ESTUDIO DEL FENÓMENO DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS A PARTIR DEL FUNCIONAMIENTO DE LAS ANTENAS HELICOIDALES Y MAGNÉTICAS CIRCULARES

Por: **Valentina Rodríguez Mejía**

Documento presentado como requisito para optar al título de: **Licenciado en Física**

Asesor: **Fernando Isidro Espitia Castañeda**

Universidad Pedagógica Nacional
Facultad de Ciencia y Tecnología
Departamento de Física

Bogotá D.C., 2025

Agradecimientos

A mi mamá, por ser mi fuerza constante. Por creer en mí incluso cuando yo no lo hacía, por impulsarme a crecer, a confiar en mí misma, y a descubrir que soy capaz de mucho más de lo que imagino. Gracias por tu presencia silenciosa pero poderosa, por cada taza de té, por cada noche en vela en la que estuviste a mi lado, simplemente para acompañarme. Este trabajo también es tuyo.

A mi asesor, por caminar conmigo en este proceso, incluso sin saber desde el inicio cómo trabajábamos mutuamente. Gracias por tu paciencia, tu guía y tu humanidad durante cada encuentro. En medio de largas jornadas, nuestros descansos de cinco minutos se convirtieron en espacios donde reír, compartir historias y tomar fuerzas para seguir. Gracias por hacer del trabajo algo amable y compartido.

A la Fundación Cydonia, por abrirme las puertas al mundo de las antenas y darme el primer impulso que definió el rumbo de esta investigación. Y al Observatorio de la Universidad Tecnológica de Pereira, por brindarme apoyo justo cuando más lo necesitaba, por ofrecerme un espacio para continuar y fortalecer este trabajo cuando las dificultades parecían mayores.

A mis compañeros y compañeras, por tomarse el tiempo de leer mi tesis con ojos atentos y con voluntad de ayudarme a mejorar. A quienes, con sus palabras, su cariño y su compañía, me recordaron día a día que no estaba sola, que todo iba a estar bien, y que sí era posible terminar. Gracias por confiar en mí incluso en los momentos en los que yo dudaba.

A todas estas personas, gracias por ser parte de este camino. Esta tesis es el reflejo no solo de mi esfuerzo, sino del acompañamiento y amor que recibí en cada paso.

Índice general

Introducción **1**

Problema de investigación . . . 1

Objetivos . . . 3

Objetivo General . . . 4

Objetivos Específicos . . . 4

Antecedentes . . . 4

1. Radioastronomía **6**

1.1. Explorando la radioastronomía . . . 6

1.1.1. Radioastronomía en Colombia . . . 9

1.2. Breve revisión cronológica del electromagnetismo . . . 12

1.3. Ondas electromagnéticas . . . 14

1.3.1. Espectro electromagnético . . . 20

1.3.2. Ondas de radio . . . 22

1.4. Radiotelescopios . . . 24

2. Antenas helicoidales y de bucle **28**

2.1. Antenas de alambre . . . 28

2.1.1. Patrón de radiación y su eficiencia . . . 31

2.1.2. Densidad de potencia de radiación e intensidad de radiación . . . 35

2.1.3. Ancho de haz y su eficiencia . . . 37

2.1.4. Directividad . . . 39

2.1.5. Ganancia . . . 40

2.1.6. Ancho de banda . . . 42

2.1.7. Polarización . . . 43

2.2. Antena Helicoidal . . . 45

2.2.1. Geometría y modos de operación de una antena helicoidal . . . 47

2.3. Contextualización de la Antena Helicoidal 49
2.3.1. Especificaciones de diseño 51
2.4. Antena Magnética Circular 52
2.5. Contextualización de la Antena Magnética Circular 53
2.5.1. Especificaciones de diseño de la Antena Magnética Circular 54
2.6. Proceso de interacción radiación - materia 56

3. Análisis de Señales de Radio **60**
3.1. Calibración y procesamiento de la señal 60
3.2. Software empleado 62
3.3. Contextualización de los datos del OAUTP 65
3.3.1. Interpretación de los ejes en la gráfica de Radio SkyPipe 66
3.4. Interpretación de los datos de la NOAA 67
3.4.1. Geostationary Satellite Server 68
3.4.2. Space Weather Prediction Center 69
3.5. Análisis de gráficas de detecciones solares 70
3.6. Implicaciones de la actividad solar en nuestro entorno 76
3.6.1. Consideraciones finales 79

Conclusiones **82**

Bibliografía **84**

Índice de figuras

1.1. Efecto Doppler, desplazamiento de las líneas espectrales de la luz 7

1.2. Radiación cósmica de fondo (CMB) 8

1.3. Antenas de Chocontá 10

1.4. Agujero negro M87 11

1.5. Condensador de placas paralelas 16

1.6. Representación del espectro electromagnético, destacando la luz visible y la relación entre longitud de onda y frecuencia 21

1.7. Nebulosa del Cangrejo, vista desde diferentes partes del espectro electromagnético 22

1.8. Funcionamiento de un radiotelescopio 26

2.1. Antena de alambre 29

2.2. Patrón de antena en coordenadas polares y escala de potencia lineal 32

2.3. Patrón de campo normalizado bidimensional y patrón de potencia en escala lineal 33

2.4. Lóbulos de radiación y anchos de haz de un patrón de antena 34

2.5. Efecto de un polarizador sobre una onda para obtener una polarización lineal . . 43

2.6. Tipos de polarización de ondas transversales 44

2.7. Ejemplo de polarización de una onda electromagnética 45

2.8. Descripción de una antena helicoidal 48

2.9. Patrones de potencia lineal de amplitud normalizada tridimensionales para diseños helicoidales en modo normal y modo axial 49

2.10. HAdEES-C 50

2.11. Antena Helicoidal 51

2.12. Ejemplo de antenas magnéticas circular redonda y cuadrada 52

2.13. Descripción de una antena magnética circular isoloop 55

2.14. Parámetros físicos y eléctricos de la antena isoloop diseñada 56

3.1. Diagrama de bloques del radiotelescopio desarrollado en el OAUTP 60

3.2. Diagrama de bloques del receptor de radio ondas del proyecto Radio Jove de NASA 61
3.3. Barra de Herramientas Radio SkyPipe 64
3.4. Ventana de opción en la barra de tareas Radio SkyPipe 64
3.5. Detección solar por medio del software Radio SkyPipe 67
3.6. Detección solar del GOES 68
3.7. Detección solar del SWPC 69
3.8. Detección solar de los días 4-5 de abril de 2016 70
3.9. Sexto registro solar del día 5 de abril de 2016 (15:00-17:59 UTC) 71
3.10. Registro solar del GOES del día 5 de abril de 2016 (15:00-18:00 UTC) 72
3.11. Base de datos del SWPC del día 5 de abril de 2016 73
3.12. Detección solar de los días 21-22 de noviembre de 2015 74
3.13. Registro solar del día 21 de noviembre de 2015 ((12:00-16:00) UTC) 74
3.14. Registro solar del GOES del día 21 de noviembre de 2015 (12:00-16:00 UTC) . . 75
3.15. Base de datos del SWPC del día 21 de noviembre de 2015 75
3.16. Clasificación de las llamaradas solares 76
3.17. Escalas de clima espacial de la NOAA 77

Introducción

El fenómeno de las ondas electromagnéticas, y en particular las ondas de radio, constituyen herramientas esenciales tanto para el estudio del universo como para el desarrollo tecnológico. En el ámbito educativo, su comprensión permite vincular la teoría física con aplicaciones concretas a través de dispositivos como los radiotelescopios.

La motivación que dio origen a este estudio nace de una experiencia personal donde se tuvo acceso directo a una antena helicoidal. A partir de esa inmersión inicial, surgió el interés por ampliar la investigación, abordando no solo su estructura y funcionamiento, sino también su capacidad para captar y procesar señales de origen astronómico y sus implicaciones científicas y educativas.

En consecuencia, el documento se organiza en tres capítulos para abordar los aspectos anteriormente expuestos.

En el capítulo 1 se abordan los fundamentos esenciales para comprender la radioastronomía. Se presenta una breve revisión histórica del desarrollo de esta rama de la ciencia, así como del electromagnetismo, cuyos principios físicos sirven como base para entender su funcionamiento. A lo largo del capítulo se explican conceptos clave como las ondas y el espectro electromagnético, con énfasis en las ondas de radio. Finalmente, se examina el funcionamiento de los radiotelescopios, destacando su diseño y los componentes fundamentales que hacen posible su operatividad.

Con base en estos principios, el Capítulo 2 profundiza en los aspectos técnicos y conceptuales necesarios para comprender el papel de las antenas en la captación de señales de origen astronómico. En particular, se enfoca en el análisis de dos tipos específicos de antenas de alambre tenidas en cuenta para este trabajo: las antenas helicoidales y las antenas de bucle magnético circular. Se describe su funcionamiento, así como sus principales características técnicas y su contexto.

En el Capítulo 3 se presentan y analizan los datos experimentales suministrados por la Universidad Tecnológica de Pereira mediante el uso de un radiotelescopio equipado con una antena magnética circular tipo isoloop, con énfasis en la detección de emisiones solares. Las señales captadas se interpretan a través de gráficos y se contrastan con eventos solares registrados por organismos como la NOAA. Además, se comparan registros de distinta intensidad para evidenciar la utilidad del sistema en el estudio de fenómenos astronómicos y se resalta su impacto sobre nuestro entorno.

Como cierre, se presentan las conclusiones construidas a partir del análisis realizado, junto con la bibliografía que respalda los contenidos abordados.

Problema de investigación

La comprensión del universo ha sido, desde siempre, una de las inquietudes más profundas del ser humano. Este interés ha impulsado el desarrollo de múltiples ramas de la ciencia orientadas a

desentrañar los misterios del cosmos. Dentro de este amplio campo, el estudio del Sol ha cobrado especial relevancia debido a su influencia directa sobre la Tierra. Tal influencia ha generado la necesidad de crear instrumentos capaces de analizar los efectos solares con precisión. En este contexto, los radiotelescopios —antenas diseñadas para captar ondas de radio provenientes del espacio— se posicionan como herramientas fundamentales. Estas ondas, una vez amplificadas por receptores especializados y procesadas mediante software adecuado, permiten un análisis detallado de los fenómenos solares y de otros cuerpos celestes.

Gracias a estos avances tecnológicos, se ha logrado identificar que el Sol posee regiones activas que pueden generar distintos fenómenos, como emisiones de ráfagas solares, eyecciones de masa coronal y variaciones en el viento solar. Todos ellos tienen efectos considerables sobre la atmósfera superior terrestre y pueden incidir directamente en los sistemas de comunicación y navegación. Como señala (Parra, 2023) en National Geographic España, estas manifestaciones de la actividad solar pueden provocar fluctuaciones en el voltaje de las redes eléctricas, fallos intermitentes en el sistema GPS y alteraciones en la órbita de satélites de baja altitud, lo que afecta su movimiento, velocidad y trayectoria.

Si bien la Tierra cuenta con la protección del campo magnético, que mitiga en gran parte estos efectos, en el espacio exterior, la situación es muy distinta. Allí, uno de los principales retos es proteger a los seres humanos de la radiación solar directa, cuya exposición prolongada puede tener consecuencias biológicas graves, equiparables a las de enfermedades cancerígenas. Por ello, como afirma (Espinoza, 2023), resulta esencial contar con instrumentos capaces de detectar esta radiación, con el fin de anticiparse a sus efectos y salvaguardar la salud de los astronautas.

En este sentido, el estudio del clima espacial se convierte en un componente clave para el diseño y la ejecución de misiones espaciales. Comprender las condiciones del entorno *heliosférico*[1] es vital, no solo para garantizar la seguridad de futuras misiones a la Luna o Marte, sino también para proteger los sistemas tecnológicos que las sustentan. En particular, las comunicaciones son altamente vulnerables a la actividad solar, ya que las perturbaciones electromagnéticas pueden interferir con las señales de radio, degradar la transmisión de datos o incluso interrumpir por completo la conexión entre naves, satélites y centros de control en la Tierra. Anticiparse a estos fenómenos es, por tanto, esencial para asegurar el éxito y la continuidad de las operaciones espaciales.

La capacidad de monitorear en tiempo real los efectos del clima espacial se vuelve entonces indispensable durante las misiones. Esta vigilancia permite a las tripulaciones tomar decisiones informadas y adoptar medidas preventivas frente a eventuales riesgos. En este marco, la incorporación de instrumentos de detección en contextos de simulación análoga adquiere un valor pedagógico y técnico especial, al permitir la puesta a prueba de protocolos, el perfeccionamiento de estrategias y el fortalecimiento de la preparación ante eventos solares extremos.

A nivel formativo, la fenomenología desempeña un rol crucial en la comprensión de los fenómenos físicos, ya que facilita la conexión entre la teoría y la experiencia directa. Entender cómo funcionan los instrumentos científicos aporta una dimensión complementaria al estudio teórico. Por ejemplo, para comprender el funcionamiento de una antena, es imprescindible conocer las propiedades de las ondas que capta, como su amplitud y frecuencia. La física no se limita al estudio abstracto de la naturaleza, sino que también se manifiesta en los dispositivos que utilizamos para investigarla y en la comprensión del funcionamiento de los mismos. En este sentido, los instrumentos no solo miden o detectan, sino que también hacen tangible lo que de otro modo sería inaccesible. Así, analizar el funcionamiento de una antena permite profundizar en la comprensión

[1] Región espacial que se encuentra bajo la influencia del viento solar y su campo magnético.

de las ondas electromagnéticas y de los principios físicos que las rigen.

Desde esta perspectiva, se puede afirmar que "los experimentos que se diseñen deben propiciar que los alumnos profundicen en el conocimiento de un fenómeno, mediante la teoría y la experimentación a la vez, con lo cual tienen la posibilidad de desarrollar habilidades y actitudes propias de la investigación" (Carreras y cols., 2007).

En coherencia con este enfoque, en el Departamento de Física de la Universidad Pedagógica Nacional se presentan dos problemáticas importantes en relación con el estudio práctico de las ondas electromagnéticas. Por un lado, existe una carencia de equipos específicos que permitan a los estudiantes una detección directa de estas ondas. Por otro, se advierte una escasa documentación accesible sobre el funcionamiento de los dispositivos disponibles y su interacción con las señales que captan.

Si bien el presente trabajo no pretende resolver la primera de estas dificultades —relativa a la dotación de equipos—, sí se enfoca en la segunda: la falta de material que facilite la comprensión del funcionamiento de estos instrumentos. Por tanto, este proyecto busca constituirse en un recurso útil para los futuros maestros del Departamento de Física, al ofrecer una guía para el estudio de antenas de alambre, en particular, las helicoidales y las de *bucle*[2]. La intención es que este trabajo sirva como punto de partida para la generación de nuevas iniciativas que fortalezcan la enseñanza y la investigación en esta área.

Adicional a lo anterior, se debe tener en cuenta que la aplicabilidad del conocimiento científico es clave para lograr un aprendizaje significativo. En este sentido, el estudio de los radiotelescopios brinda una herramienta alternativa que favorezca la comprensión de conceptos como las ondas electromagnéticas. Más allá de una explicación puramente teórica, mostrar cómo estos fenómenos se manifiestan en contextos reales y tecnológicos permite a los estudiantes entender mejor su utilidad. Tal como se ha señalado en (Katzkowicz y Salgado, 2006) el conocimiento científico adquiere sentido para los estudiantes cuando se les muestra en contextos reales, tecnológicos o sociales. Esta aplicabilidad permite no solo comprender mejor, sino también desarrollar actitudes positivas hacia la ciencia.

Desde esta perspectiva, es pertinente que los docentes en formación no solo conozcan contenidos específicos como los radiotelescopios, sino que cuenten con herramientas para identificar y comunicar las aplicaciones concretas de los principios físicos que enseñan. Esta capacidad didáctica contribuye tanto a la comprensión como a la motivación del estudiantado, al mostrar que la ciencia está presente en tecnologías reales que transforman el mundo, como no lo deja saber (Acevedo, 2004)

Teniendo en cuenta lo anterior, surge la siguiente pregunta problema que centra la investigación.

¿Cómo a partir del funcionamiento de un radiotelescopio, equipado con una antena de alambre, se puede generar un estudio complementario del fenómeno de las ondas electromagnéticas?

[2] A lo largo del documento, se utilizarán indistintamente los términos "antena de lazo", "antena de bucle", "antena magnética circular" o "magnético circular isoloop" para referirse al mismo tipo de antena.

Objetivos

Objetivo General

Realizar un estudio complementario del fenómeno de las ondas electromagnéticas, enfocado específicamente en las ondas de radio, a través del análisis del funcionamiento de un radiotelescopio equipado por una antena de alambre.

Objetivos Específicos

1. Realizar una revisión bibliográfica que permita establecer las generalidades de la radioastronomía, el uso de los radiotelescopios y su relación con las ondas electromagnéticas.

2. Explicar el funcionamiento de las antenas de alambre, en particular, las antenas helicoidales y de bucle, con el propósito de describir el proceso de detección de ondas electromagnéticas.

3. Analizar los registros obtenidos a partir de un radiotelescopio dotado de una antena magnética circular Isoloop, para identificar las manifestaciones de la actividad solar y evaluar sus implicaciones en nuestro entorno.

Antecedentes

Como soporte para la realización del trabajo de grado, se hizo una búsqueda de antecedentes que servirán de guía para alcanzar los propósitos planteados en el presente proyecto. A continuación, se presentan los tres principales.

Construcción de un radiotelescopio pequeño para la exploración solar en centros de interés, Pinzón, J. y Cabrera, J., Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá D.C., 2023: Este trabajo describe la construcción de un pequeño radiotelescopio en un contexto escolar, con el fin de que los estudiantes involucrados comprendan claramente los elementos que componen este tipo de instrumentos, resaltando el proceso de ensamblaje y sus aplicaciones en el ámbito educativo. Además, muestra cómo, a partir de elementos de bajo costo, es posible llevar al aula instrumentos que incentivan el aprendizaje y fomentan el desarrollo de habilidades experimentales. Sin embargo, a diferencia de la presente investigación, no se centra en la explicación detallada del proceso de detección de ondas electromagnéticas ni en la comprensión del fenómeno de interacción entre la radiación y la materia que ocurre en la antena.

Protótipo de um sistema de predição de tempestades solares, Cristino, R., Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Dourados, MS, 2020: Este trabajo describe el desarrollo de un sistema computacional para la predicción de tormentas solares, a partir del procesamiento de datos recolectados por antenas, con el fin de que los estudiantes comprendan cómo los fenómenos solares pueden ser analizados mediante técnicas de inteligencia artificial, específicamente redes neuronales. Resalta el valor formativo de los radiotelescopios no solo como instrumentos de observación, sino también como fuentes de datos útiles para el análisis de eventos físicos y climáticos espaciales. Es de resaltar que el presente trabajo, brinda un enfoque adicional ya que uno de sus ejes centrales es la construcción y caracterización experimental de antenas,

además de profundizar en la apropiación de los fundamentos físicos implicados en la detección de ondas electromagnéticas.

Design and development of a solar radio interferometer of two elements, Guevara, C., Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., 2013: Este trabajo describe el diseño e implementación de un radiointerferómetro solar de dos elementos, con el fin de articular conocimientos de ingeniería electrónica y física solar en un entorno universitario, resaltando el potencial de la radioastronomía como herramienta formativa en la enseñanza del electromagnetismo. Además, muestra cómo la observación de la radiación solar puede ser un vehículo para abordar contenidos avanzados en física, fortaleciendo la investigación científica y tecnológica en el país. Pero no se centra en el uso de materiales de bajo costo ni resalta cómo el estudio del funcionamiento de los instrumentos aporta en la comprensión de un fenómeno físico puntual como es el de las ondas electromagnéticas, las cuales son temáticas centrales en el presente trabajo de grado.

En conjunto, estos antecedentes permiten reconocer la diversidad de enfoques desde los cuales se ha abordado la observación solar mediante radiotelescopios: desde propuestas escolares centradas en la apropiación conceptual básica, hasta desarrollos universitarios de mayor complejidad técnica y computacional. La presente investigación se posiciona en un punto intermedio, integrando las antenas con fines educativos y científicos, con énfasis en la comprensión del fenómeno físico de la detección de ondas electromagnéticas en el marco de propuestas educativas contextualizadas.

Si bien los antecedentes proporcionan un marco investigativo general a partir de estudios previos sobre radiotelescopios, es importante destacar que no constituyen un marco metodológico para esta investigación. Sirven como una base referencial útil para comprender el contexto en torno al estudio de las antenas y radiotelescopios, pero no son un punto de partida para el desarrollo del presente trabajo.

Capítulo 1

Radioastronomía

1.1. Explorando la radioastronomía

La astronomía es una ciencia que estudia la formación, evolución y características de los cuerpos celestes más allá de nuestra atmósfera, como el Sol, los planetas, cometas, estrellas, galaxias y el propio universo. Esta disciplina no solo nos permite comprender nuestro lugar en el cosmos, sino que también ha tenido un impacto cultural significativo a lo largo de la historia de la humanidad.

"Desde un punto de vista esencialmente práctico, la astronomía ha ofrecido importantes aportaciones al progreso humano tales como nuestro calendario y el sistema de cronometraje. La verdad es que una gran parte de las matemáticas de uso cotidiano, por ejemplo la trigonometría, los logaritmos y el cálculo, son frutos de la investigación astronómica, como también lo son muchos de los fundamentos de la estadística" (Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), 2015, p. 15).

