

# Chapter 1

## EFECTO DE LA IONÓSFERA

En este trabajo trataremos acerca de la importancia de una de las capas de la atmósfera llamada "ionósfera" y cuáles son sus efectos en el rubro de las telecomunicaciones, cómo es que influye en las señales de radio entre otras formas de comunicaciones. Así como comprender como es que nos beneficia el uso de esta capa para tener la mayor eficiencia al tratar de transmitir las ondas electromagnéticas.

### 1.1 Introducción

Los primeros experimentos de sondeo de la ionósfera fueron realizados con finalidades científicas (tales como descubrir las causas y características de la reflexión y absorción en las capas de la ionosfera). Sin embargo, la gran expansión de las redes de comunicaciones durante la Segunda Guerra Mundial llevo a la conclusión de que era necesario realizar predicciones de las condiciones de radio propagación en todo el mundo en un momento dado. La ionosfera juega un papel crucial en las telecomunicaciones. Sus propiedades, que incluyen la capacidad de reflejar y refractar ondas electromagnéticas, pueden afectar significativamente la transmisión de señales a través de largas distancias. En esta exposición se explora cómo la interacción de las ondas de radio con la ionosfera influye en la calidad de las comunicaciones, así como los desafíos que presenta para la tecnología actual. A través de un análisis de sus efectos y los avances en la tecnología de telecomunicaciones, se destaca la importancia de comprender estos fenómenos para asegurar una comunicación efectiva a nivel global.

### 1.2 Propagación en un medio Ionizado

La ionosfera es una región de la atmósfera terrestre que se extiende aproximadamente desde los 60 km hasta más de 1000 km de altitud, caracterizada por la presencia de partículas ionizadas —principalmente electrones libres y iones positivos— generadas por la radiación ultravioleta y de rayos X del Sol. Este medio ionizado tiene un impacto significativo en la propagación de ondas electromagnéticas, particularmente en las bandas de radiofrecuencia utilizadas en telecomunicaciones.

La interacción entre las ondas de radio y la ionosfera depende principalmente de la frecuencia de la señal, la densidad de electrones en el medio y el ángulo de incidencia. En ciertas condiciones, las ondas de baja y media frecuencia pueden reflejarse en la ionosfera, lo que permite la comunicación a larga distancia más allá del horizonte (propagación de tipo skywave). Este fenómeno es aprovechado por servicios como la radiodifusión AM, la radioafición y algunas comunicaciones militares.

Sin embargo, la ionósfera también introduce efectos no deseados en las señales de telecomunicación, especialmente en las bandas altas como VHF, UHF y microondas, que son utilizadas por satélites, GPS y enlaces de microondas terrestres. Entre los principales efectos se encuentran:

- **Dispersión y refracción:** La velocidad de propagación de las ondas varía con la densidad electrónica, lo que provoca desviaciones en la trayectoria de las señales, afectando su precisión.
- **Retrasos de propagación (retardo ionosférico):** Las señales de alta precisión, como las del sistema GPS, pueden experimentar errores en la medición de distancias debido a la variación del índice de refracción en la ionosfera.
- **Absorción:** En la capa D de la ionosfera, las ondas de baja frecuencia pueden ser fuertemente atenuadas, sobre todo durante el día, cuando la ionización es mayor.
- **Desvanecimiento (fading):** La variación en la densidad de electrones, especialmente durante tormentas solares o actividad geomagnética, puede causar variaciones en la intensidad de la señal recibida.
- **Dispersión Doppler y multicamino:** El movimiento relativo entre la fuente y el receptor, junto con la estructura variable de la ionosfera, puede inducir efectos Doppler y la aparición de múltiples trayectorias de una misma señal.

### 1.3 Influencia en el campo magnético terrestre

El campo magnético de la Tierra, o geomagnetismo, es una característica fundamental no solo de la configuración de la Tierra, sino que también afecta su protección y regulación en interactuar con el entorno espacial. Su efecto no se restringe solamente a la protección, puesto que comprende desde la ionosfera hasta los sistemas tecnológicos modernos.

#### Interacción con la Ionosfera

Como medio ionizado que contiene corrientes eléctricas arrastradas por el movimiento de las unidades cargadas, la ionosfera es un conductor. No obstante, este tipo de corrientes está subordinado a la acción de la tierra. Recordar que el magnetismo sirve de marco que estructura el movimiento de estas partículas cargadas.

