula 2) [2]

$$n^2 = (\mu - i\chi)^2 = \quad (2)$$

$$1 - \left\{ \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y^2 \sin^2 \theta}{2(1 - X - iZ)} \pm \left[\frac{Y^4 \sin^4 \theta}{4(1 - X - iZ)^2} + Y^2 \cos^2 \theta \right]^{0.5}} \right\}$$

$$X = \frac{\omega_p^2}{\omega^2} = \frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m_e \omega^2} \quad Y = \frac{\omega_H}{\omega} = \frac{eB}{m_e \omega} \quad Z = \frac{\nu}{\omega}$$

Donde

θ = ángulo entre la onda incidente y el vector campo magnético terrestre

N_e : Densidad de electrones

e : carga del electrón

ϵ_0 : permitividad eléctrica del vacío

m_e : masa del electrón

ω : Frecuencia angular de la onda electromagnética incidente

B : valor de inducción del campo magnético

ν : Frecuencia de colisión entre electrones y partículas neutras

Para el caso que consideremos despreciables los efectos del campo magnético y la frecuencia de colisión, el índice de refracción puede aproximarse a la fórmula 3 siendo f_p la llamada frecuencia de plasma que viene dado por la fórmula 4:

$$n^2 = 1 - \left(\frac{f_p}{f} \right)^2 \quad (3)$$

$$f_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m_e}} \approx 9\sqrt{N_e} \quad (4)$$

La onda se propagará con una atenuación

$$Att = \frac{e^2}{2m_e c \epsilon_0 \mu} \frac{N_e \nu}{\left[\nu^2 + (\omega \pm \omega_H \cos \theta)^2 \right]} \left[\frac{Np}{m} \right] \quad (5)$$

Analizada la fórmula 3 podemos observar que, para ciertos valores de frecuencia y una determinada densidad electrónica, el índice de refracción tomaría valores negativos, representando que para dicha frecuencia se produce la reflexión total.

Existen variadas técnicas de radiofrecuencia que, utilizando los principios físicos que enumeramos posibilitan el estudio de la ionosfera [3]. Entre dichas técnicas se encuentra el análisis de la propagación de señales, el cual se aborda en este trabajo.

2.- METODOLOGIA

En el caso de señales de la banda VLF (Very Low Frequency) 3 a 30 KHz, la propagación se realiza por el canal atmosférico conformado por la superficie de la tierra y la parte baja de la ionosfera, lugar donde las ondas

son reflejadas en esta banda de frecuencia dada la densidad electrónica del plasma (Figura 2).

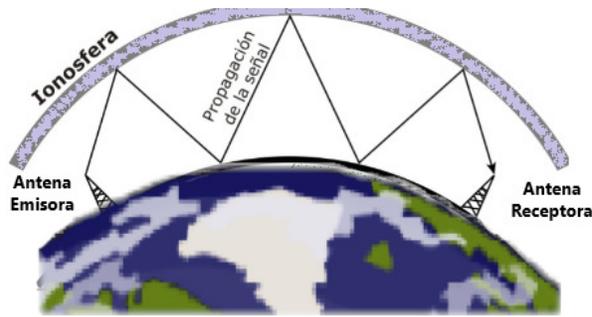


Fig. 2: propagación señales VLF

Puesto que uno de los límites de la guía de onda es la ionosfera, la propagación será dependiente de eventos ordinarios como la hora del día, estación del año, estadio del ciclo solar y de fenómenos extraordinarios llamados SID (Sudden ionospheric disturbances) como son precipitación de partículas, fulguraciones solares de rayos X y precipitación de meteoritos.

Una técnica de observación utiliza la recepción de señales VLF para a través de analizar los cambios que sufren estas en su propagación, inferir cambios en el plasma Ionosférico y los fenómenos a los cuales pueden estar asociados.

3.- DESARROLLO

Con la finalidad de poder iniciar el estudio de la ionosfera con técnicas VLF se emprendió el desarrollo de un receptor iniciando las primeras mediciones experimentales en la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la UNLP (34°54'30"S 57°55'54"O).

En la figura 3 podemos observar el sistema de recepción acoplado al sistema de adquisición y en la figura 4 la instalación experimental, antena junto con el abrigo del equipo.