De acuerdo con lo planteado por (Secretaría de Extensión de la Universidad Nacional de La Plata, 2017), en la actualidad existen observatorios equipados con telescopios capaces de explorar todo el espectro electromagnético, el cual abarca una amplia variedad de ondas con características extraordinariamente diversas, que incluyen no solo la luz visible, sino también las ondas de radio, los rayos X, los rayos gamma, la radiación infrarroja, la radiación ultravioleta, entre otras.

Cada una de estas longitudes de onda revela diferentes aspectos de los objetos celestes, proporcionando información valiosa sobre su composición, estructura y comportamiento, por ejemplo, a través del efecto Doppler relativista.

El efecto Doppler es un fenómeno que hemos experimentado en situaciones cotidianas, como cuando escuchamos el sonido de una ambulancia acercándose y luego alejándose, lo que provoca un cambio en la frecuencia de su sirena. Este efecto, que influye tanto al sonido como a la luz, se debe a la variación en la longitud de onda de las ondas emitidas: cuando el objeto emisor se acerca, la longitud de onda disminuye y la frecuencia aumenta; cuando se aleja, la longitud de onda aumenta y la frecuencia disminuye.

En el caso del sonido, esto se percibe como un cambio en el tono: el sonido se vuelve más agudo cuando la fuente se acerca y más grave cuando se aleja. Sin embargo, en el caso de la luz, este cambio en la longitud de onda se traduce en un corrimiento al rojo (si el objeto se aleja) o al azul (si se acerca).

El efecto Doppler relativista es una extensión de este fenómeno que considera los efectos de la relatividad especial cuando los objetos se mueven a velocidades cercanas a la de la luz. En este caso, el corrimiento espectral no solo depende de la velocidad del objeto, sino también de la dilatación del tiempo experimentado por el emisor en movimiento.

Este efecto es fundamental en cosmología para comprender la expansión del universo y en experimentos con partículas en aceleradores. Fue Edwin Hubble, quien primero demostró que la mayoría de las galaxias presentan un corrimiento al rojo, lo que confirma la expansión del cosmos. Un ejemplo notable del corrimiento de las líneas espectrales se

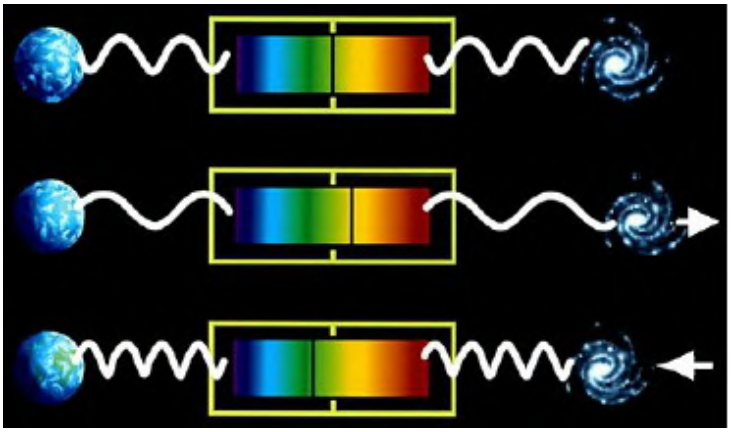


Figura 1.1: [Efecto Doppler, desplazamiento de las líneas espectrales de la luz]. Tomado de Un nuevo capítulo en la expansión del universo, 2016. Recuperado de https://astronomia.com.ar/un-nuevo-capitulo-en-la-expansion-del-universo/.

encuentra en la observación de las galaxias lejanas, como se puede apreciar en la figura 1.1. En la situación inicial, la línea espectral aparece en la región del verde del espectro visible, lo que sugiere que la galaxia y la Tierra se encuentran a una misma distancia. En la parte central, la línea espectral se ha desplazado hacia el rojo, indicando que la galaxia se está alejando. Por el contrario, si la galaxia se estuviese acercando, la línea espectral se desplazaría hacia el azul, como se muestra en la parte inferior de la figura.

Con base en este corrimiento, los astrónomos pueden determinar el movimiento y la velocidad de los objetos celestes en el universo. De manera similar se usa en la búsqueda de exoplanetas, los cambios en el espectro de una estrella pueden delatar la presencia de planetas en su órbita.

El estudio de los espectros electromagnéticos no solo ha sido clave para comprender el movimiento de galaxias y exoplanetas, también ha permitido grandes avances en la radioastronomía. Un hito fundamental en este campo de la radioastronomía fue el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo de microondas en 1964, una evidencia crucial del Big Bang.

"Los ingenieros estadounidenses Arno Penzias y Robert Wilson, de los Laboratorios Bell en New Yersey, estaban adaptando una antena de radio para la recepción de señales de los primeros satélites de comunicaciones, cuando registraron un "ruido" inesperado" (Varela, 2020).

Habían detectado una señal de microondas que no podían identificar. Inicialmente, se pensó que la señal podría ser debido a interferencias o ruido de fondo en el equipo, pero después de diversas pruebas y correcciones, se dieron cuenta de que la señal era una constante a través del cielo, sin importar la dirección en la que apuntara el telescopio.

Además, no se originaba en ninguna fuente localizada, sino que parecía venir de todo el universo.

La señal que encontraron coincidía con las predicciones hechas por los cosmólogos Ralph Alpher y Robert Herman en 1948, quienes habían calculado que el universo en sus primeros momentos debió estar muy caliente y denso, y que la radiación emitida en esa época debió quedar atrapada en forma de microondas. Es por esto que este hallazgo no solo confirmó la existencia de esta radiación cósmica de fondo, como se muestra en la figura 1.2, sino que ha permitido a los científicos reconstruir cómo era el cosmos en sus primeros momentos, revolucionando nuestra comprensión del universo, asentando la teoría del origen del universo tal como la conocemos hoy.

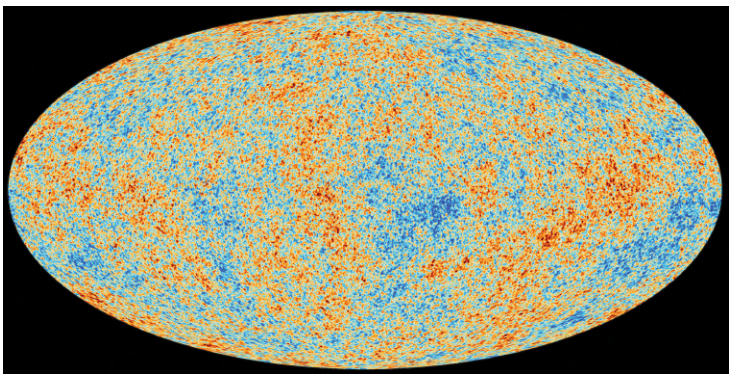


Figura 1.2: [Radiación cósmica de fondo (CMB)]. Tomado de ESA, 2012. Recuperado de https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Cosmic_Microwave_Background_CMB_radiation.

El mapa de la radiación cósmica de fondo en microondas presente en la figura 1.2, fue capturado por el satélite Planck de la Agencia Espacial Europea (ESA). Según la (European Space Agency (ESA), 2012), la misión Planck detectó esta primera luz, que también es la radiación «más antigua» detectable y contiene información sobre nuestro pasado y futuro. Al observarla, Planck vio el Universo casi como era en su origen.

Esta radiación, como se menciona en la cita anterior, es el vestigio del Big Bang, que fue emitida aproximadamente 380.000 años después de la gran explosión, cuando el cosmos se enfrió lo suficiente para permitir la formación de átomos neutros y volverse transparente a la radiación. La forma ovalada de la imagen representa una proyección del universo completo en un solo mapa, similar a un mapa terrestre que puede representar la superficie esférica de la Tierra en dos dimensiones. Este mapa cubre toda la esfera celeste observada desde la Tierra, con el centro correspondiente a la región más cercana al plano de nuestra galaxia.

Los colores en la imagen indican pequeñas fluctuaciones en la temperatura de la radiación de fondo, del orden de millonésimas de grado Kelvin, las cuales son clave para entender la estructura del universo primitivo y la formación de galaxias. Las regiones azules corresponden a áreas ligeramente más frías y densas, donde la gravedad pudo haber favorecido la formación de estructuras cósmicas como galaxias y cúmulos de galaxias a lo largo del tiempo. Mientras que las regiones rojas y amarillas representan zonas ligeramente más calientes y menos densas, porque la materia estaba menos concentrada.

La radioastronomía ha sido fundamental para estudiar fenómenos que son imperceptibles en el espectro óptico. Un ejemplo notable es el análisis de la distribución del hidrógeno neutro en nuestra galaxia, la Vía Láctea, cuyos átomos emiten una radiación caracterís-

tica con una longitud de onda de 21 *cm* en el espectro de radio. "La línea de 21 *cm* del hidrógeno atómico está proporcionando enorme información a los astrofísicos a la hora de entender la formación de las estrellas, la estructura de las galaxias, la interacción con su entorno, la evolución de las galaxias y la propia evolución del Universo"(Lopez, 2017).

La radioastronomía ha contribuido de manera significativa a la expansión del conocimiento científico sobre el universo, permitiendo el estudio detallado de sus fenómenos más enigmáticos como los púlsares: estrellas de neutrones de rápida rotación y con densidad extrema de materia que emiten pulsos periódicos de radiación. Estos objetos han funcionado como laboratorios naturales para realizar experimentos que confirman las predicciones de la relatividad general de Einstein, como el comportamiento de la gravedad en campos extremadamente intensos.

Otro avance notable fue el descubrimiento de planetas fuera del sistema solar, utilizando técnicas avanzadas como la radioastronomía y los telescopios ópticos. La construcción de grandes telescopios, tanto ópticos como de radio, ha permitido a los astrónomos obtener imágenes sorprendentes de fenómenos que antes eran invisibles para nosotros.

Además de sus contribuciones científicas, la astronomía ha inspirado a la humanidad a soñar con nuevas fronteras. Desde la antigüedad, la exploración de los cielos ha estado vinculada a la curiosidad humana, impulsándonos a comprender los misterios del universo y a expandir los límites del conocimiento. Telescopios como el Hubble han permitido capturar imágenes impresionantes del universo visible, mientras que radiotelescopios gigantes captan señales de fenómenos lejanos e incomprensibles para nuestros sentidos.

Los avances tecnológicos en telescopios y radiotelescopios han ampliado enormemente nuestra capacidad para explorar el universo. La astronomía no solo constituye una disciplina altamente técnica, sino también una exploración intelectual y científica que continúa ampliando los límites del conocimiento humano. Nos invita a usar nuestra imaginación para viajar más allá de las fronteras que podemos ver y sentir, desafiándonos a explorar los confines más lejanos del cosmos.

Con base en lo anterior, podemos afirmar que la radioastronomía es similar a la astronomía que se realiza con telescopios ópticos. Sin embargo, en lugar de observar la parte visible del espectro electromagnético —aquella que percibimos con nuestros ojos—, se utilizan dispositivos diseñados para "escuchar" el universo en frecuencias distintas a las visibles, específicamente en el rango de radio y microondas.

1.1.1. Radioastronomía en Colombia

Actualmente, en la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) se realizan estudios de radioastronomía en el Grupo de Investigación en Astro Ingeniería Alfa Orión tales como, el monitoreo del clima espacial en Colombia, donde se registran en tiempo real emisiones solares clasificadas en las categorías *A, B, C, M y X*[1] usando radio receptores de muy baja frecuencia (GOLF) y el software ***SuperSid***, el estudio de las radioemisiones generadas tanto por el Sol como por Júpiter, específicamente en la banda de alta frecuencia (HF) de 20,1 MHz. Mediante un radiotelescopio diseñado para captar estas señales, complementa-

[1]Estas categorías representan la intensidad de las llamaradas solares según la cantidad de energía liberada en rayos X. Cada letra indica un rango de intensidad creciente: A es la más débil, seguida de B, C, M y X. Dentro de cada categoría, las llamaradas se subdividen en una escala numérica del 1 al 9. Las llamaradas de clase X son las más potentes y pueden causar interrupciones significativas en las comunicaciones terrestres y eventos de clima espacial.

do con el software ***Radio SkyPipe***, que facilita el registro, análisis y almacenamiento de los datos obtenidos, lo que permite no solo recopilar información valiosa sobre la actividad magnética del Sol, sino también sobre las interacciones electromagnéticas en el entorno de Júpiter, ampliando nuestro entendimiento de estos fascinantes fenómenos astrofísicos. Además, se desarrollan herramientas con el propósito de interpretar y correlacionar señales radioastronómicas, mejorando así las capacidades para procesar y analizar datos de manera más eficiente y precisa.

Así mismo, diversas fuentes han destacado el proceso de revitalización de la radioastronomía en Colombia. Un ejemplo de ello es un artículo publicado en el periódico de EL TIEMPO en 2018, donde se expone la iniciativa de un grupo de científicos de la Universidad Industrial de Santander, la Universidad de Antioquia, la Universidad Nacional, la Universidad Tecnológica de Pereira, el Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, la Universidad El Bosque y la Universidad ECCI, que buscan aprovechar infraestructuras previas para la investigación astronómica, específicamente convertir las antiguas antenas parabólicas de Chocontá, mostradas en la imagen 1.3, que alguna vez fueron cruciales para las telecomunicaciones del país en un arreglo radioastronómico. Estas antenas, que en su



Figura 1.3: [Antenas de Chocontá]. Tomado de Facebook de la página Ciudades de Colombia, 2024. Recuperado de https://www.facebook.com/photo.php?fbid=993455695900649&id=100057086844769&set=a.119450586634502&locale=hi_IN

momento facilitaron la transmisión de televisión satelital en las décadas de 1970 y 1980, están siendo reevaluadas por un grupo de científicos de diversas universidades colombianas, con el objetivo de aprovecharlas para estudiar fenómenos astronómicos utilizando radio ondas. Según la respuesta dada por el astrofísico *Germán Chaparro*[2] al periódico El Tiempo, "este tipo de instalaciones ha permitido importantes descubrimientos en el campo de la radioastronomía, como el hallazgo de los cuásares y la evidencia clave del Big Bang a través del fondo cósmico de microondas" (Rojas, 2018).

De igual manera, estas antenas resultan fundamentales para la búsqueda de vida inteligente en el universo, puesto que permiten tanto la recepción como la emisión de señales a civilizaciones extraterrestres. Por esta razón, el proyecto no solo busca revitalizar un recurso obsoleto, sino también posicionar a Colombia como un centro potencial para el desarrollo de la radioastronomía en América Latina, aprovechando su ubicación estratégica cerca de la línea ecuatorial para contactar satélites de telecomunicaciones en órbita geoestacionaria.

En 2019, se obtuvo la primera imagen de un agujero negro ubicado en la galaxia

[2]Doctor Colombiano en Astronomía de la Universidad de Groningen.

Messier 87 (M87) por medio del Telescopio del Horizonte de Sucesos, como se muestra en la figura 1.4, un proyecto que reúne radiotelescopios de diversas partes del mundo y que, en el futuro, podría incluir a Colombia dentro de su red de observación. La posibilidad



Figura 1.4: [Agujero negro M87]. Tomado de BBCNews, 2019. Recuperado de https://www.bbc.com/mundo/noticias-47880446

que nuestro país se convierta en un actor relevante dentro de la radioastronomía ha sido impulsada por investigadores como Julián Rodríguez, profesor de la Universidad Industrial de Santander (UIS), quien durante un año, entre 2019 y 2020, lideró un estudio para identificar los lugares más adecuados en Colombia para desarrollar esta disciplina.

El proyecto contempla la construcción de un radio observatorio que aproveche las ventajas de este tipo de astronomía, que no se ve afectada por problemas como la contaminación lumínica o la nubosidad, factores que limitan la astronomía óptica, que estudia el universo en el rango de la luz visible. "Al estar cerca de la línea del ecuador, Colombia podría convertirse en un punto estratégico y atractivo para países que ya desarrollan grandes proyectos de radio interferometría de larga base, pues en la actualidad no hay ningún radio observatorio en estas latitudes" (Bustamante, 2020).

La red existente está compuesta por instalaciones cuyas ubicaciones incluyen ALMA en Chile, VLA en Estados Unidos y SKA en Sudáfrica. Sin embargo, para lograrlo, es fundamental encontrar un sitio lo suficientemente alejado de interferencias de radiofrecuencia, un reto en un mundo donde las telecomunicaciones ocupan buena parte del espectro electromagnético.

Para abordar este desafío, el equipo de la UIS desarrolló un laboratorio portátil denominado Caracterización de Sitios en Radio Interferencia (CaSiRI), diseñado para detectar y analizar las señales de radio en distintos puntos del país. Este dispositivo funciona de manera similar a una radio convencional, escaneando el espectro electromagnético en busca de zonas con menor interferencia. También cuenta con una cámara para monitorear el cielo las 24 horas del día y una estación meteorológica que mide factores ambientales clave para la instalación de un observatorio, como la temperatura, la humedad y la velocidad del viento.

Las exploraciones realizadas por el equipo permitieron recorrer distintas regiones de Colombia en busca de los lugares más "radio silenciosos". Basándose en estudios previos y en datos del *Ideam*[3], se identificaron varias zonas con alto potencial, como el páramo de Santurbán (ubicado en los departamentos de Santander y Norte de Santander), el nevado del Cocuy (ubicado en el departamento de Boyacá) y la laguna de Tota (ubicado en el

[3]Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

departamento de Boyacá). Otras áreas prometedoras, como el parque nacional del Pisba (ubicado en el departamento de Boyacá), La Guajira y el desierto de la Tatacoa (ubicado en el departamento del Huila) quedaron pendientes debido al inicio de la pandemia del COVID-19. Tras numerosas mediciones, los resultados indicaron que la vereda Saladito, en el municipio de Tona, en el páramo de Santurbán, es el sitio más adecuado, con niveles de interferencia hasta cien veces menores que en otros lugares analizados.

El estudio fue financiado por la Agencia Nacional del Espectro (ANE), que ya recibió un informe con recomendaciones para la gestión del espectro destinado a la radioastronomía. Más allá de su importancia para la exploración del cosmos, este trabajo también podría tener aplicaciones en el monitoreo ambiental, la predicción climática y la detección de desastres naturales. Actualmente, CaSiRI permanece en el páramo de Berlín (ubicado en el departamento de Santander), donde los investigadores esperan realizar pruebas para su funcionamiento autónomo. A pesar de los obstáculos, el compromiso del equipo sigue firme: continuar explorando los rincones más silenciosos del país y acercar a Colombia al fascinante mundo de la radioastronomía.

Estos y muchos otros han sido intentos de impulsar el desarrollo de la radioastronomía en Colombia, reflejando el esfuerzo de diversas iniciativas por consolidar esta disciplina en el país. No obstante, aún queda un largo camino por recorrer para establecer una infraestructura sólida y fomentar una comunidad científica dedicada a su estudio.

1.2. Breve revisión cronológica del electromagnetismo

James Clerk Maxwell es reconocido como una de las mentes más influyentes del siglo XIX y en la historia de la física. Su contribución más destacada fue la unificación de los fenómenos eléctricos y magnéticos en una única teoría: el electromagnetismo, cuyo aspecto matemático se ahondará en la siguiente sección, desarrollo que se basó en los descubrimientos previos de varios científicos a lo largo de los siglos.

El estudio de la electricidad y el magnetismo comenzó con William Gilbert en el siglo XVII, quien distinguió entre ambos fenómenos. Posteriormente, Charles-Augustin de Coulomb formuló su ley sobre la interacción entre cargas eléctricas. Durante el siglo XIX, Hans Christian Oersted descubrió en 1819 que "una corriente eléctrica que fluye por un alambre conductor podía desviar la aguja de una brújula que estuviera muy cerca del alambre, lo cual implicaba que una corriente eléctrica podía generar un efecto magnético"(Sámano, 2019). Este hallazgo llevó a André-Marie Ampère (1775-1836) a desarrollar una formulación matemática para describir la interacción entre corrientes eléctricas y campos magnéticos. Michael Faraday, por su parte, estableció la ley de inducción electromagnética, que describe cómo un campo magnético variable en el tiempo puede inducir una corriente eléctrica en un conductor.

Uno de los principales referentes de Maxwell fue precisamente Faraday, cuya intuición experimental le permitió formular el concepto de líneas de fuerza para describir la interacción electromagnética. A pesar de sus limitaciones matemáticas, Faraday desarrolló un método experimental innovador, basado en la observación empírica.

Fue por eso que Maxwell adoptó y formalizó las ideas de Faraday mediante un enfoque matemático riguroso. En su obra *On Faraday's Lines of Force*, publicada en 1856, intentó modelar geométricamente la electricidad y el magnetismo. En *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*(1864), consolidó su teoría del campo electromagnético y propuso

que el espacio alrededor de cuerpos eléctricos y magnéticos estaba ocupado por un campo dinámico, a través de un conjunto de ecuaciones diferenciales que describían su comportamiento. Su mayor innovación fue la introducción del concepto de corriente de desplazamiento, lo que permitió modificar la ley de Ampère y completar la simetría matemática de sus ecuaciones. Más tarde, en *A Treatise on Electricity and Magnetism*, publicada en 1873, sistematizó estos conceptos, abandonando las consideraciones filosóficas en favor de una exposición técnica más precisa.

Gracias a esto, predijo la existencia de ondas electromagnéticas y propuso que la luz era una manifestación de estas ondas propagándose en el espacio. Además, incorporó la ley de Gauss, que describe la relación entre los campos eléctricos y las cargas, y la ley de Gauss para el magnetismo, la cual establece que no existen monopolos magnéticos, es decir, los polos de un imán siempre aparecen en pares.