#### Formación de Corrientes Eléctricas

- **Corriente del electrojet ecuatorial:** en la región ecuatorial, las partículas cargadas fluyen hacia el este debido al campo magnético horizontal más fuerte. Este flujo de partículas da lugar a una tremenda corriente eléctrica conocida como el electrojet ecuatorial que afecta la propagación de señales de radio y navegación.
- **Corrientes aurorales:** En las áreas polares, las partículas cargadas del viento solar son guiadas por líneas de campo magnético hacia la ionosfera donde producen potentes corrientes eléctricas asociadas con la aurora boreal y la aurora austral.
- **Corrientes inducidas geomagnéticamente (GIC):** Durante las tormentas geomagnéticas, las fluctuaciones en el campo magnético de la Tierra inducen corrientes en la ionosfera y en la superficie terrestre. Tales corrientes pueden impactar infraestructuras tecnológicas, como redes eléctricas y oleoductos.

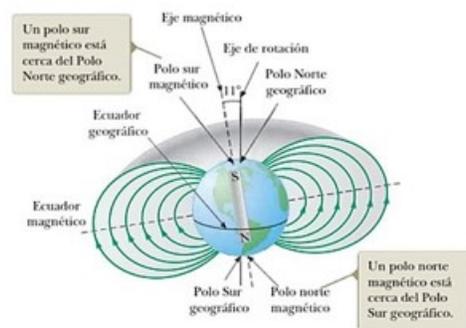


Figure 1.1: Campo Magnético y función en la propagación

El campo magnético terrestre guía las partículas cargadas hacia los polos magnéticos, lo que influye en la distribución y densidad de la ionización en la ionósfera.

la mezcla del campo magnético de la tierra y la dispersión en la ionosfera tiene usos importantes ya que ayuda a transportar las comunicaciones gracias al campo magnético terrestre que actúa como un imán como en la imagen [1].

## 1.4 Comunicaciones Ionosféricas

La comunicación ionosférica se aprovecha de las propiedades de la ionosfera para reflejar ondas de radio, lo que permite la transmisión a grandes distancias sin necesidad de satélites. En frecuencias bajas (LF y VLF), la ionosfera actúa como un límite que refleja las ondas en la parte baja, formando una guía de ondas junto con la superficie terrestre. Esto facilita la propagación a miles de kilómetros. A frecuencias más elevadas (MF y superiores), la onda penetra en la ionosfera y su trayectoria se curva por refracción hasta regresar a la Tierra, en un fenómeno comúnmente llamado "reflexión ionosférica" [2].

Para que esta reflexión ocurra, se debe cumplir la ley de Snell con condiciones específicas de densidad de ionización y ángulo de incidencia. La frecuencia máxima utilizable (MUF) depende de estos factores y determina si una señal podrá reflejarse en la ionosfera o atravesarla. También existen limitaciones en la distancia mínima y máxima alcanzable, influenciadas por la capa en la que se produce la reflexión (E, F1 o F2) [2].

Este tipo de comunicación es muy utilizado en la banda de HF, ya que en MF la capa D absorbe la señal durante el día. Históricamente, la comunicación ionosférica fue clave para las telecomunicaciones de larga distancia, aunque ha sido desplazada por los satélites en muchas aplicaciones modernas. Aun así, sigue siendo una opción económica y efectiva, especialmente utilizada por radioaficionados [2].

### 1.4.1 Propagación en bandas bajas (LF y VLF):

- La ionosfera actúa como un límite que refleja las ondas en su parte baja, formando junto con la superficie terrestre una especie de guía de ondas
- Permite alcanzar distancias de entre 5.000 y 20.000 km con poca variabilidad en la propagación.

### 1.4.2 Propagación en bandas medias y altas (MF y HF):

- La onda penetra en la ionosfera, donde la densidad de ionización aumenta con la altitud, alcanzando un máximo entre los 300 y 500 km.

### 1.4.3 Condiciones de Reflexión Ionosférica

Para que la onda regrese a la Tierra, debe cumplirse la ley de Snell:

$$n \sin \theta = \frac{v_e}{v_i} \quad (1.1)$$

Donde:

( $n$ ) es el índice de refracción,

( $\theta$ ) es el ángulo de incidencia,

( $v_e$ ) y ( $v_i$ ) son las velocidades en la ionosfera y el medio inferior.

Esta ecuación se puede transformar en:

$$\cos \theta = \frac{f_p}{f} \quad (1.2)$$

Siendo:

- ( $f_p$ ) la frecuencia de plasma de la ionosfera,
- ( $f$ ) la frecuencia de la onda incidente.

#### 1.4.4 Frecuencia Máxima Utilizable (MUF)

La Frecuencia Máxima Utilizable (MUF) es la mayor frecuencia en la que una onda puede reflejarse en la ionosfera y regresar a la Tierra. Se calcula como:

$$MUF = f_p \cdot \frac{1}{\sin \theta} \quad (1.3)$$

Si la frecuencia utilizada supera la MUF, la señal atravesará la ionosfera sin reflejarse.