Analizadas las distintas señales recibidas considerando la relación señal a ruido, nos enfocamos en la adquisición de dos estaciones emisoras la NAA (Cuttler, Maine EEUU) de 21,4 KHz y NPM (Lualualei, Hawai, EEUU) de 24 KHz, Figura 5 y 6, realizándose el registro de potencia en dB de cada una de ellas

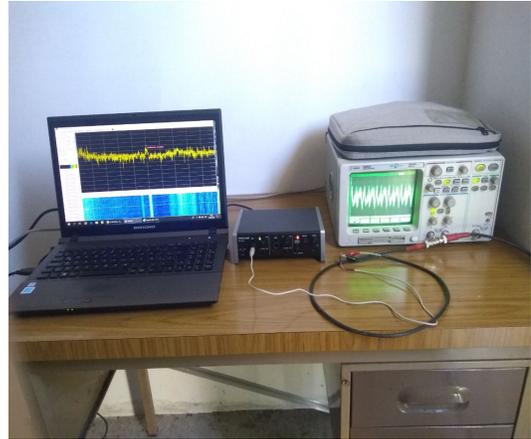


Figura 3: Sistema de recepción y registro

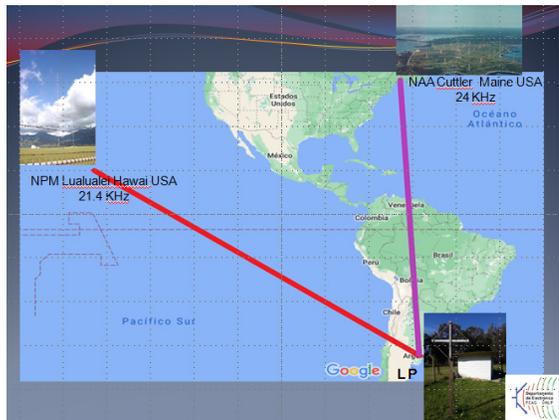


Figura 4: Antena junto al abrigo del equipo



Fig. 5: Estaciones receptionadas

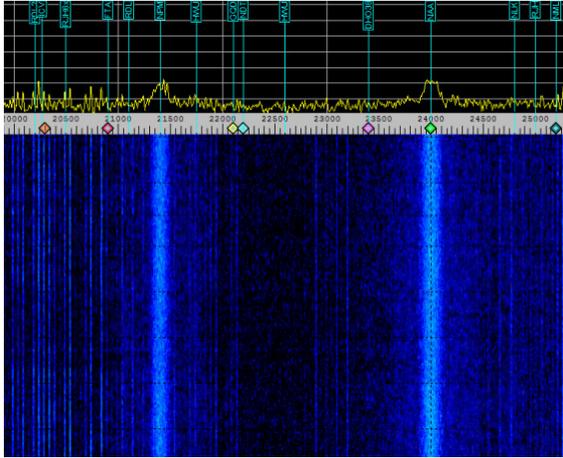


Fig. 6: Espectrograma de recepción de las dos emisoras.

En la figura 7 y la figura 8 se observa el valor medio de la potencia recibida durante 24 hs en 10 días para cada una de las estaciones en tiempo UTC.

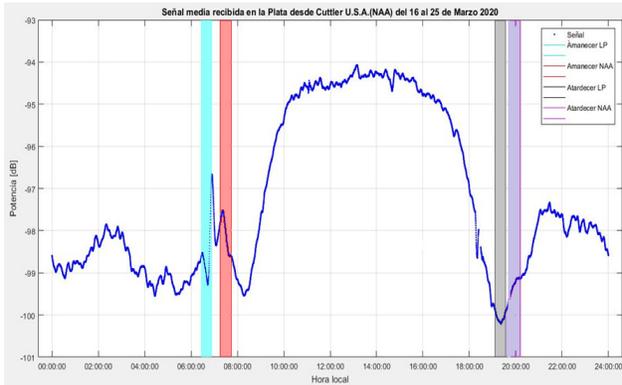


Fig. 7: Recepción media desde NAA

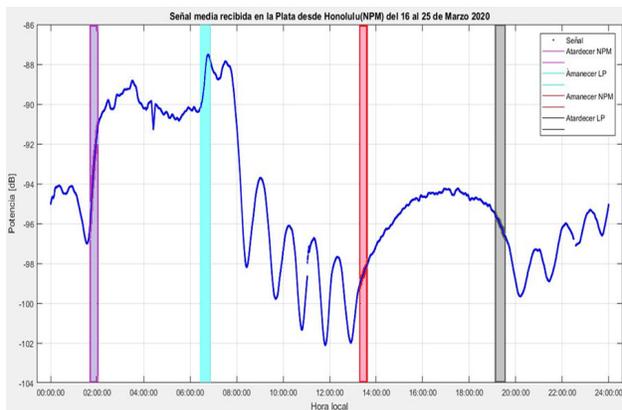


Fig. 8: Recepción media desde NAA

Sobre cada una de las graficas se observan bandas con diferentes colores que representan el amanecer y anochecer para las estaciones emisoras y la ciudad de La Plata, a saber: celeste amanecer en La Plata (celeste), amanecer en estación emisora (rojo), anochecer la plata (gris) y anochecer estación emisora (púrpura).