> En 1886, Heinrich Hertz construyó accidentalmente el primer transmisor y receptor de radio. En una sala de conferencias a oscuras de la Escuela Técnica Superior de Karlsruhe, en Alemania, Hertz había preparado un experimento para comprobar lo que sucedía cuando una corriente eléctrica fluía en un circuito abierto, es decir, un circuito en el que la trayectoria conductora no está completamente cerrada. Mientras le explicaba el montaje a su esposa, Elisabeth, encendió un generador de chispas, utilizado para producir corriente, y uno de ellos notó una chispa simultánea que destelló en un aparato no relacionado a cierta distancia de su aparato experimental principal. No se sabe quién lo notó primero, si Heinrich o Elisabeth, pero fue Heinrich quien dio el salto de las curiosidades que subrayan la naturaleza de la investigación científica. Hertz preguntó el "¿por qué?" comenzando una búsqueda sistemática de una respuesta (Verschuur, 1975).

A partir de ese suceso, Hertz logró demostrar que existía un tipo de radiación invisible capaz de transportar energía a través del espacio, a la que llamó "ondas eléctricas" también conocidas en el siglo XX como "ondas hertzianas", hoy en día conocidas como ondas de radio. A su vez comprobó que estas ondas compartían muchas similitudes con la luz, incluida su velocidad al viajar por el aire, con lo que pudo demostrar experimentalmente que la teoría electromagnética de Maxwell predecía la existencia de ondas electromagnéticas, de las cuales la luz era solo un tipo, era real.

En la actualidad, las frecuencias de las ondas de radio se miden en hertz (Hz), en honor a Hertz, y existe una relación entre su frecuencia y su longitud de onda. A pesar de su descubrimiento fundamental, Hertz no investigó cuán lejos podían viajar estas ondas a través del espacio.

Ese trabajo fue llevado a cabo por el italiano Guglielmo Marconi, quien en 1901 demostró que las ondas de radio podían recorrer largas distancias e incluso atravesar océanos, como el Atlántico. Aunque se equivocó al pensar que podían pasar a través de rocas, descubrió que rebotaban en la ionosfera, una capa conductora de la atmósfera terrestre, lo que les permitía viajar más allá de la curvatura de la Tierra. Además, sospechaba que podrían existir ondas de radio provenientes del espacio, pero su equipo no estaba diseñado para detectar señales en esas frecuencias.

En los años siguientes, Karl Guthe Jansky,

> debía caracterizar el ruido estático y de interferencia para minimizar este im-

> pacto en las transmisiones transoceánicas. Aunque algo de trabajo ya se había realizado a longitudes de onda muy largas, de unos cuatro mil metros, las comunicaciones en radio se querían desarrollar a longitudes mucho más cortas, del orden de quince metros, correspondiente a una frecuencia de 20 MHz. A estas longitudes, la instrumentación necesaria para estudiar las comunicaciones y los problemas derivados eran un territorio inexplorado en la época de Jansky (Pérez, 2017).

En 1932, después de un extenso análisis de datos, identificó tres tipos de ruido: dos asociados con tormentas eléctricas y un tercero, cuya dirección y patrón temporal indicaban un posible vínculo con el Sol. Sin embargo, estudios posteriores revelaron que este ruido tenía un origen más lejano, fuera del sistema solar. En 1933, Jansky presentó sus hallazgos en una conferencia titulada *"Ruido eléctrico de origen aparentemente extraterrestre"*, consolidando así el descubrimiento de las primeras señales de radio provenientes del espacio y dando inicio a la radioastronomía como una nueva disciplina científica.

La capacidad de Jansky para reconocer algo significativo en lo que otros podrían haber ignorado fue un claro ejemplo de descubrimientos serendipitosos. Su habilidad para reconocer lo inesperado y darle un significado científico despertó el interés de la comunidad científica. Sin embargo, el avance de la radioastronomía se vio retrasado por el impacto de la Segunda Guerra Mundial.

Después de la guerra, un grupo de físicos radiales, sin ser astrónomos de formación, retomaron el trabajo que Jansky había iniciado. Estos investigadores, que carecían del conocimiento astronómico tradicional, aprendieron sobre el cosmos al mismo tiempo que desarrollaban la nueva ciencia de la radioastronomía. La insistencia de Jansky fue lo que lo llevó a continuar sus investigaciones, reflejando una de las cualidades más valiosas en un científico: la perseverancia en la búsqueda de respuestas ante lo desconocido. Su trabajo, y el de los que lo siguieron, abrió las puertas a descubrimientos sobre el universo que antes hubieran parecido imposibles.

1.3. Ondas electromagnéticas

Tras una breve revisión histórica, en esta sección se abordarán los fundamentos teóricos propuestos por Maxwell para el tratamiento de las ondas electromagnéticas, principios basados en los trabajos previos de Gauss, Faraday y Ampère, y fueron sintetizados por Maxwell en cuatro ecuaciones fundamentales, en las cuales se describen la divergencia y el rotacional de los campos eléctricos y magnéticos en su forma diferencial, proporcionando el marco teórico esencial para el estudio de estas ondas, como se muestra a continuación:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \qquad \text{(Ley de Gauss)} \tag{1.1}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{1.2}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \text{(Ley de Faraday)} \tag{1.3}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \qquad \text{(Ley de Ampère-Maxwell)} \tag{1.4}$$

La ley de Gauss, representada en la ecuación 1.1, establece que las cargas eléctricas son la fuente del campo eléctrico, mientras que su análoga para el campo magnético, la ecuación 1.2, confirma la inexistencia de monopolos magnéticos.

La ley de Faraday, ecuación 1.3, describe cómo un campo magnético variable en el tiempo induce la generación de un campo eléctrico, un principio fundamental en la teoría del electromagnetismo y la base del funcionamiento de los generadores eléctricos.

Finalmente, la ley de Ampère, ecuación 1.4, relacionaba la corriente eléctrica con la generación de un campo magnético, donde $\vec{J}$ representa la densidad de corriente eléctrica y μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío. Maxwell se dio cuenta de que esta formulación original presentaba una limitación, solo era válida para densidades de corriente constantes y cuando se consideraba la ecuación de continuidad de la carga se obtenía una inconsistencia matemática.

Según Alhejandhro (2025), la ecuación de continuidad, expresada en la forma:

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \tag{1.5}$$

establece que la divergencia de la densidad de corriente es igual al negativo de la derivada de la densidad de carga respecto del tiempo. En otras palabras, sólo podrá haber un flujo de corriente si la cantidad de carga varía con el paso del tiempo, ya que está disminuyendo o aumentando en proporción a la carga que es usada para alimentar dicha corriente.

Si se aplicaba la operación divergencia a ambos lados de la ecuación 1.4, aparecía un problema, en la parte izquierda de la ecuación, la divergencia del rotacional de un campo vectorial es siempre cero. Por otro lado, en la parte derecha, recordando que μ_0 es una constante que se puede sacar de la divergencia, se obtiene como resultado la ecuación de continuidad para la densidad de carga, lo que implicaba que:

$$0 = \mu_0 \frac{\partial \rho}{\partial t} \tag{1.6}$$

Este resultado dice que la tasa de cambio de la densidad de carga ρ debe ser cero, lo cual indica que la densidad de carga es constante, por lo tanto, no puede cambiar en el tiempo. Esto contradice lo que realmente ocurre en un medio con corrientes variables, como en un capacitor mientras se carga, donde la densidad de carga está en función del tiempo.

"Un capacitor de placas paralelas es aquel dispositivo que está formado por dos placas paralelas conductoras de área A separadas por una distancia muy pequeña d comparada con las demás dimensiones y que llevan cargas $+Q$ y $-Q$ en la superficie"(Vásquez García, s.f.). En este caso, cuando un capacitor de placas paralelas se encuentra en proceso de carga, no hay una corriente eléctrica real fluyendo a través del dieléctrico del capacitor. No obstante, el campo eléctrico entre las placas varía con el tiempo a medida que el capacitor se carga, como se muestra en la figura 1.5. Este fenómeno ocurre porque, al conectar una fuente de voltaje, las cargas positivas comienzan a acumularse en una de las placas del capacitor. Como consecuencia, debido a la atracción coulombiana, se inducen cargas negativas en la otra placa. Aunque los electrones son los que realmente se mueven en el circuito, el efecto global da la impresión de que la corriente fluye de manera continua, como si existiera un conductor que atravesara el dieléctrico. Ahora bien, la carga positiva que se acumula en una placa no es exactamente la misma que "sale" de la otra; lo que ocurre es que ambas placas se cargan simultáneamente, generando un campo eléctrico variable en el tiempo.

Esta variación del campo eléctrico se comporta como si fuera una corriente, aunque en realidad no hay un flujo físico de carga a través del dieléctrico. A este fenómeno

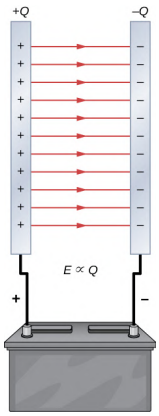


Figura 1.5: [Condensador de placas paralelas]. Tomado de OpenStax. Recuperado de https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-2/pages/8-1-condensadores-y-capacitancial

Maxwell lo llamó *corriente de desplazamiento*[4], expresada en la ecuación 1.7, lo que le permitió extender la ley de Ampère para incluir situaciones donde no hay corriente eléctrica convencional, pero sí un campo eléctrico cambiante.

$$\vec{J}_D = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \tag{1.7}$$

Este término representa una corriente equivalente al efecto magnético que produciría una corriente eléctrica real. Surge en regiones donde el campo eléctrico varía con el tiempo, aunque no exista una corriente convencional $\vec{J}$. Al incluir esta contribución, se obtuvo la versión corregida de la ley, conocida como la Ley de Ampère-Maxwell.

Estableciéndose así las ecuaciones de Maxwell con las correcciones:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \qquad \text{(Ley de Gauss)} \tag{1.8}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{1.9}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \text{(Ley de Faraday)} \tag{1.10}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \qquad \text{(Ley de Ampère-Maxwell)} \tag{1.11}$$

Después de corregir la ecuación de Ampère, Maxwell dio un paso fundamental: analizó su forma en el vacío. Su propósito era comprender cómo los campos eléctrico y magnético podían propagarse sin necesidad de fuentes materiales. Por lo que partió de sus expresiones generales y eliminó tanto la presencia de cargas, $\rho = 0$, como las corrientes de conducción, $\vec{J} = 0$. Dependiendo únicamente de la variación temporal y espacial de los propios campos eléctrico y magnético.

[4]Es un término introducido por Maxwell para modificar la ecuación de Ampère, permitiendo su aplicación en sistemas donde el campo eléctrico varía en el tiempo, como en un capacitor en proceso de carga o descarga. Aparece en estados transitorios y desaparece en distribuciones de corriente estacionaria.

Bajo estas condiciones, las ecuaciones de Maxwell en el vacío se expresan como:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \qquad \text{(Ley de Gauss para } \vec{E}\text{)} \tag{1.12}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \qquad \text{(Ley de Gauss para } \vec{B}\text{)} \tag{1.13}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \text{(Ley de Faraday)} \tag{1.14}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \qquad \text{(Ley de Ampère-Maxwell)} \tag{1.15}$$

La ecuación 1.12 indica que no existen fuentes de campo eléctrico en el vacío, es decir, las líneas de campo eléctrico no emergen ni terminan en ninguna carga. De manera análoga, la ecuación 1.13 establece que no existen monopolos magnéticos y que el campo magnético siempre forma líneas cerradas sin un origen ni fin definido.

La ecuación 1.14 describe cómo un campo magnético variable en el tiempo induce un campo eléctrico rotacional. Este principio es la base de la inducción electromagnética, término fundamental en el funcionamiento de generadores eléctricos y transformadores. La ecuación 1.15 establece que, en el vacío, un campo eléctrico que cambia en el tiempo genera un campo magnético rotacional.

Usando estas ecuaciones, es posible derivar una expresión matemática que describa la propagación de perturbaciones en los campos eléctrico y magnético en ausencia de cargas y corrientes. En particular, al aplicar el rotacional a las ecuaciones de Maxwell, 1.14 y 1.15, para los campos eléctrico y magnético, y utilizando la identidad del rotacional junto con la ley de Gauss en el vacío, se obtiene una ecuación diferencial que demuestra cómo estos campos pueden propagarse en el espacio en forma de ondas.

Para el campo eléctrico:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla \times \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \tag{1.16}$$

Al resolver la expresión, obtenemos la ecuación de onda para el campo eléctrico en el vacío.

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \tag{1.17}$$

De manera análoga, procedemos de la misma forma para el campo magnético:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{B}) = \nabla \times \left(\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \tag{1.18}$$

Tras resolver la ecuación 1.18, se obtiene la ecuación de onda del campo magnético en el vacío.

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \tag{1.19}$$

Comparando las ecuaciones 1.17 y 1.19 con la forma estándar de la ecuación de onda, se obtiene:

$$\nabla^2 \vec{F} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{F}}{\partial t^2} \tag{1.20}$$

concluyendo que:

$$\mu_0 \epsilon_0 = \frac{1}{v^2} \tag{1.21}$$

Al despejar v de la ecuación 1.21 obtenemos la siguiente expresión:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \tag{1.22}$$

Las constantes fundamentales presentes en la ecuación 1.22 ya estaban definidas; la permitividad del vacío se había derivado a partir de los trabajos de Coulomb y fue determinada con precisión en el siglo XX mediante experimentos sobre la fuerza electrostática entre cargas y la permeabilidad del vacío se había establecido inicialmente a través de la Ley de Ampère. Sin embargo, tras la redefinición del Sistema Internacional de Unidades (SI) en 2019, la permeabilidad magnética dejó de tener un valor exacto y ahora debe determinarse experimentalmente.

Por consiguiente, en el contexto de este trabajo, estas constantes toman los siguientes valores:

$$\varepsilon_0 = 8{,}8542 \times 10^{-12} \, \frac{C^2}{N \cdot m^2}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \, \frac{N}{A^2}$$

Al reemplazar estos valores en la ecuación 1.22 y realizando el procedimiento matemático obtenemos que:

$$v = 299\ 792\ 251{,}76 \ \frac{m}{s} \tag{1.23}$$

$$v \approx 3 \times 10^8 \ \frac{m}{s} \tag{1.24}$$

Después de obtener estos resultados, Maxwell concluyó que $c = v$ porque coincidía con el valor experimental de la velocidad de la luz que ya se había calculado para ese momento.

Dado que la ecuación de la velocidad de propagación de una onda electromagnética en un medio, ecuación 1.22, es válida para cualquier onda electromagnética. En el caso particular del vacío, donde no hay materia que interfiera en la propagación de la onda, esta velocidad corresponde precisamente a la velocidad de la luz, c.

Este resultado fue crucial, ya que reveló la naturaleza ondulatoria de la luz y otras formas de radiación electromagnética, estableciendo una conexión entre el electromagnetismo y la teoría de ondas.

Teniendo esto en cuenta podemos decir que "la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas depende de las propiedades del medio (vació) en este caso de la permeabilidad magnética y permitividad eléctrica de acuerdo a la teoría de Maxwell."(Segura López y cols., 2015)

De acuerdo con la cita anterior, se aprecia la profunda conexión entre las leyes fundamentales del electromagnetismo y el comportamiento de la luz. Este entendimiento no solo explica fenómenos cotidianos como la propagación de la luz a través del vacío, sino que

también establece las bases para muchas tecnologías modernas, desde las comunicaciones inalámbricas hasta los avances en la física de partículas. La teoría de Maxwell, al integrar la electricidad y el magnetismo, no solo respondió a interrogantes sobre la naturaleza de la luz, también abrió nuevas puertas a la exploración del universo, permitiéndonos explorar su estructura más profunda y sus leyes fundamentales.

Después de analizar las soluciones específicas de la ecuación de onda electromagnética en el vacío comenzó a surgir la idea de ondas planas monocromáticas, la cual es "una onda continua de frecuencia constante. Esto significa que la onda tiene una longitud de onda constante, no cambia en el espacio ni el tiempo, y sus frentes de onda son infinitos planos paralelos. "(StudySmarter, 2019). Por lo que se consideraba como la forma más simple de propagación de la luz.

En este contexto, se considerará una onda monocromática de frecuencia fija, w, que se propaga en la dirección z, sin dependencia en x ni y, lo que indica que se trata de una onda plana, haciendo que los campos eléctrico y magnético sean uniformes en todos los planos perpendiculares a la dirección de propagación. Por lo tanto, la expresión matemática de los campos se puede representar como:

$$\vec{E}(z,t) = \vec{E}_0 e^{i(kz-\omega t)}, \quad \vec{B}(z,t) = \vec{B}_0 e^{i(kz-\omega t)} \tag{1.25}$$

Como la relación de dispersión está dada por $w = ck$, y el número de onda se define como $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, entonces

$$c = \frac{w}{k} \tag{1.26}$$

Para conocer cómo es el comportamiento de dichos campos y cuál es la relación que se presenta entre ellos durante su propagación, es necesario acudir, en primer lugar, a la ecuación 1.12, la cual establece que en ausencia de cargas la divergencia del campo eléctrico es cero.

Al aplicar el operador divergencia al campo eléctrico, solo se mantiene el termino correspondiente a la dirección de propagación de la onda, debido a que las componentes del campo inicial E_{0x} y E_{0y} son constantes y por tanto su derivada es cero, dando como resultado la siguiente relación:

$$E_{0z} k e^{i(kz-\omega t)} = 0 \tag{1.27}$$

Lo anterior implica que la componente E_{0z} debe ser cero, es decir, el campo eléctrico no tiene una componente en la dirección de propagación. En consecuencia, el campo eléctrico oscila en un plano perpendicular a la dirección en la que avanza la onda, evidenciando que se trata de una onda transversal.

Un razonamiento similar se aplica a la ecuación 1.13, que da cuenta de la no existencia de los monopolos magnéticos en la naturaleza.

Al aplicar el operador divergencia en coordenadas cartesianas, y considerando que, al igual que el campo eléctrico, el campo magnético corresponde a una onda plana monocromática que se propaga en la dirección z, y que las componentes B_{0x} y B_{0y} del campo inicial también son constantes, se obtiene:

$$k B_{0z} e^{i(kz-\omega t)} = 0 \tag{1.28}$$

Lo que significa que el campo magnético, al igual que el campo eléctrico, oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación, lo que corrobora que el campo magnético se comporta como una onda transversal. Ahora, para determinar cómo están relacionados los campos eléctrico y magnético durante la propagación de la onda, recurrimos a la

ecuación 1.14, inicialmente se trabaja con el termino de la derecha y se hace uso de la relación establecida para el campo magnético en las ecuaciones 1.25, obteniendo la siguiente expresión:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -i\omega \vec{B} = -i\omega \left(B_{0x}\hat{\imath} + B_{0y}\hat{\jmath} + B_{0z}\hat{k} \right) e^{i(kz-\omega t)} \tag{1.29}$$

Ahora desarrollando la parte izquierda de la ecuación 1.14 y usando la relación para el campo eléctrico presentada en las ecuaciones 1.25, se desprende el siguiente rotacional:

$$\nabla \times \vec{E} = \begin{vmatrix} \hat{\imath} & \hat{\jmath} & \hat{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} \tag{1.30}$$

Resolviendo, se obtiene una expresión que depende de las componentes del campo eléctrico E_x y E_y, tal como se presenta a continuación

$$\nabla \times \vec{E} = \hat{\jmath} E_{ox} ike^{i(kz-\omega t)} - \hat{\imath} E_{oy} ike^{i(kz-\omega t)} \tag{1.31}$$

Al igualar las componentes de la anterior expresión con las componentes de la ecuación 1.29, lo cual se puede hacer gracias a la ley de inducción de Faraday (1.14), se obtiene:

$$-E_{oy}k = \omega B_{ox} \quad ; \quad E_{ox}k = B_{oy}\omega \tag{1.32}$$

Los anteriores resultados se pueden resumir en la relación que se presenta a continuación:

$$\vec{B}_0 = \frac{k}{\omega} \left(\hat{k} \times \vec{E}_0 \right) \tag{1.33}$$

Si multiplicamos a los dos lados de la ecuación por $e^{i(kz-\omega t)}$ y teniendo en cuenta las ecuaciones 1.25 y 1.26 se obtiene:

$$\vec{B} = \frac{1}{c} \left(\hat{k} \times \vec{E} \right) \tag{1.34}$$

Indicándonos que el campo magnético es perpendicular al campo eléctrico y a la dirección de propagación. Es decir, los campos eléctrico y magnético oscilan perpendicularmente entre sí y también son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda electromagnética, lo que confirma que se trata de una onda electromagnética transversal.

En términos de las magnitudes de los campos eléctrico y magnético, la relación 1.34 se expresa como:

$$B = \frac{E}{c} \tag{1.35}$$

Lo cual evidencia que para una onda electromagnética que se propaga en el vacío, el campo eléctrico tiene una mayor intensidad que el campo magnético. Con esto Maxwell concluyó que la luz proveniente de una fuente luminosa como el Sol es una onda electromagnética que oscila de manera perpendicular a la dirección de propagación, dotando así a la luz de una naturaleza ondulatoria.

1.3.1. Espectro electromagnético

El universo, con su vastedad infinita, nos invita a reflexionar sobre las estrellas que vemos en el cielo durante una noche despejada. Cada estrella que observamos no es solo

una esfera luminosa en el espacio; es una fuente de energía y de información, que viaja desde su lugar de origen hasta nuestros ojos. La luz que llega a nosotros desde estas estrellas ha recorrido distancias inmensas a través del espacio, y cuando la vemos, estamos recibiendo información del pasado, ya que la luz ha tardado años, o incluso millones de años, en llegar hasta aquí. Sin embargo, nuestra visión es limitada a una pequeña franja dentro de un espectro de radiaciones mucho más amplio que se extiende por todo el universo.