#### 1.4.5 Distancia Mínima y Máxima en Propagación Ionosférica

La distancia cubierta en un enlace ionosférico depende de la altura virtual de reflexión. Para una capa con altura  $h$ , la distancia mínima es:

$$d_{\min} = 2h \sqrt{\frac{f_p^2}{f^2} - 1} \quad (1.4)$$

Mientras que la distancia máxima alcanzable, considerando la curvatura terrestre y la refracción atmosférica, se aproxima a 4.000 km en una única reflexión. Para llegar más lejos, se emplean reflexiones múltiples entre la ionosfera y la superficie terrestre.

### 1.5 Ejercicios

#### 1.5.1 Ejemplo 1: Cálculo de la Frecuencia Máxima Utilizable (MUF)

En una comunicación ionosférica, la Frecuencia Máxima Utilizable (MUF) es la frecuencia más alta en la que una onda puede reflejarse en la ionosfera y regresar a la Tierra. Si se usa una frecuencia mayor a la MUF, la onda atravesará la ionosfera sin reflejarse. Dado un ángulo de incidencia de ( $30^\circ$ ) y una frecuencia de plasma de ( $4, MHz$ ), Calcular la MUF usando la ecuación:

$$MUF = f_p \cdot \frac{1}{\sin \theta} \quad (1.5)$$

- Para una comunicación ionosférica, la Frecuencia Máxima Utilizable (MUF) se obtiene con la ecuación:

$$MUF = f_p \cdot \frac{1}{\sin \theta} \quad (1.6)$$

- Si la frecuencia de plasma es  $f_p = 4 \text{ MHz}$  y el ángulo de incidencia es  $\theta = 30^\circ$ , entonces:

$$MUF = 4 \times \frac{1}{\sin 30^\circ} = 4 \times 2 = 8 \text{ MHz} \quad (1.7)$$

Por lo tanto, señales con frecuencia de hasta 8 MHz podrán reflejarse en la ionosfera. Si se usa una frecuencia mayor, la onda atravesará la ionosfera sin retornar.

### 1.5.2 Ejemplo 2: Cálculo de la Distancia Mínima para Reflexión Ionosférica

La distancia mínima que una onda puede recorrer antes de reflejarse en la ionosfera se calcula con:

$$d_{\text{mín}} = 2h \sqrt{\frac{f_p^2}{f^2} - 1} \quad (1.8)$$

Dado una onda con frecuencia de (10, MHz), reflejada en la capa E, con frecuencia de plasma ( $f_p = 2.84, \text{ MHz}$ ) y altura de reflexión ( $h = 110, \text{ km}$ ), calcular ( $d_{\text{mín}}$ )

- Dado los valores:

$$h = 110 \text{ km}, \quad f_p = 2.84 \text{ MHz}, \quad f = 10 \text{ MHz} \quad (1.9)$$

Entonces:

$$d_{\text{mín}} = 2 \times 110 \times \sqrt{\frac{(2.84)^2}{(10)^2} - 1} \quad (1.10)$$

$$= 220 \times \sqrt{\frac{8.0656}{100} - 1} \quad (1.11)$$

$$= 220 \times \sqrt{0.080656 - 1} \quad (1.12)$$

$$= 210.26i \quad (1.13)$$

Si el resultado dentro de la raíz es negativo, significa que "la señal no se refleja en esta capa", por lo que se necesitaría otra capa ionosférica con una mayor frecuencia de plasma. Si el resultado es imaginario, la frecuencia de la onda es demasiado alta para que la capa ionosférica en cuestión la refleje. En este caso, se necesitaría una capa con una mayor densidad de ionización para que la reflexión ocurra[2].

# Bibliography

- [1] Marín, J. A. T., “Análisis y desarrollo matemáticos de modelos de propagación ionosférica. aplicación al control automático de transceptores de hf,” Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica de Madrid, 1992.
- [2] autores, L., *Antenas y Propagación*. Edicions UPC, 2002.
- [1] “ANTENNA AND WAVE PROPAGATION: IONOSPHERIC FADING EFFECT”. SlideShare. Accedido el 11 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible: <https://es.slideshare.net/slideshow/antenna-and-wave-propagation-ionospheric-fading-effect/248226820>
- [2] Iván Álvarez Vázquez Juan Carlos Cid Prado Felipe Abarca García. “Efectos De la Ionosfera”. Studocu. Accedido el 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-autonoma-de-la-ciudad-de-mexico/propagacion-y-antenas/efectos-de-la-ionosfera-en-telecomunicaciones-exposicion-uacm/126293360>