Estas marcaciones nos delimitan 4 bandas horarias con características diferentes de propagación de la señal, entre amaneceres, entre anocheceres, la noche y el día.

En las gráficas se destaca el fenómeno oscilatorio en la potencia recibida durante la recepción entre amaneceres y anocheceres, haciéndose más evidente en la señal desde Maine debido a la diferencia horaria. Este fenómeno fue explicado por primera vez por Crombie [4], quien modeló al canal de propagación como una guía de onda con una altura variable entre el día y la noche.

Durante el día, por ser menor la altura de reflexión, solo posee importancia el modo fundamental de propagación mientras que, durante la noche, al aumentar la altura empiezan a tomar relevancia modos superiores de propagación. Entre amaneceres y anocheceres la línea día-noche se mueve entre las estaciones produciendo que parte del camino de propagación se encuentre de noche y otra parte de día variando su largo con el tiempo. En la figura 9 representamos la situación por ejemplo entre amaneceres,

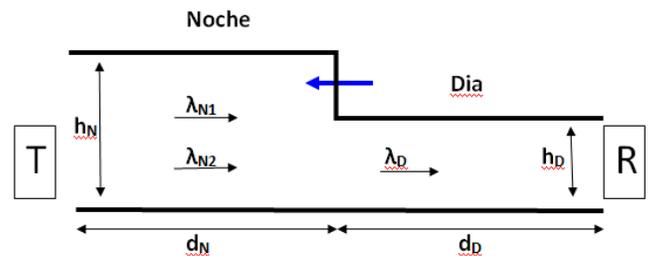


Fig. 9: línea de amanecer avanzando entre estaciones

avanzando la línea de día desde La Plata (Receptor) hacia Lualualei (Transmisor), en el sector nocturno con altura h_N y longitud d_N . Además del modo fundamental λ_{N1} , consideramos que aquí toma importancia un modo superior de

propagación λ_{N2} , en tanto que en la parte del camino diurno con longitud d_D , la altura h_D es menor convirtiéndose las señales del sector nocturno al modo fundamental de propagación λ_D .

Finalmente, al receptor llegan dos señales E_{R1} y E_{R2} resultando la señal recibida:

$$E_R = E_{R1} + E_{R2} \quad (6)$$

Siendo:

$$E_{R1} = aE \cos \left(\omega t - 2\pi \frac{d_N}{\lambda_{N1}} - 2\pi \frac{d_D}{\lambda_D} \right) \quad (7)$$

$$E_{R2} = bE \cos \left(\omega t - 2\pi \frac{d_N}{\lambda_{N2}} - 2\pi \frac{d_D}{\lambda_D} \right) \quad (8)$$

Con a y b constantes que representan las amplitudes de los distintos modos.

Al receptor llegarán estas señales con distinta fase produciéndose aportes constructivos y destructivos, dependiendo esta diferencia de fase de las porciones de camino diurno y nocturno y variando entonces la señal resultante a medida que avanza la línea del amanecer, dando como respuesta una recepción oscilatoria en esos tramos del día.

Por último, analizando las recepciones diarias, en el tramo en el que el camino es totalmente diurno la señales muestran poca dispersión, al contrario, a lo ya analizado cuando el camino es totalmente nocturno.

CONCLUSIONES

En base a este trabajo se puede concluir que el sistema de recepción desarrollado trabaja en forma correcta, observándose que las señales recibidas en la ciudad de La Plata desde NPM y NAA muestran en general un comportamiento a lo largo del tiempo con bajo nivel de interferencia, permitiendo apreciar la recepción de dichas señales acorde a la teoría de propagación de señales VLF, lo cual permitirá realizar análisis del comportamiento del plasma ionosférico en su dinámica diaria, estacional y cíclica solar.

REFERENCIAS

[1] BANKS, P.M.; KOCKARTS, G. (1973) **Aeronomy**. Part A y B.

[2] DAVIES, K. (1990) **Ionospheric radio**.

[3] HUNSUCKER R.D. (1991) **Radio Techniques for probing the terrestrial ionosphere**.

[4] CROMBIE, D. D. (1964) **Periodic fading of VLF signals received over long paths during sunrise and sunset**, J. Res. Natl. Bur. Stand., Sect. D, 68, 27-34, 1964.