A lo largo de los miles de millones de estrellas que componen nuestro universo, no solo se emite luz visible, sino también una variedad de otras radiaciones producidas por procesos nucleares en los que las estrellas están involucradas. Estas radiaciones se difunden por el espacio a la velocidad de la luz, transmitiendo energía que podemos captar a través de diferentes medios. Hay fenómenos aún más misteriosos, como la llamada "materia oscura", que se cree que es mucho más abundante que la materia común, pero que no interactúa con la luz, lo que dificulta su observación directa.

Nosotros, seres humanos, habitamos un pequeño planeta, la Tierra, que forma parte de un sistema solar alrededor de una estrella mediana, el Sol. Esta estrella es esencial para la vida en nuestro planeta, ya que proporciona la energía necesaria para los procesos biológicos, como la fotosíntesis, y para las actividades humanas a través de diversas formas de energía. Desde la luz solar directa hasta las energías obtenidas de fuentes como los combustibles fósiles, las energías renovables o los fenómenos climáticos, todo está vinculado a las radiaciones provenientes del Sol.

Para entender mejor cómo interactuamos con la luz y las radiaciones, es fundamental explorar el *espectro electromagnético*. Este espectro abarca un rango extremadamente amplio de ondas de radiación, desde las más largas -infrarrojo- hasta las más cortas -ultravioleta-, y se divide en diversas categorías. Sin embargo, estas categorías no tienen fronteras rígidas, sino que se mezclan y cambian de forma progresiva entre sí. Para estudiar las distintas formas de radiación, se utilizan dos parámetros clave: la frecuencia y la longitud de onda. Estos conceptos son fundamentales para entender cómo se propaga la radiación solar por el espacio y cómo interactúan con la materia.

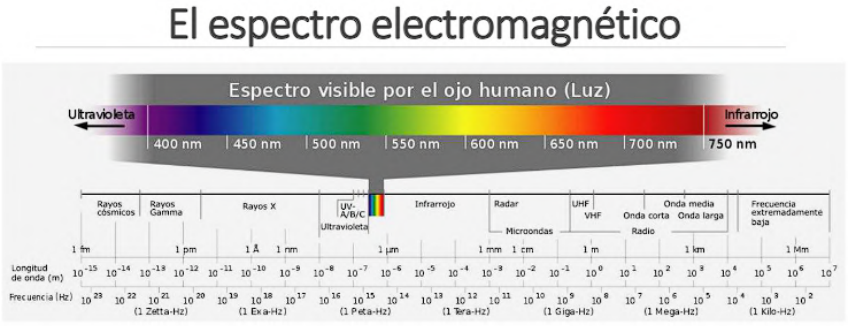


Figura 1.6: [Representación del espectro electromagnético, destacando la luz visible y la relación entre longitud de onda y frecuencia]. Tomado de Academia, 2019. Recuperado de https://astronomia.com.ar/un-nuevo-capitulo-en-la-expansion-del-universo/

El espectro electromagnético abarca una amplia gama de longitudes de onda y frecuencias, que incluyen desde ondas de radio y televisión hasta luz visible, radiación infrarroja y ultravioleta, rayos X, rayos gamma, entre otras. Las frecuencias de estas ondas varían desde $10^2\ Hz$ a $10^{23}\ Hz$, y aunque estas ondas difieren en su frecuencia (f) y longitud de onda (λ), todas se propagan en el vacío a la misma velocidad, c, de acuerdo con la relación $c = \lambda f$.

La vista humana solo puede percibir una pequeña porción de este espectro, conocida como luz visible. Esta porción comprende longitudes de onda de 400×10^{-9} m a 700×10^{-9} m, lo que corresponde a frecuencias aproximadas de $7{,}5 \times 10^{24}$ Hz a $4{,}3 \times 10^{24}$ Hz, interpretándose como diferentes colores en el cerebro. La luz blanca contiene todas las longitudes de onda visibles, pero mediante el uso de fuentes de luz o filtros especiales, es posible aislar una banda estrecha de longitudes de onda, obteniendo así luz aproximadamente monocromática, es decir, de un solo color.

Un ejemplo claro de cómo la luz y las radiaciones de diferentes longitudes de onda nos permiten explorar el universo de formas únicas, es el caso de las nebulosas. Estas impresionantes formaciones de gas y polvo, que son tanto lugares de nacimiento de estrellas como restos de estrellas muertas, no solo emiten luz visible, sino que también emiten radiaciones en otras regiones del espectro electromagnético. Si observamos una nebulosa utilizando diferentes longitudes de onda, obtenemos una visión completamente distinta de la misma. En luz visible, la nebulosa puede aparecer como una colorida nube de gas iluminado por las estrellas cercanas. Sin embargo, si observamos la nebulosa en el infrarrojo, podemos ver a través de las densas nubes de gas y polvo, se revelan estructuras internas y zonas de formación estelar que no pueden percibirse mediante la luz visible. Además, al estudiar la nebulosa en el ultravioleta o en rayos X, podemos detectar procesos energéticos intensos, como la presencia de estrellas calientes o incluso agujeros negros en su núcleo.

Este enfoque multiespectral nos brinda una comprensión más profunda y detallada de las complejas dinámicas de las nebulosas, demostrando cómo la interacción de la radiación con la materia en diferentes frecuencias nos permite "ver" más allá de lo que nuestros ojos pueden percibir en el rango de luz visible, así como se muestra en la figura 1.7.

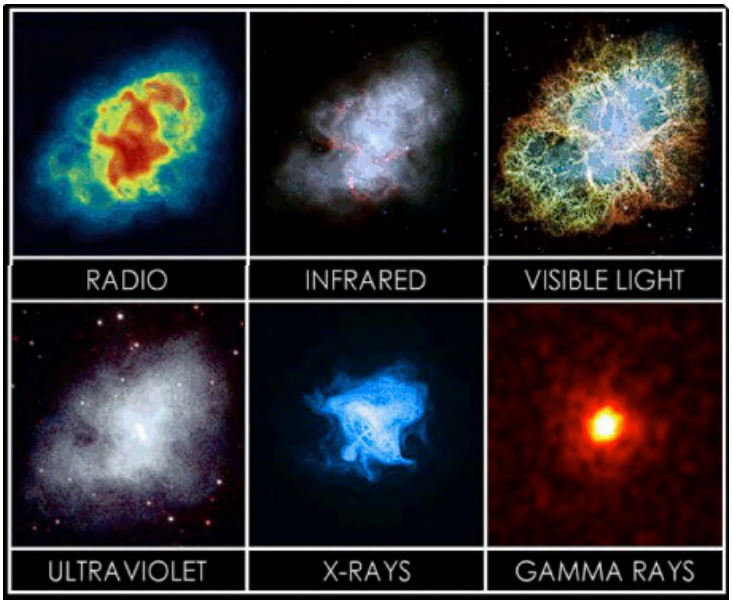


Figura 1.7: [Nebulosa del Cangrejo, vista desde diferentes partes del espectro electromagnético]. Tomado de CESAR's Booklet. Recuperado de https://cesar.esa.int/upload/201807/espectro_electromagntico_booklet.pdf

1.3.2. Ondas de radio

La radiofrecuencia (RF) es una región del espectro electromagnético caracterizada por ondas de baja frecuencia y gran longitud de onda, que pueden ir desde unos pocos

milímetros hasta miles de kilómetros. En la Tierra, la atmósfera permite el paso de ondas con longitudes de hasta 20 metros, lo que facilita la propagación de señales de radio.

El espectro de radiofrecuencias se organiza en diferentes bandas, cada una con características específicas en cuanto a frecuencia y longitud de onda. Estas bandas, definidas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), abarcan un amplio rango de frecuencias, desde las más bajas, con longitudes de onda mayores, hasta las más altas, con longitudes de onda más cortas. Cada una de estas bandas tiene aplicaciones particulares, que van desde las comunicaciones por radio y televisión hasta el uso en satélites, radares y sistemas de navegación. Gracias a esta clasificación, es posible asignar y regular el uso del espectro de radiofrecuencia de manera eficiente, evitando interferencias y optimizando su aprovechamiento en distintos ámbitos tecnológicos y científicos.

Según los datos del cuadro 1.1 que se muestra a continuación, proporcionada por Fontal (2005) en el texto *El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones* se presenta el espectro de radiofrecuencia, organizando las distintas bandas en función de su frecuencia y longitud de onda. Se incluyen once categorías que abarcan desde frecuencias extremadamente bajas hasta extremadamente altas, lo que implica que, aunque la frecuencia aumenta, la velocidad de propagación permanece constante en el vacío.

En términos generales, la tabla dispuesta a continuación muestra una correlación entre el incremento en la frecuencia y la evolución de las aplicaciones tecnológicas, desde usos especializados en comunicación y navegación hasta la transmisión de datos en redes y dispositivos móviles.

Nombre de Banda	Abrev	Banda ITU	Frecuencia y Longitud de onda	Ejemplo de uso
Frecuencia extremadamente baja	ELF	1	3-30 Hz 100,000 km – 10,000 km	-
Frecuencia súper baja	SLF	2	30-300 Hz 10,000 km – 1000 km	-
Frecuencia ultra baja	ULF	3	300-3000 Hz 1000 km – 100 km	-
Frecuencia muy baja	VLF	4	3-30 kHz 100 km – 10 km	Comunicación militar
Frecuencia baja	LF	5	30-300 kHz 10 km – 1 km	Navegación, señales de tiempo, Radiodifusión, AM onda larga
Frecuencia media	MF	6	300-3000 kHz 1 km – 100 m	Radiodifusión AM
Frecuencia alta	HF	7	3–30 MHz 100 m – 10 m	Radiodifusión, onda corta y radio amateur
Frecuencia muy alta	VHF	8	30–300 MHz 10 m – 1 m	Radiodifusión, FM y Televisión
Frecuencia ultra alta	UHF	9	300–3000 MHz 1 m – 100 mm	Radiodifusión televisión, LAN inalámbrico
Frecuencia super alta	SHF	10	3–30 GHz 100 mm – 10 mm	Dispositivos microondas, teléfonos móviles
Frecuencia extremadamente alta	EHF	11	30–300 GHz 10 mm – 1 mm	-

Cuadro 1.1: [Espectro de radio frecuencias]. Tomado del libro El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones. Recuperado de http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/16746/espectro_electromagnetico.pdf

1.4. Radiotelescopios

La radioastronomía ha cobrado gran importancia en los últimos años como se mencionaba anteriormente, ya que ofrece ventajas significativas como su independencia de las condiciones meteorológicas, una instrumentación relativamente menos compleja y un mayor ancho de banda en las observaciones. Estas características han impulsado el interés en esta rama de la astronomía y en la herramienta fundamental que la hace posible: el radiotelescopio.

"Un radiotelescopio se compone esencialmente de un colector de ondas de radio y de un receptor situado en el foco del colector, de forma análoga al telescopio óptico, donde el objetivo hace las veces de colector y el ojo provisto de un ocular o la cámara fotográfica o electrónica hacen las veces de receptor. El colector del radiotelescopio no se llama objetivo, sino antena, y puede consistir en una hilera de dipolos (como las antenas

corrientes de televisión) o en un paraboloide metálico (a veces también una superficie esférica o cilíndrica).” (Vaquerizo y Moreno, s.f.)

Con la cita anterior, entonces podemos decir que un radiotelescopio es un sistema de detección de ondas de radio proveniente del espacio, compuesto principalmente por tres elementos fundamentales; la antena, el receptor y el software de procesamiento de datos que debe cumplir con tres criterios clave para garantizar la calidad de las observaciones: gran sensibilidad, bajo ruido y alta resolución.

La función principal de un radiotelescopio es medir la variación de la intensidad de la señal proveniente de las radio fuentes. Es decir, analiza cómo cambia la potencia inducida por la onda electromagnética incidente en los terminales de la antena a lo largo del tiempo. Mediante un procesamiento adecuado, estas señales pueden transformarse en representaciones visuales denominadas radio imágenes, que permiten observar cómo se verían las fuentes emisoras de radio si pudieran percibirse en dicho rango del espectro electromagnético.

El primer elemento del sistema, la antena, tiene como función captar las ondas de radio emitidas por los objetos astronómicos. Puede ser una gran parábola, como en los radiotelescopios de plato único, una red de múltiples antenas trabajando en conjunto, como en interferometría, u otras estructuras. Su diseño y tamaño influyen directamente en la cantidad de radiación capturada y en la resolución angular de las observaciones.

El receptor es el encargado de amplificar y convertir las señales débiles recibidas por la antena en una forma utilizable para su análisis, garantizando la calidad de la detección y minimizando el ruido térmico y electrónico.

Por último, el software desempeña un papel crucial en el procesamiento, almacenamiento y análisis de los datos obtenidos. Dado que las señales de radio provenientes del espacio son extremadamente débiles y pueden estar contaminadas por interferencias terrestres, se requiere el uso de algoritmos especializados para filtrar el ruido, mejorar la resolución y transformar la información en imágenes o gráficos comprensibles.

Gracias a la combinación de estos tres elementos, los radiotelescopios permiten la observación de fenómenos cósmicos que serían inaccesibles mediante la astronomía óptica, como la detección de púlsares, la cartografía de la estructura del hidrógeno en la galaxia y el estudio de la radiación de fondo de microondas, entre muchos otros.

A diferencia de las imágenes obtenidas con telescopios ópticos, las radio imágenes no están compuestas por píxeles convencionales, sino por una recopilación de datos sobre la intensidad de la señal en distintas posiciones del cielo. Para construir estas imágenes, se realizan barridos sobre la radio fuente, aprovechando la alta resolución angular de los radiotelescopios, que en algunos casos puede alcanzar la escala de mili-segundos de arco. Posteriormente, la información obtenida se procesa asignando colores a distintos niveles de intensidad de la señal o generando mapas de contorno que unen puntos con la misma intensidad registrada. Como se muestra en el primer recuadro de la figura 1.7.

En este trabajo se busca estudiar las captaciones solares a través de un sistema de observación por radiotelescopios, específicamente mediante una antena magnética circular tipo isoloop, operando en la banda decamétrica, diseñada para captar las emisiones de radio provenientes del Sol, por lo cual resulta indispensable comprender las distintas fuentes emisoras de radiación en el rango de radiofrecuencia, conocidas como radio fuentes. Estas abarcan todos aquellos cuerpos del universo que emiten radiación electromagnética dentro de la denominada ventana de radio, y pueden clasificarse de diversas maneras. Según su

temperatura, se distinguen las radio fuentes térmicas, cuya radiación depende exclusivamente de la temperatura del cuerpo y puede describirse mediante la Ley de Planck, y las radio fuentes no térmicas, asociadas a interacciones de partículas cargadas con campos magnéticos. En cuanto a su espectro electromagnético, pueden ser de emisión continua, cuando abarcan un amplio rango de frecuencias, o de línea espectral, cuando presentan emisión en un rango muy estrecho o en frecuencias particulares, como las correspondientes al hidrógeno neutro. Finalmente, según su ubicación en el universo, se clasifican en radio fuentes galácticas, ubicadas dentro de la Vía Láctea, y extragalácticas, localizadas fuera de nuestra galaxia.

Las antenas son dispositivos fundamentales en la transmisión y recepción de ondas electromagnéticas, funcionando como el punto de transición entre una señal guiada y una propagada en el espacio libre. En el caso de los radiotelescopios, la antena actúa como un colector de ondas de radio, desempeñando un papel similar al de la lente o el espejo en un telescopio óptico.

Los sistemas astronómicos presentan una gran diversidad, lo que dificulta definir una configuración estándar. No obstante, es posible ejemplificar la interacción entre sus componentes a través de un radiotelescopio tradicional como se muestra en la figura 1.8.

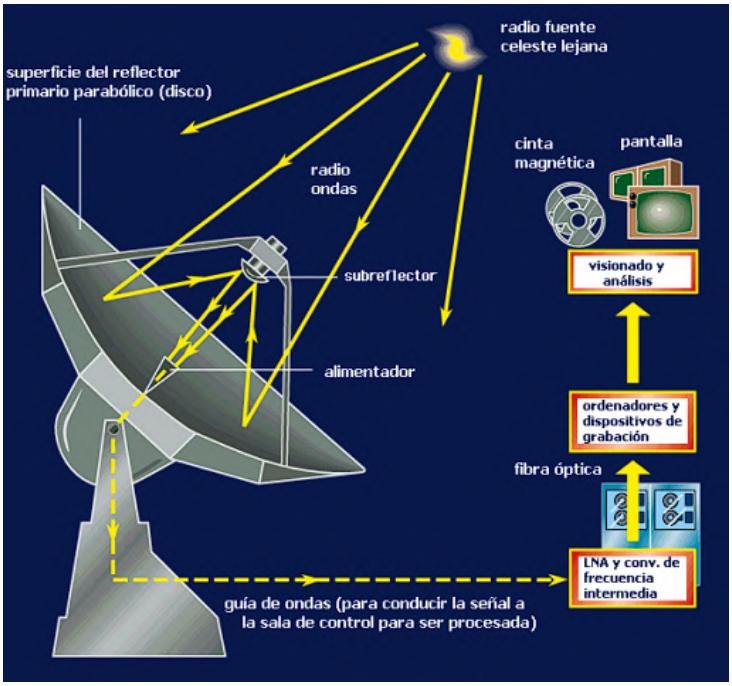


Figura 1.8: [Funcionamiento de un radiotelescopio]. Tomado de Partner. Recuperado de https://partner.cab.inta-csic.es/Upload/201309/PG_RT_13.pdf

En este sistema, la antena y su alimentador captan las ondas de radio provenientes de fuentes celestes distantes. Posteriormente, la señal se amplifica en el punto de alimentación y es enviada por cable hasta el receptor principal, ubicado en un edificio cercano. Allí, la señal experimenta una amplificación adicional, es detectada e integrada, y su salida se registra en diversos formatos, como gráficos analógicos o datos digitales. Estos registros pueden almacenarse en cintas magnéticas para su análisis posterior o procesarse en tiempo real mediante computadoras especializadas. Finalmente, los resultados se presentan a

través de un sistema de *trazado XY*[5] de gran precisión.

"La función de un receptor de radiotelescopio es detectar y medir la emisión de radio de fuentes celestes" (Kraus, 1997, p. 160). Sin embargo, debido a la naturaleza débil de estas señales y la presencia de interferencias de fondo, los receptores deben ser extremadamente sensibles y estables. En condiciones normales, las señales de radio recibidas son muy pequeñas, y a menudo se confunden con el ruido ambiental. Por lo tanto, se requiere un receptor que no solo tenga alta sensibilidad, sino también la capacidad de mantener su estabilidad frente a variaciones externas dado que generalmente según *John D. Krauss*[6] su potencia está entre el rango de 0,1 a 10 vatios.

En algunos casos, como con la radiación proveniente de eventos solares, las señales pueden ser lo suficientemente fuertes como para que la capacidad de analizar el espectro de la señal en función del tiempo sea igualmente relevante.

En el siguiente capítulo se hará énfasis en los parámetros esenciales que definen el desempeño del componente fundamental del radiotelescopio, la antena. Esta revisión no solo permitirá comprender las capacidades y limitaciones técnicas de las antenas empleadas en las observaciones astronómicas, sino que además constituye el eje central en el desarrollo del presente trabajo, al destacar el papel crucial de la antena dentro del sistema completo de recepción.

[5]Método de representación gráfica que utiliza un plano cartesiano para registrar datos con gran precisión. En este caso, se emplea para visualizar los resultados en gráficos analógicos o digitales, facilitando su análisis y procesamiento.

[6]Fue un físico e ingeniero eléctrico estadounidense, conocido por su trabajo en antenas y radioastronomía.

Capítulo 2

Antenas de Hélice y Bucle: Funcionamiento e Interacción con Ondas Electromagnéticas

2.1. Antenas de alambre

En el presente capítulo se abordará el proceso de detección de ondas de radio mediante dos tipos de antena. Cabe señalar que las antenas a mencionar poseen la capacidad tanto de emitir como de recibir ondas electromagnéticas, gracias al principio de reciprocidad electromagnética, el cual establece que una antena que puede irradiar también puede detectar radiación de forma equivalente, bajo condiciones lineales y pasivas.

No obstante, aunque los procesos de emisión y recepción son inversos y simétricos desde un punto de vista físico, no son idénticos. En la transmisión, una antena convierte una señal eléctrica —producida por una corriente oscilante— en una onda electromagnética que se propaga por el espacio. En la recepción, el proceso es el inverso: la antena convierte una onda electromagnética incidente en una señal eléctrica medible (ya sea un voltaje o una corriente).

Ambos procesos implican una interacción entre campos electromagnéticos y corrientes eléctricas, pero presentan diferencias prácticas, especialmente en el diseño de los sistemas electrónicos asociados. Mientras que la transmisión requiere etapas de amplificación de potencia, la recepción exige circuitos de alta sensibilidad y bajo ruido para la detección de señales débiles.

Por lo tanto, aunque a lo largo del capítulo se hará referencia general a ambos procesos, este trabajo de grado se enfocará específicamente en la detección, ya que los datos analizados en el capítulo 3 corresponden a señales captadas por una antena de bucle.

Las antenas de alambre, ya sean lineales o curvas, representan el tipo más básico y antiguo de antenas existentes y, en muchos casos, las más versátiles para diversas aplicaciones dado que su diseño sencillo, facilidad de instalación y portabilidad, lo hace ideal para aplicaciones en radiocomunicaciones, sistemas inalámbricos, radio astronomía, entre otros.

La figura 2.1 muestra un ejemplo clásico de antena de alambre, concretamente una antena tipo dipolo en “v”, donde el conductor metálico está dispuesto en dos brazos in-

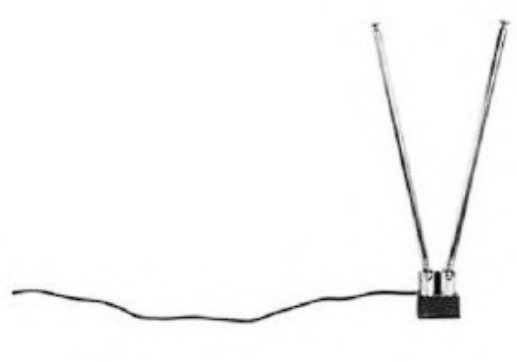


Figura 2.1: [Antena de alambre]. Tomado de ElProCus, 2013. Recuperado de https://www.elprocus.com/wire-antenna/.

clinados que se extienden desde una base común; esta configuración facilita la recepción y transmisión de ondas electromagnéticas al ofrecer una geometría simple pero eficaz. Se denomina "dipolo" porque está compuesta por dos brazos conductores que actúan como polos opuestos, permitiendo la oscilación de corrientes que generan y reciben campos electromagnéticos. La inclinación de los brazos en forma de "v" puede modificar el patrón de radiación, haciéndolo más direccional o ajustando su impedancia para mejorar el acoplamiento con ciertos sistemas. Debido a esta versatilidad estructural, las antenas de alambre pueden instalarse en distintas orientaciones; horizontal, vertical o inclinada, dependiendo de su diseño y de la aplicación para la que se utilicen.

Existen diversas variantes dentro de las antenas de alambre, como los dipolos rectos, los bucles y las hélices. En este trabajo, nos centraremos en el análisis de las antenas de bucle y las helicoidales, no solo por su relevancia en aplicaciones de radiofrecuencia y observación astronómica, sino también porque corresponden a los tipos de antenas actualmente utilizadas tanto en la Fundación Cydonia como en la universidad que colaboró proporcionando los datos experimentales que serán analizados más adelante en este trabajo.

En el estudio de estructuras de alambre en electromagnetismo y radiofrecuencia, se analizan tanto alambres metálicos altamente conductores como aquellas estructuras que, aunque no son completamente metálicas, presentan propiedades resistivas y pueden comportarse de manera similar a un conductor de alambre. Una característica fundamental de estas estructuras es que deben ser *eléctricamente delgadas*[1], condición que asegura que el grosor del alambre no afecte de manera significativa la propagación de las ondas electromagnéticas a través de él.

Para analizar su funcionamiento, es clave determinar la distribución de corriente en los segmentos del alambre. Esto puede realizarse utilizando el enfoque de potencial vectorial $\vec{A}$ y potencial escalar ϕ, donde los campos electromagnéticos se describen a partir de funciones auxiliares más simples, que permiten calcular de forma indirecta los campos eléctrico y magnético, o mediante ecuaciones integrales de los potenciales, derivadas de las ecuaciones de Maxwell, las cuales permiten relacionar directamente la distribución de corriente en una región del espacio con los campos electromagnéticos que esta genera, especialmente útiles en el estudio de antenas cilíndricas. En este sentido, "Los cables conductores son materiales cuya característica principal es el movimiento de cargas eléctricas

[1]Esto significa que el diámetro del conductor debe ser mucho menor que la longitud de onda de la señal electromagnética con la que interactúan, $d \ll \lambda$, para que se pueda modelar como un alambre delgado.

y la creación de flujo de corriente" (Balanis, 2005).

En un conductor, la corriente eléctrica se origina por el movimiento de cargas. La densidad de corriente describe el flujo de carga por unidad de área o longitud, dependiendo de cómo se distribuye la carga en el material.

Para un alambre donde la carga se distribuye en un volumen, la densidad de corriente volumétrica J_z se define como el producto de la densidad volumétrica de carga ρ_q y la velocidad de desplazamiento promedio de las cargas v_z:

$$J_z = \rho_q v_z \tag{2.1}$$

Si la carga se encuentra distribuida en la superficie de un conductor ideal, la densidad de corriente superficial K está dada por el producto de la densidad de carga superficial σ_q y la velocidad de las cargas v_z:

$$K = \sigma_q v_z \tag{2.2}$$

Finalmente, para un alambre muy delgado (o con radio idealmente cero), la corriente total I_z se puede expresar en función de la densidad longitudinal de carga λ_q y la velocidad de las cargas v_z:

$$I_z = \lambda_q v_z \tag{2.3}$$

Si la corriente total cambia con el tiempo, esto implica que la velocidad de las cargas también varía. Derivando la ecuación 2.3 con respecto al tiempo, y considerando que $\frac{dv_z}{dt} = a_z$, obtenemos:

$$\frac{dI_z}{dt} = \lambda_q \frac{dv_z}{dt} = \lambda_q a_z \tag{2.4}$$

La Ecuación 2.4 establece que el cambio temporal de la corriente ($\frac{dI_z}{dt}$) en un conductor delgado es directamente proporcional a la aceleración de las cargas y a la densidad lineal de carga. Esto subraya que la corriente varía cuando las cargas se aceleran o desaceleran.

Cuando el alambre tiene una longitud l, la ecuación 2.4 puede reescribirse como:

$$\frac{dI_z}{dt} l = l\lambda_q \frac{dv_z}{dt} = l\lambda_q a_z \tag{2.5}$$

La ecuación 2.5, aunque suele presentarse en el contexto de la radiación electromagnética generada por una antena transmisora, también tiene validez conceptual para el caso de una antena receptora. En este escenario, una onda electromagnética incidente induce campos eléctricos variables sobre el conductor de la antena, los cuales ejercen fuerzas sobre las cargas libres presentes en el material. Como resultado, estas cargas se aceleran, según la relación $l\lambda_q a_z$ que produce una variación temporal en la corriente medida en el sistema ($\frac{dI_z}{dt} l$).

Por tanto, la ecuación establece un principio fundamental: tanto la radiación como la recepción de ondas electromagnéticas requieren una aceleración de las cargas. En transmisión, una fuente de corriente variable genera esta aceleración; en recepción, la aceleración es inducida por el campo eléctrico de la onda incidente. En ambos casos, la variación temporal de la corriente está directamente relacionada con la aceleración de la carga y su densidad lineal, lo que convierte a la ecuación 2.5 en un vínculo clave entre la dinámica de las cargas y los fenómenos de emisión y captación de energía electromagnética.

Para que esto se produzca es imprescindible que el conductor no sea completamente rectilíneo e infinito en su extensión, dado que en presencia de curvaturas, discontinuidades o terminaciones abruptas en el conductor se introducen variaciones en la trayectoria de las cargas en movimiento, lo que genera la aceleración necesaria para la emisión de radiación electromagnética. Asimismo, en configuraciones donde la carga oscila periódicamente, como en un *dipolo eléctrico de media longitud de onda*[2], se establece una corriente alterna que varía con el tiempo, lo cual también resulta en la emisión de radiación.

En este contexto, se pueden identificar tres escenarios principales. En primer lugar, si la carga se encuentra en reposo, no se genera corriente, por lo que no hay emisión de radiación. En segundo lugar, si la carga se desplaza con velocidad constante a lo largo de un conductor idealmente recto e infinito, se pueden presentar dos situaciones: en ausencia de aceleración, no se emite radiación; sin embargo, en presencia de discontinuidades geométricas, como curvaturas, terminaciones o cambios bruscos en la trayectoria del conductor, la carga experimenta aceleraciones locales, lo que da lugar a la emisión de radiación electromagnética. Finalmente, cuando la carga realiza un movimiento oscilatorio en el tiempo, la corriente varía periódicamente, lo que genera radiación, incluso si el conductor es rectilíneo.

Estos principios son fundamentales en el análisis de antenas y sistemas radiantes, donde la geometría del conductor y la dinámica de la carga determinan la eficiencia y las características de la emisión electromagnética.

2.1.1. Patrón de radiación y su eficiencia

Un patrón de radiación de una antena se define como una función matemática o una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de las coordenadas espaciales, así como lo plantea (Balanis, 2005) en su libro.

El patrón de radiación describe cómo una antena o cualquier fuente de radiación electromagnética emite o recibe energía en el espacio, ya que no irradia uniformemente en todas las direcciones, sino que sigue una distribución específica. Generalmente, este patrón se estudia en la región de campo lejano, la cual será explicada más adelante, donde las ondas electromagnéticas se comportan como ondas planas y las variaciones debidas a la antena se estabilizan, evitando los efectos de acoplamiento que pueden presentarse en el campo cercano.

La manera en que una antena responde según la dirección se representa mediante su diagrama de radiación, el cual es idéntico tanto para la recepción como para la transmisión. Este patrón de radiación suele mostrar un lóbulo principal, que concentra la mayor parte de la energía y lóbulos menores que representan radiaciones secundarias, como se muestra en la figura 2.2.

Esta figura muestra un patrón de radiación típico, donde se observa cómo la antena, ubicada en el origen de coordenadas, distribuye la energía en el espacio. Por lo que es útil para evaluar, por ejemplo, la densidad de flujo de potencia que indica cuánta energía radiante atraviesa una cierta área en una dirección específica, la intensidad de radiación que mide la energía emitida en una dirección por unidad de ángulo sólido, la intensidad de

[2]Un dipolo eléctrico de media longitud de onda es una antena compuesta por dos brazos conductores cuya longitud total equivale a la mitad de la longitud de onda de la señal; esta configuración permite una oscilación resonante de la corriente, lo que maximiza la eficiencia en la emisión o recepción de radiación electromagnética.

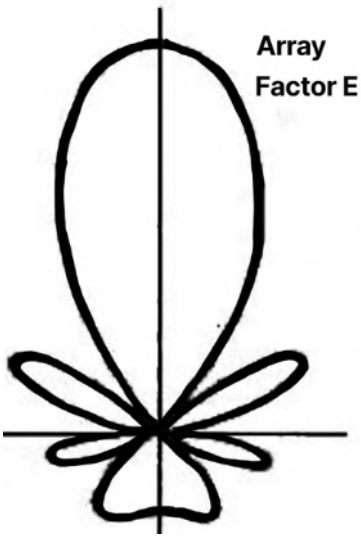


Figura 2.2: [Patrón de antena en coordenadas polares y escala de potencia lineal]. Tomado de Antennas. (p. 164), por J. Kraus, 1988, Editorial TATA MoGRAW-KILL.

campo que representa la amplitud de los campos eléctrico y magnético generados por la antena, la directividad que refleja la capacidad de la antena para concentrar la radiación en una dirección particular, la fase o polarización que describe la orientación del campo eléctrico de la onda irradiada, entre otros.

En este punto se mencionan varios conceptos técnicos relacionados con la radiación electromagnética —como densidad de flujo de potencia, intensidad de radiación, directividad, polarización, ángulo sólido, entre otros— que serán definidos y explicados con mayor detalle en secciones posteriores. No obstante, resulta útil referirse a ellos desde ahora para ilustrar los aspectos fundamentales del patrón de radiación.

Este patrón de radiación varía dependiendo de la distancia a la que se haga la medición como lo describe Kraus (1997), lo que da lugar a dos regiones principales:

1. Patrón de campo lejano: es cuando se realizan a una distancia suficientemente grande y la distribución de la energía es estable y predecible, sin cambios significativos al alejarse más. Esta región es clave para evaluar el desempeño de la antena en la práctica.

2. Patrón de campo cercano: ocurre cuando se mide a una distancia corta de la antena, en el cual la forma del patrón varía con la posición del observador. En esta zona, el campo electromagnético no está completamente formado, lo que puede hacer que las mediciones sean más complejas.

Dado que el patrón de radiación de una antena describe la manera en que la energía se distribuye en el espacio, su representación puede variar según la escala utilizada. Existe la escala lineal del patrón de campo que grafica la magnitud del campo eléctrico o magnético en función del ángulo de radiación, expresado en unidades como voltios por metro (V/m) o amperios por metro (A/m), enfoque que permite analizar la intensidad del campo en cada dirección sin necesidad de aplicar transformaciones matemáticas.

También está el patrón de potencia en escala lineal que representa el cuadrado de la magnitud del campo eléctrico o magnético dado que la potencia irradiada es proporcional

a este valor y, por tanto, los datos se muestran en una escala absoluta sin convertirlos a decibelios. Como muestra en la figura 2.3.

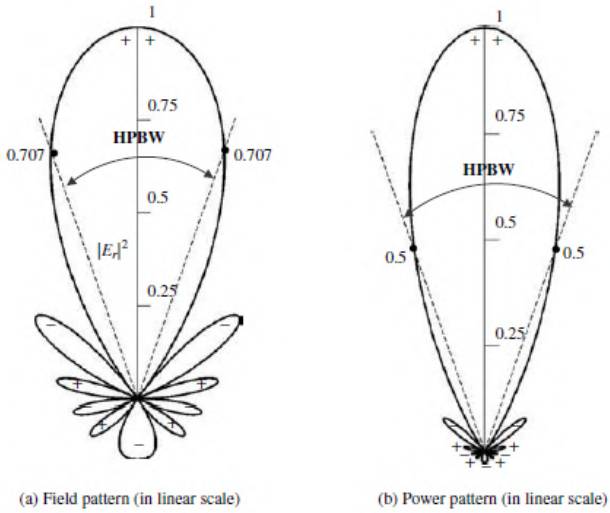


Figura 2.3: [Patrón de campo normalizado bidimensional (escala lineal) y patrón de potencia (escala lineal) de 10 elementos con un espaciado de $d = 0,25\lambda$. El ángulo entre la línea vertical, que divide el lóbulo en dos, y la línea punteada es de 34,64°] Tomado de Antenna Theory Analysis and Design.(p. 29), por C. Balanis, 2005, Editorial John Wiley & Sons, Inc.

La imagen de la izquierda muestra el patrón de campo en escala lineal, donde se grafica la magnitud del campo eléctrico o magnético en función del ángulo de radiación. Cabe resaltar que se trata de un campo normalizado, lo cual significa que su magnitud ha sido escalada respecto a su valor máximo, de modo que este valga 1. Esto permite analizar únicamente la forma angular del patrón sin considerar la intensidad absoluta del campo. En este caso, el ancho de haz a media potencia (HPBW, Half-Power Beamwidth) se encuentra en los puntos donde la magnitud del campo alcanza el 70,7 % de su valor máximo y los signos (+) y (−) dentro de los lóbulos indican la polarización relativa de la amplitud, la cual cambia de signo al cruzar los *nulos*[3].

Por otro lado, la parte derecha de la imagen representa el patrón de potencia en escala lineal, donde la radiación se muestra en función del cuadrado del campo eléctrico o magnético. En este caso, el HPBW se identifica en los puntos donde la potencia es 50 % del valor máximo. Al igual que en el patrón de campo, se observa la presencia de lóbulos secundarios, pero la escala cuadrática de la potencia resalta de manera diferente la distribución de la energía en el espacio. Ambas representaciones coinciden en la misma separación angular entre los puntos de media potencia, que es 38,64°, lo que es fundamental para el análisis del desempeño de la antena.

Estos gráficos son esenciales para caracterizar el desempeño de una antena. Mientras el patrón de campo describe la variación del campo eléctrico, el patrón de potencia muestra cómo se distribuye la energía irradiada.

Como se mencionó anteriormente, el patrón de radiación de una antena describe la distribución de la potencia irradiada en el espacio, la cual no se dispersa de manera uniforme en todas las direcciones, sino que se concentra en ciertas regiones específicas denominadas lóbulos de radiación. Como lo plantea Balanis (2005) un lóbulo de radiación

[3]Los nulos son las direcciones (ángulos) en el patrón de radiación donde la magnitud del campo radiado cae a cero, es decir, no hay radiación en esa dirección.

es una porción del patrón de radiación delimitada por regiones de intensidad de radiación relativamente débil, que pueden subclasificarse en lóbulos mayores o principales, menores, laterales y posteriores.

El lóbulo principal representa la dirección en la que la antena emite la mayor cantidad de energía y corresponde al área de máxima eficiencia. Su orientación se define por el ángulo en el que la radiación alcanza su valor máximo, los lóbulos menores corresponde a las regiones donde la radiación es menos intensa y suele considerarse energía no deseada. Dentro de estos, los lóbulos laterales aparecen adyacentes al lóbulo principal y pueden generar interferencias y pérdidas de eficiencia en sistemas de comunicación direccionales. Por otro lado, el lóbulo posterior se encuentra en la dirección opuesta al lóbulo principal y su existencia implica que parte de la energía no se concentra en la dirección deseada, reduciendo así la eficacia de la antena, como se puede observar en la imagen 2.4.

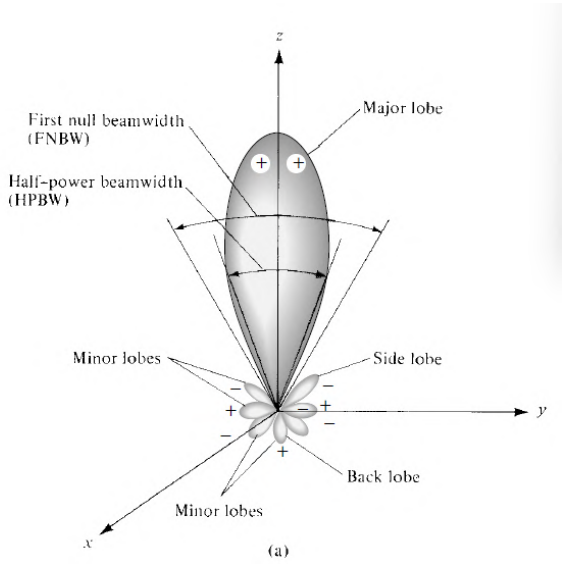


Figura 2.4: [Lóbulos de radiación y anchos de haz de un patrón de antena]. Tomado de Antenna Theory Analysis and Design.(p. 30), por c. Balanis, 2005, Editorial John Wiley & Sons, Inc.

Para representar y analizar estos patrones de radiación, se utilizan diagramas tridimensionales, que ofrecen una visualización completa del comportamiento de la antena en el espacio. El análisis de estos patrones es fundamental en el diseño y optimización de antenas, ya que permite evaluar su eficiencia y minimizar las pérdidas de energía en direcciones no deseadas.

En cualquier punto del espacio, el campo eléctrico de una onda electromagnética tiene tres componentes en un sistema esférico de coordenadas; la componente radial E_r, que actúa en la dirección de r; la componente E_θ, que se encuentra en la dirección del ángulo de elevación θ; y la componente E_ϕ, que corresponde a la dirección del ángulo azimutal ϕ.

En la región de campo lejano, la componente radial E_r suele ser despreciable, ya que su contribución es muy pequeña en comparación con las otras dos. Por lo tanto, el campo eléctrico total se obtiene combinando las otras dos componentes, por medio de la expresión:

$$|E| = \sqrt{|E_r|^2 + |E_\theta|^2 + |E_\phi|^2} \tag{2.6}$$

Dado que la onda viaja en la dirección radial, el campo eléctrico no tiene componente en

esa dirección, por lo que $E_r \approx 0$, la ecuación se reduce a:

$$|E| \approx \sqrt{|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2} \tag{2.7}$$

Por tanto, la magnitud $|E|$ obtenida a partir de las componentes transversales del campo eléctrico (E_θ, E_ϕ) es la que se representa en los diagramas de radiación para visualizar la distribución espacial de la intensidad del campo generado por la antena. Estos diagramas permiten identificar la dirección en la que la antena irradia o recibe con mayor eficacia.

Es fundamental entender que el *lóbulo principal* del patrón de radiación representa la dirección en la cual la antena concentra la mayor parte de su energía electromagnética, ya sea transmitiendo o recibiendo. Cuando una onda electromagnética incidente llega en la dirección del lóbulo principal, la antena puede acoplarse eficazmente con el campo eléctrico de la onda, maximizando la transferencia de energía y permitiendo una detección clara y precisa de la señal. En cambio, en las direcciones correspondientes a lóbulos secundarios o a los nulos del patrón, la sensibilidad disminuye, reduciendo la capacidad de detección. Por ello, la orientación y el diseño del lóbulo principal son claves para optimizar la recepción y minimizar interferencias o pérdidas por radiación en direcciones no deseadas, tal como se plantea en (Tutorialspoint, 2025a).

2.1.2. Densidad de potencia de radiación e intensidad de radiación

La densidad de potencia de radiación es un concepto fundamental en electromagnetismo, ya que las ondas electromagnéticas no solo transportan información, sino también energía a través de un medio inalámbrico o una guía de ondas. Por esta razón, es necesario asociar la potencia y la energía con los campos electromagnéticos, lo cual se logra mediante el uso del *vector de Poynting*[4].

Este vector de Poynting instantáneo se define como:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \tag{2.8}$$

donde $\vec{S}$ es el vector de Poynting, $\vec{E}$ es el campo eléctrico y $\vec{H}$ es el campo magnético. Este vector representa la densidad de potencia electromagnética, es decir, la cantidad de energía que fluye por unidad de área y por unidad de tiempo. Cuando se conoce el vector de Poynting en todos los puntos de una esfera de radio r centrada en una fuente puntual y ubicada en un medio sin pérdidas, es posible calcular la potencia total irradiada por dicha fuente. Esta se obtiene mediante la integral de la componente radial del vector de Poynting promedio sobre toda la superficie esférica.

De manera general, la potencia total que atraviesa una superficie cerrada se obtiene integrando la componente normal del vector de Poynting sobre dicha superficie. Matemáticamente, esto se expresa como:

$$W = \iint_S \vec{S} \cdot d\vec{s} \tag{2.9}$$

[4]Se define como el producto vectorial entre los campos eléctrico y magnético, representa la densidad de flujo de energía electromagnética y describe la dirección y magnitud del transporte de energía en un campo electromagnético.

donde W es la potencia radiada y ds es el elemento de área diferencial de la esfera, dado por $ds = r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi$. El resultado de esta ecuación indica que si es positivo la superficie está irradiando energía, mientras que si es negativo, indica que la superficie está absorbiendo energía.

Para una fuente puntual isotrópica de una antena, es decir, una que irradia energía uniformemente en todas las direcciones, en teoría, su patrón de radiación en tres dimensiones es una esfera perfecta, lo que significa que la potencia irradiada es la misma sin importar el ángulo de observación. El vector de Poynting tiene solo un componente radial S_r. Esto significa que la potencia fluye exclusivamente hacia afuera desde la fuente, sin componentes en las direcciones angulares θ y ϕ, es decir, $S_\theta = 0$ y $S_\phi = 0$. Como resultado, la magnitud del vector de Poynting es simplemente el valor del componente radial $|S| = S_r$.

Sin embargo, una fuente completamente isotrópica no es físicamente realizable, ya que todas las antenas reales tienen alguna directividad, es decir, tienden a radiar más energía en ciertas direcciones que en otras. En contraste, una fuente anisotrópica presenta una radiación direccional, lo que significa que su potencia no es la misma en todas las direcciones del espacio. A pesar de esto, en el análisis que se presenta a continuación se asumirá una fuente isotrópica ideal como modelo de referencia, debido a que permite simplificar el estudio y establecer comparaciones teóricas fundamentales.

Teniendo esto en cuenta, se puede reescribir la ecuación 2.9, tal como se observa en la ecuación 2.10:

$$W = \iint S_r \, ds \tag{2.10}$$

S_r es el componente radial del vector de Poynting promedio y eso mismo se llama densidad de potencia radiada.

Dado que el componente radial del vector de Poynting S_r no depende de los ángulos θ y ϕ, esto permite sacar S_r fuera de la integral:

$$W = S_r \iint ds \tag{2.11}$$

Evaluando la integral de ds sobre toda la esfera, simplemente da el área de la esfera, que es:

$$\iint ds = 4\pi r^2 \tag{2.12}$$

Por lo tanto, la potencia irradiada es:

$$W = S_r \cdot 4\pi r^2 \tag{2.13}$$

La ecuación 2.13, muestra que la potencia total irradiada es proporcional a S_r y al área de la esfera.

Con base en esto, ahora se puede definir la intensidad de radiación U, como:

$$U = r^2 S_r \tag{2.14}$$

Usando la definición anterior, la ecuación 2.10 y la forma del área diferencial en coordenadas esféricas escrita más arriba, podemos entonces expresar la potencia total irradiada como:

$$W = \iint S_r \, ds = \iint \frac{U}{r^2} \, r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi \tag{2.15}$$

A medida que se aleja de una fuente que radia en todas direcciones, la potencia se reparte sobre una esfera de radio r, y relacionándolo con el área de una esfera podemos entonces decir que la densidad de potencia, S_r, cae con $\frac{1}{r^2}$. Esto significa que, a medida que se aleja de la fuente emisora, cada metro cuadrado «recibe menos energía», no porque la fuente irradie menos, sino porque la misma energía total se reparte entre más espacio. Operando obtenemos que:

$$W = \iint U \, \sin\theta \, d\theta \, d\phi \tag{2.16}$$

Si se establece que $d\Omega = \sin\theta \, d\theta \, d\phi$ es un elemento de ángulo sólido en coordenadas esféricas, la expresión 2.16 se reescribe como:

$$W = \iint U \, d\Omega \tag{2.17}$$

Con ese resultado podemos decir que se puede integrar la intensidad de radiación U sobre un ángulo sólido, lo que es muy útil cuando se trabaja con patrones de radiación de antenas.

En el caso particular de una fuente isotrópica, que emite la misma intensidad de radiación en todas las direcciones del espacio, es decir, que no depende de los ángulos θ y ϕ, la función de densidad de potencia radiada se puede expresar como $U(\theta, \phi) = U_0$, y al establecer U_0 constante, entonces:

$$W = U_0 \iint d\Omega \tag{2.18}$$

La integral del ángulo sólido sobre toda la esfera es 4π, por lo que la potencia total irradiada es:

$$W = U_0 4\pi \tag{2.19}$$

y por ende la intensidad de radiación de una fuente isótropa U_0 es:

$$U_0 = \frac{W}{4\pi} \tag{2.20}$$

Este resultado permite estimar la potencia total irradiada por una fuente puntual, lo cual es fundamental para caracterizar la cantidad de energía electromagnética que una antena receptora puede captar desde una dirección dada.

2.1.3. Ancho de haz y su eficiencia

Retomando la figura 2.4, podemos observar el lóbulo principal, que es la zona donde la antena irradia la mayor parte de su energía. Este lóbulo está alineado con el eje z, que representa la dirección de máxima radiación. Es justamente en esta región donde se definen dos de las medidas más importantes del patrón de radiación: el HPBW y el FNBW, las cuales aparecen en la parte superior izquierda de la imagen.

El HPBW, por sus siglas en ingles “Half Power Beamwidth”, está indicado con una doble flecha más corta, abarcando el ángulo dentro del cual la potencia radiada cae hasta la mitad (o $-3dB$) del valor máximo. En la imagen, este ángulo se encuentra dentro del lóbulo principal, delimitando la parte más eficiente del haz. Este parámetro es crucial porque nos da una medida de cuán direccional es la antena: un HPBW más pequeño

implica una señal más concentrada y direccional, mientras que un HPBW más grande indica una cobertura más amplia pero menos enfocada.

Por otro lado, el FNBW (First Null Beamwidth), o Ancho del Haz entre los Primeros Nulos, también está representado con una flecha más extensa que abarca el ángulo entre los primeros puntos donde la radiación cae a cero (los nulos). Estos puntos están justo en los extremos del lóbulo principal, y en la figura se muestran fuera del área definida por el HPBW. El FNBW proporciona una medida más completa del tamaño total del lóbulo principal, aunque no necesariamente refleja con precisión la direccionalidad efectiva de la antena como lo hace el HPBW.

Además del HPBW y el FNBW, existen otros parámetros del ancho del haz que también se utilizan en el análisis de antenas. Una de ellas es el ancho del haz a -10dB o -20dB, que funciona de manera similar al HPBW pero considerando niveles de potencia más bajos. En lugar de medir el ángulo donde la potencia cae a la mitad, este parámetro mide el ángulo donde la potencia cae a *una décima* -10 dB *o una centésima* -20 dB[5]

del valor máximo. Este tipo de medida es útil para evaluar cuánta energía se dispersa fuera del lóbulo principal, incluyendo la que se dirige hacia los lóbulos secundarios, laterales o traseros, tal como se observa en la figura 2.4. Así, proporciona una visión más amplia de la distribución de la radiación, especialmente en aplicaciones donde es importante minimizar la radiación no deseada en otras direcciones.

Por último, mientras que medidas como el HPBW y FNBW consideran el haz en un solo plano (por ejemplo, el plano vertical o azimutal), el ángulo sólido ofrece una descripción más completa en tres dimensiones. Este parámetro representa el volumen espacial dentro del cual la antena concentra la mayor parte de su energía irradiada. Es decir, en lugar de un ángulo plano, se mide un "cono de cobertura" tridimensional, lo que resulta especialmente útil para estimar la cobertura global de la antena en el espacio y su eficiencia en la concentración de energía en una dirección determinada.

Así, podemos entender que al diseñar antenas, y según la aplicación que se les quiera dar, se deben tener en cuenta sus dimensiones y características. Una antena con un HPBW pequeño es útil para radares o telecomunicaciones de largo alcance, mientras que una con HPBW grande es más adecuada para coberturas amplias. Este parámetro resulta fundamental para comparar la eficiencia y la direccionalidad de diferentes antenas, ya que permite evaluar qué tan concentrada o dispersa está la energía radiada. Por esta razón, es esencial en aplicaciones como radiotelescopios, telecomunicaciones, radares y sistemas de transmisión.

Como se había mencionado anteriormente para describir el patrón de radiación de una antena se usa el ángulo sólido (Ω_A), lo cual es útil en el análisis de la directividad y eficiencia de la radiación, este se define según Kraus (1997) como el ángulo a través del cual fluiría toda la potencia de una antena transmisora si la potencia (por unidad de ángulo sólido) fuera constante en este ángulo e igual al valor máximo.

Kraus en su libro define el ángulo sólido del haz de la antena (Ω_A) matemáticamente

[5]Una caída de -10 dB equivale a una décima parte de la potencia máxima, ya que $10^{-1} = \frac{1}{10}$; de forma similar, una caída de -20 dB corresponde a una centésima parte: $10^{-2} = \frac{1}{100}$. El signo negativo aparece porque se está tomando el logaritmo de una fracción menor que 1 al comparar con la potencia máxima: $10\log_{10}(P/P_0) < 0$ si $P < P_0$.

como:

$$\Omega_A = \iint_{4\pi} P_n(\theta, \phi) d\Omega \tag{2.21}$$

En donde, $P_n(\theta, \phi)$ es el patrón de potencia de antena normalizado, el cual es *adimensional*[6] y $d\Omega = \sin\theta \, d\theta \, d\phi$ es un elemento de ángulo sólido en coordenadas esféricas.

Esta integración se realiza sobre toda la esfera, es decir, sobre un total de 4π *estereorradianes*.[7] En este contexto, el valor 4π cubre todo el espacio tridimensional alrededor de la antena.

Así como el ancho de haz mide la extensión del haz en un plano, el ángulo sólido extiende esta idea al espacio tridimensional, permitiendo cuantificar la región espacial en la que la antena irradia su energía. Esta medida puede aplicarse tanto al patrón de radiación completo como únicamente a una parte específica, como el haz principal o alguno de los lóbulos secundarios.

En particular, el ángulo sólido del haz principal, denotado como Ω_M(por Main lobe),se calcula considerando únicamente la región del espacio donde se concentra la mayor parte de la energía radiada, es decir, el lóbulo principal del patrón de radiación. Esta medida es útil no solo para estimar la direccionalidad efectiva de una antena transmisora, sino también para una antena receptora, ya que indica desde qué dirección se recibirán con mayor eficiencia las ondas electromagnéticas incidentes, mejorando la captación de señales en esa zona espacial específica.

$$\Omega_M = \iint_{\text{main lobe}} P_n(\theta, \phi) d\Omega \tag{2.22}$$

Considerando ahora el ángulo sólido de los lóbulos secundarios denotado como Ω_s, puede obtenerse restando el ángulo sólido del haz principal Ω_M del ángulo sólido total irradiado por la antena Ω_A

$$\Omega_s = \Omega_A - \Omega_M \tag{2.23}$$

Este valor representa la energía radiada en direcciones distintas al haz principal, es decir, aquella asociada a los lóbulos secundarios, laterales o traseros. Esta radiación se considera generalmente no deseada, ya que puede generar interferencias en otras direcciones o reducir la eficiencia en la transmisión o recepción de la señal.

En el caso ideal, cuando la antena no presenta lóbulos secundarios $\Omega_s = 0$, toda la energía está concentrada únicamente en el lóbulo principal, y $\Omega_A = \Omega_M$.

2.1.4. Directividad

Otro parámetro fundamental en el diseño de una antena es la directividad D, la cual representa cuántas veces es más intensa la radiación en la dirección de máxima emisión, en comparación con una antena ideal que distribuye su energía de manera uniforme en todas las direcciones (una fuente isotrópica). Cuanto mayor sea la directividad, más concentrada

[6] Es adimensional porque se define como el cociente entre la potencia (o densidad de potencia) radiada en una dirección dada y el valor máximo de esta. Al tratarse de una razón entre magnitudes con las mismas unidades, el resultado es un número sin dimensión.

[7] Unidad de medida establecida por el Sistema Internacional de Unidades del ángulo sólido que abarca una superficie en una esfera igual al cuadrado del radio de la esfera.

estará la energía, lo que significa que la antena puede enviar o recibir señales más fuertes en esa dirección específica.

Según lo expuesto por (Balanis, 2005), la directividad se define como la relación entre la intensidad de radiación en una dirección específica U y la intensidad de radiación promedio en todas las direcciones del espacio U_0 la cual corresponde a la intensidad de radiación de una fuente isotrópica. Esta relación se expresa mediante la ecuación:

$$D = \frac{U}{U_0} \tag{2.24}$$

Recordando que en la ecuación 2.20 se definió U_0, la expresión de la directividad puede reescribirse como:

$$D = \frac{4\pi U}{W} \tag{2.25}$$

A diferencia de la directividad general D, que puede calcularse en cualquier dirección y se utiliza para analizar cómo varía el patrón de radiación con el ángulo, existe una forma particular de expresar la máxima concentración de energía irradiada en la dirección principal. Esta se conoce como directividad máxima y se representa como D_0. En este caso, lo que se busca es conocer qué tan intensa es la radiación en la dirección de mayor emisión, y se expresa mediante:

$$D_0 = \frac{U_{\max}}{U_0} \tag{2.26}$$

Al igual que en el caso anterior, es posible sustituir la expresión de U_0 por su definición, lo que permite obtener la siguiente forma de la ecuación:

$$D = \frac{4\pi U_{\max}}{W} \tag{2.27}$$

donde $U_{\max}$ es la intensidad de radiación máxima.

2.1.5. Ganancia

En la sección anterior se discutió el concepto de directividad, que describe cómo una antena enfoca la energía en una dirección específica, en lugar de distribuirla de manera uniforme en todas las direcciones. Sin embargo, la directividad no tiene en cuenta las pérdidas internas de la antena, como aquellas causadas por resistencias o materiales imperfectos.

A partir de esto, podemos introducir el concepto de ganancia G. A diferencia de la directividad, la ganancia no solo toma en cuenta la capacidad de la antena para concentrar la energía, sino también su eficiencia. Es decir, la ganancia evalúa cuánto de la energía generada se irradia efectivamente, considerando las pérdidas que puedan ocurrir, como aquellas que se convierten en calor debido a las imperfecciones de la antena.

Si se supone que existen dos versiones de una misma antena: una antena real, que presenta pérdidas, donde parte de la potencia suministrada se disipa, lo que implica que no toda la energía se convierte en radiación; y una antena de referencia o ideal, en la que toda la potencia que se le aplica se convierte de manera eficiente en ondas electromagnéticas. Para evaluar el rendimiento de la antena en términos de radiación, una forma común es medir la intensidad de radiación, tal como se explica a continuación.

La ganancia se puede representar como la razón entre la intensidad de radiación máxima $U_{\max}$ y la intensidad máxima de radiación generada por una antena de referencia $U_{\max,\,\mathrm{ref}}$. Ambas antenas son alimentadas con la misma potencia de entrada. Esta definición es general y permite utilizar diferentes antenas como referencia. Matemáticamente expresada como:

$$G = \frac{U_{\max}}{U_{\max,\,\mathrm{ref}}} \tag{2.28}$$

Una situación común y especialmente útil es tomar como referencia una fuente isotrópica ideal, es decir, una antena que irradia con la misma intensidad en todas las direcciones y que no presenta pérdidas (eficiencia del 100 %). En ese caso, la ganancia se denomina ganancia absoluta o ganancia con respecto a una fuente isotrópica, y se denota G_0:

$$G_0 = \frac{U'_{\max}}{U_0} \tag{2.29}$$

donde $U'_{\max}$ es la intensidad de radiación máxima de la antena real, U_0 es la intensidad de radiación uniforme de la fuente isotrópica ideal, alimentada con la misma potencia de entrada.

Con esta idea en mente, si consideramos que una antena real irradia solo una fracción de la potencia que irradiaría su versión ideal, podemos definir un factor de eficiencia, denotado como k, que cuantifica la capacidad de la antena para convertir la potencia que se le suministra en energía radiada. Este factor se expresa mediante la siguiente relación:

$$U'_{\max} = kU_{\max} \tag{2.30}$$

donde k representa la eficiencia de radiación de la antena

Físicamente, este factor de eficiencia cumple con el intervalo $0 \leq k \leq 1$. Si $k = 1$, significa que no hay pérdidas internas: toda la potencia suministrada a la antena se convierte en radiación electromagnética, lo cual corresponde a una antena ideal. Si $0 < k < 1$, la antena presenta pérdidas (por ejemplo, en forma de calor debido a resistencias internas o materiales no ideales), por lo que solo una fracción de la potencia se irradia. Finalmente, si $k = 0$, la antena no radia absolutamente nada: toda la potencia se pierde internamente, esto representa un caso límite teórico.

Lo anterior refleja el principio de conservación de la energía, una antena no puede radiar más energía de la que recibe, y las pérdidas inevitables en sistemas reales hacen que k sea típicamente menor que 1.

Considerando la ecuación 2.30, la ecuación 2.29 puede reescribirse como:

$$G_0 = \frac{U'_{\max}}{U_0} = \frac{kU_{\max}}{U_0} \tag{2.31}$$

Empleando la expresión obtenida en la ecuación 2.26, es posible sustituirla en la ecuación 2.31 y así obtener la relación:

$$G_0 = kD_0 \tag{2.32}$$

Donde la ecuación anterior muestra una relación directa entre la ganancia absoluta G_0 y la directividad máxima D_0, lo que implica que para una antena ideal, la directividad va a tener toda la intensidad de radiación en el lóbulo principal.

2.1.6. Ancho de banda

El ancho de banda (BW) de una antena es el rango de frecuencias en el que la antena funciona correctamente o dentro de unos límites aceptables respecto a una característica específica, se tiene una frecuencia principal f_0 y ese ancho de banda está distribuido por encima y por debajo de esa frecuencia. Por lo que, aunque una antena está diseñada para funcionar mejor a f_0, también puede seguir siendo eficiente en un intervalo determinado, siempre y cuando sus parámetros no se alejen demasiado de los ideales.

$$BW = f_{\text{máx}} - f_{\text{mín}} \tag{2.33}$$

En el caso de las antenas de banda ancha, el ancho de banda se cuantifica mediante la relación entre la frecuencia más alta y la más baja dentro de este rango óptimo de funcionamiento. De esta manera, se puede evaluar su capacidad para emitir o recibir señales en un espectro más amplio.

Aquí se puede trabajar con la razón entre estas dos:

$$BW_{\text{relativo}} = \frac{f_{\text{máx}}}{f_{\text{mín}}} \tag{2.34}$$

A diferencia de una antena de banda ancha, que es aquella que puede operar bien en un rango muy amplio de frecuencias, está también la antena de banda estrecha, que solo sirve para un rango muy específico y pequeño.

Se usa una expresión porcentual, basada en la frecuencia central y el rango total útil de frecuencias:

$$BW = \frac{f_{\text{máx}} - f_{\text{mín}}}{f_0} \times 100 \tag{2.35}$$

y la frecuencia central se puede tomar como:

$$f_0 = \frac{f_{\text{máx}} + f_{\text{mín}}}{2} \tag{2.36}$$

En bandas estrechas, la diferencia entre $f_{\text{máx}}$ y $f_{\text{mín}}$ es muy pequeña en comparación con la frecuencia central, así que usar un porcentaje facilita comparar antenas que trabajan en distintas bandas pero tienen una tolerancia similar.

Adicionalmente, (Balanis, 2005), establece que debido a que las características (patrón, ganancia, polarización, etc.) de una antena no varían necesariamente de la misma manera o incluso se ven afectadas críticamente por la frecuencia, no existe una caracterización única del ancho de banda. Una antena es un sistema que tiene varias propiedades técnicas importantes y cuando se varía la frecuencia de la señal que le llega así mismo varían en sus características, por ejemplo, el patrón de radiación del lóbulo principal se deformaría, la ganancia podría subir o bajar, entre otros.

Cada aplicación de una antena tiene necesidades distintas, así que los parámetros que se consideran importantes para definir su ancho de banda pueden cambiar según el caso, por lo que se suele hacer una distinción entre dos tipos de variaciones con la frecuencia; las que afectan el patrón de radiación y las que afectan la impedancia de entrada.

Cuando hablamos de las que afectan el patrón de radiación, nos interesa mantener el comportamiento direccional de la antena. Se ven afectadas cantidades como; la ganancia, permitiendo determinar si se sigue emitiendo en la dirección deseada, también el ancho

del haz, determinando si sigue concentrando correctamente la energía. Si cualquiera de estas cambia demasiado, decimos que la antena ya no está dentro de su ancho de banda de patrón.

Por otro lado, cuando las variaciones con la frecuencia afectan la impedancia de entrada de la antena, es importante identificar el rango de frecuencias en el que dicha impedancia se mantiene suficientemente cercana al valor ideal (por ejemplo, 50 ohmios). Esto permite minimizar las reflexiones de la señal y maximizar la transferencia de energía entre la antena y el sistema de transmisión o recepción. En este caso, el ancho de banda se relaciona directamente con la eficiencia con la que la antena transmite o recibe energía, más allá de su comportamiento direccional.

2.1.7. Polarización

La polarización de una onda electromagnética se define a partir de la evolución temporal del vector del campo eléctrico y la magnitud relativa de sus componentes en direcciones perpendiculares a la dirección de propagación. Visualmente, puede interpretarse como la trayectoria que describe el extremo del vector del campo eléctrico en un punto fijo del espacio, a lo largo del tiempo mientras la onda se propaga.

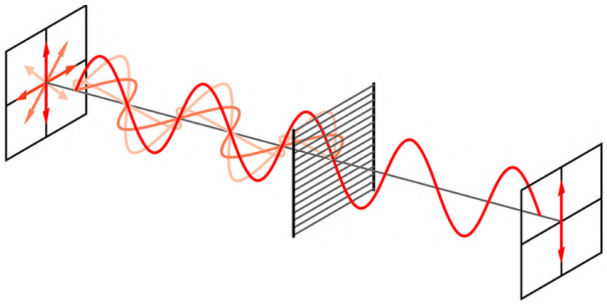


Figura 2.5: [Efecto de un polarizador sobre una onda para obtener una polarización lineal]. Tomado de Fisicotrónica. Recuperado de https://fisicotronica.com/polarizacion-de-ondas-electromagneticas/

En la figura 2.5 se ilustra el efecto de un polarizador sobre una onda electromagnética. Al inicio, se observa una onda con una trayectoria compleja, que representa un campo eléctrico con componentes en varias direcciones. Esta onda pasa por una serie de filtros polarizadores, que actúan seleccionando únicamente la componente del campo eléctrico alineada con su orientación. Como resultado, la onda que emerge después del último polarizador muestra una trayectoria más simple y lineal, indicando que ahora está polarizada linealmente. Es decir, el campo eléctrico oscila solo en una dirección específica, eliminando otras componentes. Este proceso ayuda a visualizar cómo los polarizadores pueden transformar una onda electromagnética con polarización arbitraria en una con polarización controlada.

Esta trayectoria refleja cómo varía la dirección y magnitud del campo eléctrico en ese punto, y depende de la relación de fase y amplitud entre sus componentes transversales. La figura resultante, como una línea recta, una elipse o un círculo, representa la polarización de la onda y se observa desde una perspectiva alineada con la dirección de propagación. En este contexto, la polarización describe la forma geométrica que traza el campo eléctrico transversal con el tiempo.

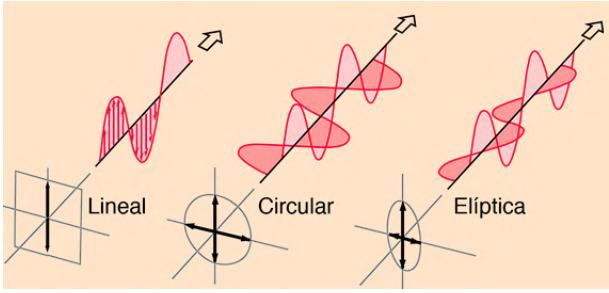


Figura 2.6: [Tipos de polarización de ondas transversales]. Tomado de Fisicotrónica. Recuperado de https://fisicotronica.com/polarizacion-de-ondas-electromagneticas/

Como se muestra en la figura anterior 2.6, existen tres tipos principales de polarización de ondas electromagnéticas: lineal, circular y elíptica. En la polarización lineal, el campo eléctrico oscila siempre en una misma dirección fija mientras la onda se propaga, representado mediante una línea recta. En la polarización circular, la dirección del campo eléctrico gira uniformemente formando un círculo, lo cual ocurre cuando las componentes del campo eléctrico tienen igual magnitud, pero están desfasadas exactamente 90 grados. Finalmente, en la polarización elíptica, la trayectoria del campo eléctrico forma una elipse, lo que indica una diferencia de fase distinta a 90 grados o amplitudes desiguales entre las componentes. Estas formas geométricas reflejan cómo varía el campo eléctrico en el tiempo desde el punto de vista de un observador en la dirección de propagación.

La polarización de una antena hace referencia a la orientación de la onda electromagnética que esta emite. En particular, cuando se menciona la polarización sin especificar una dirección, se asume que corresponde a la dirección en la que la antena alcanza su máxima ganancia. Sin embargo, en la práctica, la polarización no es completamente uniforme, ya que varía según la dirección en la que se propaga la señal desde el centro de la antena. Como resultado, diferentes regiones del patrón de radiación pueden presentar distintas polarizaciones.

Por ejemplo, si consideramos una onda electromagnética que se propaga en la dirección z, con un campo eléctrico $\vec{E}$ compuesto por dos componentes ortogonales: una en la dirección x y otra en la dirección y. Cada componente oscila como una función cosenoidal en el tiempo y el espacio:

$$E_x(z,t) = E_{0x}\cos(kz - \omega t + \phi_x) \tag{2.37}$$

$$E_y(z,t) = E_{0y}\cos(kz - \omega t + \phi_y) \tag{2.38}$$

Aquí, E_{0x} y E_{0y} son las amplitudes de las componentes en x y y, respectivamente; ω es la frecuencia angular; k es el número de onda; y ϕ_x, ϕ_y son las fases iniciales. La forma en que estas dos componentes se combinan determina el tipo de polarización de la onda.

Por ejemplo, si las amplitudes son iguales y la diferencia de fase $\Delta\phi = \phi_y - \phi_x$ es de $90°$ (o $\pi/2$), la onda es circularmente polarizada, si hay diferencia de amplitudes o la fase no es exactamente $90°$, pero aún hay un desfase, la onda será elípticamente polarizada, y si no hay desfasaje ($\Delta\phi = 0$ o múltiplos de π) y las amplitudes pueden ser iguales o distintas, la polarización será lineal.

La figura 2.7 ilustra este comportamiento mostrando la propagación de la onda electromagnética y su polarización.

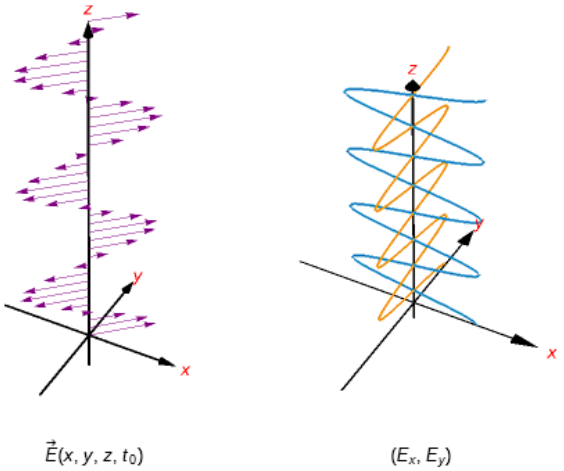


Figura 2.7: [Ejemplo de polarización de una onda electromagnética]. Tomado de Wolfram Demonstrations Project. Recuperado de https://demonstrations.wolfram.com/PolarizationOfAnElectromagneticWave/

En la parte izquierda de la figura 2.7, se representa el vector de campo eléctrico $\vec{E}$ en función del espacio (x, y, z) en un tiempo fijo t_0. Se observa que el campo eléctrico varía de manera perpendicular a la dirección de propagación (z), lo que indica que la onda es transversal. Las flechas muestran la orientación del campo eléctrico en distintos puntos a lo largo del eje z, evidenciando su oscilación en el plano transversal (x, y). En la parte derecha de la figura 2.7, se presentan los dos componentes del campo eléctrico, E_x y E_y, lo que permite visualizar su comportamiento y determinar la polarización de la onda. Las dos curvas, representadas en azul y naranja, corresponden a los componentes E_x y E_y, respectivamente. La trayectoria resultante de la combinación de ambos componentes indica que la onda tiene una polarización elíptica, ya que el vector del campo eléctrico traza una elipse en el plano transversal conforme la onda avanza en la dirección z.

Para finiquitar, la polarización constituye una propiedad fundamental de las ondas electromagnéticas que describe la geometría de la oscilación del campo eléctrico en el plano transversal. Comprender cómo se determina y modifica la polarización —ya sea mediante filtros, condiciones de emisión o interacción con el medio— es esencial tanto para el análisis teórico como para aplicaciones prácticas. En el contexto de dispositivos como las antenas, la polarización no solo afecta la eficiencia de transmisión y recepción, sino que también permite optimizar la captación de señales específicas al ajustar su orientación y compatibilidad polarizada.

2.2. Antena Helicoidal

La antena helicoidal fue propuesta por primera vez por John D. Kraus en 1946. Su diseño demostró que podía usarse para transmitir y recibir ondas electromagnéticas con polarización circular, lo que la hizo muy útil en aplicaciones de telecomunicaciones y satélites.

La idea de la antena helicoidal surgió a partir de experimentos prácticos realizados por Kraus. Después de asistir a una conferencia sobre tubos de ondas viajeras, se preguntó si una hélice podría funcionar como antena. Intrigado por la idea, decidió ponerla a prueba

en su propia casa, donde construyó y experimentó con su primer diseño, como se plantea a continuación:

> Esa tarde, en el sótano de mi casa, enrollé una bobina helicoidal de siete vueltas de alambre de 12 pulgadas de circunferencia y la alimenté a través de una línea coaxial y un plano de tierra desde mi oscilador de 12 cm. Me emocioné al descubrir que producía un haz nítido de radiación polarizada circularmente desde su extremo abierto.(Kraus, 1950, p. 146)

El estudio de la antena helicoidal permitió identificar diversos aspectos sobre su comportamiento. Por ejemplo, si se incrementa o reduce el diámetro de la hélice, manteniendo las demás dimensiones constantes, el funcionamiento presenta pocas variaciones en términos de radiación, impedancia, eficiencia, entre otros. Sin embargo, al aumentar el número de vueltas, el haz emitido se vuelve más preciso y definido. Aunque el desarrollo de este tipo de antena ocurrió de manera relativamente rápida, su comprensión completa requirió un análisis más profundo.

Uno de los primeros hallazgos importantes fue que la *impedancia*[8] de entrada de la hélice se mantenía prácticamente constante y resistiva en un amplio rango de frecuencias. Lo cual indica que la antena opera de manera similar a una *línea de transmisión*[9] terminada.

Con esto podemos hacer referencia a cómo la antena helicoidal maneja la propagación de las ondas electromagnéticas. En una línea de transmisión ideal, si la impedancia de carga es igual a la impedancia característica de la línea, no hay reflexión de ondas y toda la energía se transfiere eficientemente. En el caso de la antena helicoidal, su impedancia de entrada es prácticamente constante y resistiva, lo que sugiere que se comporta como una línea de transmisión bien adaptada. Esto significa que las ondas electromagnéticas que viajan a lo largo de la estructura no sufren grandes reflexiones en el extremo de la línea, lo cual minimiza las pérdidas por reflexión y facilita la transmisión eficiente de energía electromagnética.

Estos resultados al principio, se consideraron inesperados debido a la ausencia de una terminación evidente en su extremo abierto. Para analizar este fenómeno, se llevaron a cabo mediciones de la distribución de corriente a lo largo de la hélice mediante una sonda de corriente, mientras la antena y su plano de tierra eran girados. Los resultados mostraron que, a bajas frecuencias, la hélice generaba una onda estacionaria casi pura, con ondas salientes y reflejadas de magnitudes similares. No obstante, a medida que la frecuencia aumentaba, la distribución de corriente también se modificaba, proporcionando nuevos conocimientos sobre el funcionamiento de esta estructura electromagnética.

A frecuencias bajas, cuando la circunferencia de la hélice es aproximadamente $\lambda/2$, se forma una onda estacionaria casi pura, lo que indica que las ondas incidentes y reflejadas tienen amplitudes similares. Este comportamiento se reflejaba en un índice de onda estacionaria *(VSWR)*[10] elevado, señal de una fuerte reflexión de la señal.

Sin embargo, a medida que la frecuencia aumentaba y la circunferencia de la hélice alcanzaba aproximadamente $\lambda/2$, la distribución de corriente cambió significativamente,

[8] Representa la cantidad de ohm con la cual se opone a la circulación de corriente.

[9] Tipo de guía de ondas utilizada principalmente en el rango de frecuencias más bajas dentro del espectro electromagnético.

[10] Representa la relación entre el valor máximo y mínimo de la amplitud de las ondas estacionarias que se forman cuando una parte de una señal de alta frecuencia se refleja al pasar por una línea de transmisión.

dividiéndose en tres regiones distintas. En la zona cercana al extremo de entrada, la corriente disminuía exponencialmente, lo que sugería una transición entre el modo de propagación de la hélice y el plano de tierra. En el extremo abierto, se formaba una onda estacionaria sobre una distancia corta, mientras que en la región intermedia la amplitud de la corriente se mantenía relativamente uniforme, con un VSWR bajo. Este último resultado indicaba que la onda saliente dominaba sobre la reflejada, lo que favorecía la transmisión eficiente de la energía.

El análisis mostró que la reflexión de la onda saliente en el extremo abierto de la antena disminuía exponencialmente, lo que resultaba en una onda reflejada de menor intensidad. Esto explicaba por qué la onda saliente se mantenía como el componente dominante en la mayor parte de la hélice. A pesar de la pequeña variación en el VSWR, esta fue suficiente para medir la velocidad de fase relativa de la onda a lo largo de la antena, proporcionando información clave sobre sus patrones de radiación.

2.2.1. Geometría y modos de operación de una antena helicoidal

La hélice es una forma geométrica tridimensional que se genera cuando un objeto delgado, como un alambre, se enrolla en espiral alrededor de un eje mientras avanza de manera continua a lo largo de este. Esta combinación de rotación y desplazamiento crea una estructura que no es plana, sino que ocupa espacio en las tres dimensiones. De forma análoga, si una hélice enrollada sobre un cilindro se desenrolla al hacerlo rodar sobre una superficie plana, el alambre adopta una forma recta. Este fenómeno permite relacionar la hélice con trayectorias rectas y rotacionales, y es fundamental para entender estructuras como las antenas helicoidales, donde intervienen tres dimensiones clave: el largo (avance total), el ancho (diámetro de la espira) y el alto (distancia entre cada vuelta o paso).

Al observar la hélice desde una vista frontal, su forma proyectada es circular, debido a su rotación alrededor de un eje. Este movimiento genera una combinación de tres formas geométricas: una línea recta, ya que el alambre sigue una trayectoria recta a medida que avanza; un círculo, pues cada vuelta de la hélice describe una trayectoria circular; y un cilindro, pues la hélice gira alrededor de un eje, formando una estructura cilíndrica imaginaria.

Además, otra característica importante es que las hélices presentan lateralidad, lo que significa que pueden clasificarse como derechas o izquierdas, dependiendo del sentido en que giran: una hélice es derecha si gira en el sentido de las agujas del reloj al mirarla desde un extremo, e izquierda si lo hace en sentido contrario.

Krauss estableció que existen diferentes características para describir la geometría de una hélice como se muestra en la figura 2.8, en donde

- D es el diámetro de la hélice, medido de centro a centro, corresponde a la distancia entre los ejes centrales opuestos del conductor en una espira, y define el diámetro del cilindro imaginario sobre el que se enrolla el alambre, sin tener en cuenta el grosor del mismo.
- O o C es la circunferencia de la hélice, donde $C = \pi D$
- RZ o S es el espaciamiento entre vueltas (de centro a centro)
- α es el ángulo de inclinación o de paso, donde $\alpha = \arctan\left(\frac{S}{\pi D}\right)$

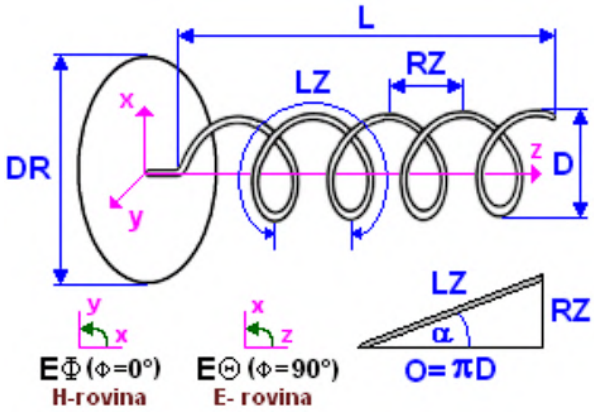


Figura 2.8: [Descripción de una antena helicoidal]. Tomado de Antena helicoidal - Calculadora java. Recuperado de https://www.qsl.net/on6jc/ant/helix/helixcalc.html

- LZ es la longitud de 1 vuelta
- n es el número de vueltas
- L es la longitud axial en donde $L = nS$
- d es el diámetro del conductor helicoidal

El diámetro D y la circunferencia C se refieren al cilindro imaginario cuya superficie pasa por la línea central del conductor helicoidal.

En algunas circunstancias, el subíndice λ significa que la dimensión se mide en longitudes de onda en el espacio libre; lo que significa cuántas longitudes de onda caben en ese espacio o en qué tan grandes son las dimensiones en comparación con la longitud de onda.

A partir de estas características se plantea que:

> Las dimensiones de una hélice se pueden expresar en coordenadas rectangulares mediante el espaciado S_λ y la circunferencia C_λ, o en coordenadas polares mediante la longitud de 1 vuelta LZ_λ y el ángulo de paso α . Cuando el espaciado es cero, $\alpha = 0$ y la hélice se convierte en un bucle. Por otro lado, cuando el diámetro es cero, $\alpha = 90°$ y la hélice se convierte en un conductor lineal. (Kraus, 1950, p. 146)

En relación con la cita, es relevante enfatizar en cómo el ángulo de paso α se convierte en un parámetro clave para controlar tanto la geometría como las propiedades de radiación de la antena. La capacidad de ajustar el ángulo α abre posibilidades para adaptar la antena a distintos rangos de frecuencia y polarización, lo que podría terminar siendo útil para aplicaciones de radioastronomía, donde es fundamental modificar las propiedades radiativas para obtener resultados óptimos.

Con lo anterior, podemos afirmar que las propiedades radiativas de la antena pueden modificarse ajustando sus dimensiones geométricas en relación con la longitud de onda. La impedancia de entrada está fuertemente influenciada por el ángulo de paso y el grosor del conductor, sobre todo en la zona de alimentación, y puede ser afinada mediante el control de estos parámetros. Aunque la polarización predominante de la antena es elíptica,

también es posible obtener polarizaciones circular y lineal en determinados rangos de frecuencia.

Una antena helicoidal puede operar en diferentes modos, pero los dos más importantes son el modo normal (broadside) y el modo axial (end-fire), como se muestra en la figura 2.9. En el modo normal, parte izquierda de la figura, la antena radia en una dirección perpendicular al eje de la hélice, generando un patrón de radiación similar al de un dipolo pequeño o un lazo circular, donde la máxima radiación se produce en un plano transversal al eje. En cambio, en el modo axial —representado en la parte derecha de la figura—, la radiación se orienta a lo largo del eje de la hélice, hacia adelante o hacia atrás, y el patrón es comparable al de un conjunto de antenas, con máxima radiación en la dirección del eje.

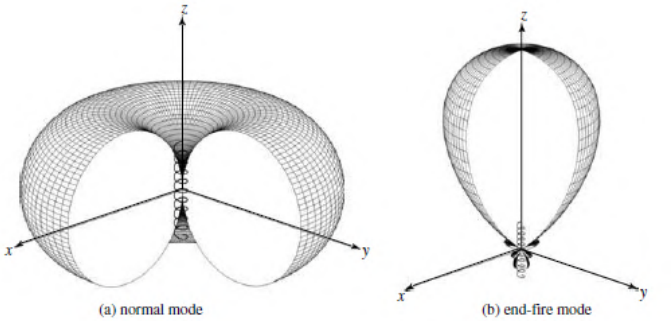


Figura 2.9: [Patrones de potencia lineal de amplitud normalizada tridimensionales para diseños helicoidales en modo normal y modo axial]. Tomado de Antenna Theory Analysis and Design.(p. 30), por C. Balanis, 2005, Editorial John Wiley & Sons, Inc.

En el modo normal, la antena emite principalmente hacia los lados, con muy poca o nula radiación a lo largo del eje; esto se puede imaginar como una linterna encendida que no emite luz en la dirección hacia la que apunta. En cambio, en el modo axial, la señal sí se propaga a lo largo del eje, como si esa linterna efectivamente iluminara hacia adelante, lo cual es más útil para muchas aplicaciones.

El modo axial suele ser el más práctico y eficiente, ya que permite obtener polarización circular, lo cual es muy beneficioso en radioastronomía porque la orientación de la señal gira de forma constante y uniforme. Además, este modo permite trabajar con mayores anchos de banda, lo que significa que puede captar una gama más amplia de señales.

Para que la hélice funcione en modo normal, sus dimensiones deben ser pequeñas en comparación con la longitud de onda de la señal. En este caso, la hélice se comporta como un lazo o un dipolo, por lo que el campo lejano que radia puede describirse en términos de las componentes eléctricas típicas de estos: la componente E_θ, que es propia de un dipolo, y la componente E_ϕ, asociada a un lazo. En resumen, el modo normal concentra su radiación en el plano perpendicular al eje de la antena, mientras que el modo axial lo hace en la dirección del eje, siendo este último el más usado en entornos espaciales.

2.3. Contextualización de la Antena Helicoidal

En el ámbito aeroespacial colombiano, se han gestado notables progresos que marcan un hito en la historia científica del país. Uno de los proyectos que testimonia estos avances es el generado por la *Fundación Cydonia:*[11] Hábitat Análogo de Exploración Espacial

[11] Una entidad sin ánimo de lucro, que busca promover y acercar las ciencias espaciales a todos.

Simulada – Colombia (HAdEES-C), una iniciativa pionera que representa la estación análoga colombiana diseñada para la ejecución de misiones simuladas relacionadas con viajes espaciales de Marte y la Luna, en la figura 2.10 se puede observar el hábitat.



Figura 2.10: [HAdEES-C]. Nota. Fotografía tomada por Oscar Ojeda, 2025.

Más allá de su impacto en la simulación de misiones espaciales, este proyecto impulsa el desarrollo y la investigación en diversas áreas del conocimiento, como las ingenierías biomédica y aeroespacial, las geociencias, la medicina y la física, entre otras. Aunque su incursión en el estudio de fenómenos físicos es reciente, ha comenzado a involucrarse en la exploración del espacio a través del análisis de ondas electromagnéticas, con un enfoque particular en la detección de emisiones solares mediante el uso de antenas especializadas.

En el contexto de una estación espacial simulada como el HAdEES-C, resulta fundamental comprender los efectos de las fulguraciones solares, ya que estas liberan grandes cantidades de radiación que pueden alterar las características eléctricas de la atmósfera terrestre y generar variaciones en el clima espacial. “Este fenómeno no solo impacta la operación de sistemas de geolocalización, las telecomunicaciones, operaciones vía satélite, seguimiento espacial y radionavegación, sino que también puede resultar en sobrecargas en las redes eléctricas” (Arnold, 2013, p. 84).

Esta cita muestra que estas alteraciones representan un desafío significativo para la infraestructura tecnológica tanto en la Tierra como en el ámbito espacial, por lo que su monitoreo y estudio son esenciales en el desarrollo de misiones simuladas y sistemas de detección. En este contexto, las simulaciones realizadas en el hábitat análogo permiten estudiar estos fenómenos en un entorno controlado, contribuyendo al desarrollo de investigaciones en las futuras tripulaciones.

La antena helicoidal empleada en este trabajo de grado tiene su origen en la Universidad Nacional de Colombia, institución en la que fue diseñada. Sin embargo, no se dispone de registros detallados que permitan determinar con exactitud la fecha de su construcción ni el propósito inicial para el cual fue desarrollada. Posteriormente fue donada a la Fundación Cydonia, con el objetivo de ser utilizada en investigaciones vinculadas a la radioastronomía en su hábitat espacial. Su llegada a la Fundación evidencia el interés por aprovechar su diseño en estudios científicos, resaltando su potencial dentro de este campo.

Con respecto a lo anterior, la antena helicoidal tiene como objetivo investigar emisiones solares, aprovechando sus capacidades en radioastronomía y su aporte al estudio de fenómenos astrofísicos.

En el marco de este trabajo de grado, uno de los principales objetivos consistía en poner a punto la antena helicoidal mencionada anteriormente, con el fin de realizar posteriormente captaciones solares y, a partir de estas, generar un análisis detallado de las señales electromagnéticas emitidas por el Sol. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos realizados en su instalación y configuración inicial, fue imposible completar el proceso de calibración debido a la ausencia de instrumentos especializados necesarios para tal fin. Estas limitaciones técnicas, originadas principalmente por complicaciones económicas, impidieron alcanzar plenamente el objetivo de medición y análisis de datos solares de esta antena helicoidal. Por esta razón, fue necesario replantear los objetivos del estudio, cuyos ajustes y enfoques alternativos se expondrán en las secciones siguientes.

2.3.1. Especificaciones de diseño

Las características geométricas y espaciales que definen la estructura de la antena, son importantes para entender cómo su diseño físico afecta el rendimiento de la antena, su capacidad para captar señales y su directividad.

A continuación, se muestra en la figura 2.11 la antena helicoidal utilizada en este estudio.



Figura 2.11: [Antena Helicoidal]. Nota. Fotografía tomada por la autora, Valentina Rodríguez, 2025.

El diseño de la hélice es esencial para la forma en que la antena captura y emite ondas de radio, proporcionando un patrón de radiación adecuado para su propósito. Esta antena helicoidal tiene una estructura definida por 8 vueltas, con un diámetro de 23.5 cm por hélice, lo cual influye en su comportamiento direccional y en la forma en que distribuye la energía en el espacio. El paso entre cada vuelta es de $16,5\ cm$, lo que determina la

densidad de las vueltas y la longitud axial total de la antena es de 32 cm.

El conductor de la antena tiene un diámetro de $1,5$ mm, lo que es un factor relevante para la impedancia y eficiencia en la transmisión y recepción de señales. Además, la antena está construida sobre un poste de aluminio, con 17 piezas de 3D que sostienen y estructuran la forma helicoidal. Estas piezas ayudan a mantener la forma deseada de la antena, mientras que el reflector de 30 cm de diámetro asegura una mayor concentración de la radiación en una dirección específica, mejorando la captación de señales.

La longitud total de la antena es de 135 cm, lo que se distribuye entre las diferentes partes de la estructura. La forma helicoidal permite que la antena tenga una polarización circular, característica importante para algunas aplicaciones de radioastronomía, aunque esto depende de la orientación de la antena y el diseño específico de su geometría.

2.4. Antena Magnética Circular

Las antenas de bucle, también conocidas como antena de bucle magnético (Magnetic Loop Antenna, MLA), pueden adoptar diversas formas geométricas, como rectángulos, cuadrados, triángulos, elipses, entre muchas otras configuraciones como se muestra en la figura 2.12. No obstante, en este trabajo se hará énfasis en las antenas de bucle circular, debido a que esta geometría es la que presenta la antena que se va a utilizar en este trabajo de grado y se abordará a profundidad más adelante.

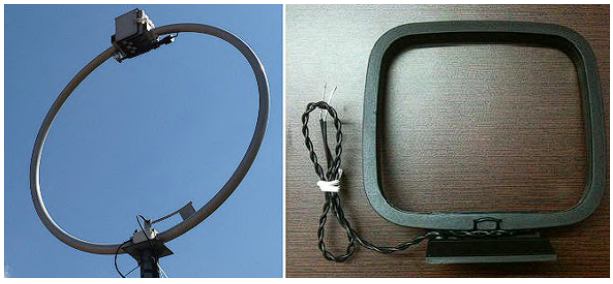


Figura 2.12: [Ejemplo de antenas magnéticas circular redonda y cuadrada]. Tomado de Tutorialspoint. Recuperado de https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_loop.htm

Según (Balanis, 2005), la antena de bucle circular pequeño (circular o cuadrado) es equivalente a un dipolo magnético infinitesimal cuyo eje es perpendicular al plano del bucle, lo que significa que, en lugar de generar un campo eléctrico fuerte como un dipolo eléctrico, la antena de bucle produce un campo magnético intenso en su interior, funcionando de manera similar a un imán oscilante. Su equivalencia con un dipolo magnético permite analizar su radiación de manera simplificada, mostrando que su patrón de emisión es diferente al de un dipolo eléctrico. Esta propiedad la hace útil en aplicaciones de radiofrecuencia, especialmente en entornos con alto ruido eléctrico, ya que es menos susceptible a interferencias.

Las antenas de bucle tienen aplicaciones principalmente en las bandas de frecuencia HF, VHF y UHF, y se pueden clasificar en dos tipos, según el tamaño de su circunferencia en relación con la longitud de onda de la señal que manejan: eléctricamente pequeñas y eléctricamente grandes. Las antenas de bucle eléctricamente pequeñas son aquellas cuya circunferencia es mucho menor que la longitud de onda, específicamente cuando esta es

menor a una décima parte de dicha longitud como se muestra en la siguiente ecuación:

$$C < \frac{\lambda}{10} \tag{2.39}$$

Por ejemplo, si la longitud de onda es de 10 metros, una antena eléctricamente pequeña tendría una circunferencia menor a 1 metro. En cambio, las antenas eléctricamente grandes tienen una circunferencia aproximadamente igual a la longitud de onda, como se evidencia en la ecuación 2.40:

$$C \approx \lambda \tag{2.40}$$

Lo que significa que para una señal de 10 metros, el bucle tendría una circunferencia cercana a esos mismos 10 metros, lo que influye directamente en la eficiencia de radiación de la antena.

Las antenas de bucle eléctricamente pequeñas no radían de manera eficiente, ya que su resistencia de radiación —es decir, la parte de la energía que se convierte en ondas electromagnéticas— es muy baja, incluso menor que la resistencia de pérdida, que representa la energía disipada en forma de calor dentro de los materiales del bucle.

Con base en lo anterior, estas presentan un patrón de radiación similar al de un dipolo muy pequeño. En este patrón, existe una zona llamada "nulo de radiación", que corresponde a la dirección en la que casi no se emite señal. Este nulo se encuentra en la dirección perpendicular al plano del bucle. Por ejemplo, si el bucle está colocado en posición horizontal, la antena radia muy poco hacia arriba y hacia abajo. En cambio, la mayor parte de la radiación ocurre dentro del plano del bucle, es decir, hacia los lados. No obstante, cuando se vuelve eléctricamente grande, el patrón de radiación se modifica. En este caso, el máximo de radiación ya no se encuentra en el plano del bucle, sino a lo largo del eje que es perpendicular a dicho plano. Esto significa que ahora la antena radia con mayor intensidad en dirección vertical (hacia arriba y hacia abajo), en lugar de emitir principalmente hacia los lados como en el caso de los bucles pequeños.

Para mejorar la eficiencia de radiación de una antena de bucle, es posible aumentar su perímetro, hacerla más grande. Esta modificación aumentan su resistencia de radiación, haciéndola más cercana a la impedancia típica de una línea de transmisión, permitiendo una mejor adaptación al equipo de radio, optimizando su rendimiento.

2.5. Contextualización de la Antena Magnética Circular

Como respuesta a las dificultades técnicas de la antena helicoidal previamente mencionadas, se exploró una alternativa que permitiera continuar con el propósito inicial del estudio. En este contexto, se estableció contacto con la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP), institución que cuenta con una infraestructura consolidada para la radioastronomía. Gracias a esta colaboración, fue posible acceder a datos previamente recopilados por una antena de polarización circular, lo que permitió redirigir el enfoque del trabajo hacia el análisis de las señales captadas por dicho dispositivo.

La exploración radioastronómica en Colombia ha sido impulsada por diversas instituciones como se planteó en el primer capítulo, consolidando un campo en crecimiento dentro de la astronomía observacional. En este marco, la UTP ha desempeñado un papel fundamental, estableciéndose como un referente en la detección y análisis de señales de radio provenientes del espacio.

Uno de sus trabajos en la detección de señales de radio fue el desarrollo de una antena magnética circular *isoloop* [12], un proyecto realizado por Hamilton Galvis Rodriguez, ingeniero físico de la UTP; su objetivo principal fue la observación y monitoreo de fenómenos astrofísicos como las tormentas jovianas y las eyecciones de masa coronal del Sol.

Esta antena fue diseñada para registrar emisiones electromagnéticas en la *banda decamétrica* [13], centrándose en las radioemisiones del Sol y Júpiter, en donde su diseño fue pensado como una alternativa más compacta y menos susceptible a interferencias eléctricas en comparación con las antenas dipolo tradicionales, que requieren grandes áreas de instalación y son más susceptibles al ruido ambiental.

Si bien la antena helicoidal y la antena magnética circular presentan diferencias en su diseño y configuración, ambas pertenecen a la categoría de antenas de alambre y operan en el dominio de las ondas de radio, como se estableció anteriormente. Esto permite establecer una relación entre ellas desde un punto de vista teórico y experimental, posibilitando la comparación de sus principios de funcionamiento y la manera en que interactúan con las ondas electromagnéticas. Así, aunque los datos directos de la antena helicoidal no están disponibles, el análisis de las captaciones de la antena magnética circular isoloop brinda una oportunidad para explorar su comportamiento dentro del marco de la radioastronomía, comprendiendo sus implicaciones en la detección de señales cósmicas y su aplicación en la observación del espacio.

2.5.1. Especificaciones de diseño de la Antena Magnética Circular

La antena magnética circular ilustrada en la figura 2.13, se encuentra montada de forma fija sobre una base de madera, material no conductor que contribuye a reducir perturbaciones externas en el comportamiento electromagnético del sistema. Esta configuración incorpora dos bucles conductores que cumplen funciones distintas en el diseño.

Tal y como lo plantean (Galvis y cols., 2016), el primer bucle, denominado bucle primario, es de menor tamaño y se encuentra ubicado en el extremo opuesto al capacitor. Este componente está conectado, mediante un cable coaxial, a un transmisor o receptor de ondas de radio, permitiendo la emisión o recepción de señales electromagnéticas. Por otro lado, el bucle secundario, que tiene un tamaño mayor, actúa como una bobina de un solo enrollado. Sus extremos están conectados a un condensador variable de alta tensión, el cual permite ajustar la resonancia de la antena en una frecuencia particular. Este bucle genera un campo electromagnético que, al variar, induce una señal en el bucle primario.

Esta configuración es muy común en estas antenas, usadas generalmente por radio aficionados, debido a su alta eficiencia en espacios reducidos y su bajo nivel de ruido eléctrico.

La antena catalogada como eléctricamente grande con $C = 2,82m$ para un $\lambda = 14,9m$, que es la longitud de onda de interés, fue construida utilizando materiales específicos para optimizar su rendimiento. Esta antena fue diseñada específicamente para operar en la frecuencia de $20{,}1MHz$, y su construcción se basó en cálculos teóricos fundamentados en las ecuaciones electromagnéticas para antenas magnéticas circulares.

El diseño, mostrado en la figura 2.13, contempla dos bucles: un bucle primario, de menor tamaño, construido con $60cm$ de alambre de cobre desnudo, calibre 12, y un bucle

[12] Las antenas isoloop se componen de dos bucles conductores, uno primario y otro secundario.
[13] Son ondas electromagnéticas con longitudes de onda de entre 10 y 100 metros.

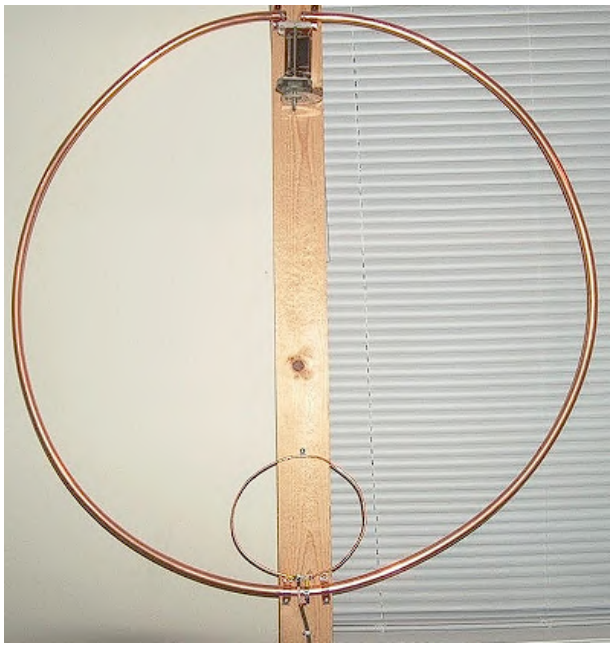


Figura 2.13: [Descripción de una antena magnética circular isoloop]. Observatorio Astronómico UTP. Recuperado de https://observatorioastronomico.utp.edu.co/radioastronomia/

secundario, de mayor tamaño, fabricado con un tubo de cobre de $1,2cm$ de grosor y $3m$ de longitud. Para el acoplamiento al receptor se utilizó un cable coaxial RG-59 y un capacitor variable de 10–200 pF, sintonizado a un valor de $28pF$. La frecuencia máxima de trabajo considerada fue de $30MHz$, con la posibilidad de sintonía en $20{,}1MHz$. Bajo un acople de $\lambda/4$, se obtuvo que la longitud total del lazo secundario debía ser de $2{,}5m$.

Durante la fase de pruebas experimentales, determinaron que los valores iniciales de los diámetros de los lazos eran $16cm$ para el primario y $80cm$ para el secundario, no permitían alcanzar los valores deseados de capacitancia ni de ganancia en la respuesta en frecuencia. Como resultado, rediseñaron la antena desde una perspectiva experimental, ajustando los diámetros a $18cm$ para el lazo primario y $90cm$ para el lazo secundario. Adicionalmente, se identificó que la mayor ganancia se alcanzaba con una capacitancia de $19pF$.

Para evaluar el rendimiento de la antena rediseñada, se realizaron simulaciones con el software *Small Magnetic Loop Calculator V.1.22A*, desarrollado por Steve Yates. Mostrando que para una frecuencia de operación de 20.1 MHz se obtenía una eficiencia de –4,5 dB y un ancho de banda de $60kHz$. Por su parte, el software *4Nec2* de Arie Voors se empleó para obtener los patrones de radiación en 2 y 3 dimensiones, tanto en el plano horizontal como vertical, mostrando que la antena presenta un patrón bidireccional en el plano horizontal y omnidireccional en el vertical, similar al de una antena dipolo. Lo que implicaba que, para las observaciones, la antena debía alinearse paralelamente al desplazamiento aparente de cuerpos como Júpiter o el Sol, sin requerir seguimiento durante el tránsito en la bóveda celeste, mientras que, en el patrón de radiación tridimensional se mostraba que la máxima ganancia se alcanzaba en dirección paralela a la antena, con un valor de $12{,}5dB$. La figura 2.14, presenta los resultados obtenidos a partir de las ecuaciones de la antena magnética circular isoloop, que permitieron caracterizar la antena completamente.

Una vez construida la antena y siguiendo los parámetros obtenidos, se procedió a medir su patrón de radiación experimentalmente utilizando el módulo *Cassy Lab*, que envía una señal senoidal a una plataforma rotacional donde se ubica la antena de prueba. En la grá-

Parámetro	Valor	Unidad
Resistencia de pérdida	200	mΩ
Potencia RF	1.0	W
Ancho de banda	64.94	KHz
Eficiencia	35.67	%
Área del lazo	0.50	m^2
Resistencia de radiación	162.81	mΩ
Resistencia total de pérdida	293.64	mΩ
Circunferencia del lazo	2.51	m
Porcentaje de longitud de onda	16.88	%
Inductancia del lazo	2.23	μH
Capacitancia distribuida	6.77	pF
Factor de calidad (Q)	309.51	–
Capacitor de ajuste	28.02	pF
Voltaje del capacitor	295.72	V
Frecuencia: 20.1 MHz		
Diámetro del lazo: 0.8 m		
Diámetro del conductor: 12 mm		

Figura 2.14: [Parámetros físicos y eléctricos de la antena isoloop diseñada]. Tomado de Desarrollo de una Antena tipo Loop Magnética para la Detección de Radio-ondas Jovianas a 20.1 MHz. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-36672016000100006&lng=en&nrm=iso&tlng=en

fica resultante, se observó que la ganancia de la antena se mantenía entre $-30dB$ y $-35dB$ a lo largo de toda la circunferencia, confirmando su comportamiento omnidireccional.

Posteriormente, con el analizador de espectro *MSA 700*, se identificaron las señales recibidas por la antena. Ajustando el capacitor de sintonización al valor especificado, encontraron que la antena resonaba en $14MHz$, aunque presentaba una alta ganancia en la frecuencia objetivo de $20{,}1MHz$. La antena fue conectada al receptor mediante un cable coaxial de 75 ohmios y comenzó su operación desde inicios del mes de julio de 2015 en la terraza del Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira, sede del Grupo de Investigación en Astroingeniería Alfa Orión.

Actualmente, esta antena funciona en conjunto con el receptor *Radio Jove*, de la NASA, sintonizado en $20{,}1MHz$, el software *Radio SkyPipe*, que permite la visualización y almacenamiento de las señales registradas, y una fuente de ruido utilizada en el proyecto es el modelo RF 2080 C/F de la compañía RF Associates, conectada entre la antena y el receptor.

2.6. Proceso de interacción radiación - materia

Con el fin de profundizar en la explicación del proceso de interacción entre la radiación y la materia, del cual se ha hablado en diferentes sesiones a lo largo del documento, la presente sección se enfoca en un tratamiento más detallado de dicho proceso, con el propósito de ahondar en la comprensión del fenómeno físico involucrado.

La detección de ondas electromagnéticas, como las ondas de radio emitidas por el

Sol, mediante una antena receptora, constituye un fenómeno de interacción fundamental entre la radiación y la materia. Este proceso se basa en la capacidad de los campos electromagnéticos oscilantes de inducir movimientos coordinados en las cargas libres de un material conductor, típicamente electrones, generando como resultado una corriente eléctrica alterna.

Estas ondas se generan a partir de la aceleración de partículas cargadas debido a la aplicación de una corriente alterna, lo que induce la emisión de radiación electromagnética en el rango de radiofrecuencia, proceso que ocurre dentro de una antena.

Una antena es un sistema conductor diseñado para emitir o recibir ondas electromagnéticas mediante la interacción directa con los campos eléctrico y magnético de dichas ondas. Cuando una onda electromagnética incide sobre una antena, sus componentes de campo inducen en ella corrientes y distribuciones de carga variables en el tiempo, generando una respuesta eléctrica observable. Esta interacción está fundamentada en las ecuaciones de Maxwell, que permiten describir de manera rigurosa cómo los campos variables en el tiempo producen efectos electromagnéticos en medios materiales conductores. En particular, la Ley de Faraday establece que una variación temporal del campo magnético genera un campo eléctrico de carácter rotacional. Cuando este campo eléctrico actúa sobre un conductor, induce una fuerza electromotriz (fem), la cual produce una corriente variable. A su vez, esta corriente genera un nuevo campo magnético no uniforme según la Ley de Ampère-Maxwell, cerrando así el ciclo de acoplamiento entre campos y cargas. Este mecanismo permite tanto la emisión como la recepción de ondas electromagnéticas, dependiendo de la configuración del sistema. En el caso receptor, como se analiza aquí, las ecuaciones de Maxwell permiten cuantificar cómo el campo electromagnético incidente genera corrientes en la antena, ademas de modelar los campos secundarios irradiados por estas corrientes, y analizar la distribución espacial (dependencia angular) e intensidad del campo.

"La corriente, que cambia continuamente, acelera la carga en la antena, lo que da lugar a un campo eléctrico oscilante que se aleja de la antena. Los campos eléctricos cambiantes producen campos magnéticos cambiantes que, a su vez, producen campos eléctricos cambiantes, que se propagan como ondas electromagnéticas" (Moebs y cols., 2021a).

Si bien la cita anterior específica el proceso de emisión de una antena, hay que tener claro que el proceso de detección es equivalente, pero evidentemente en la dirección contraria, es por eso que cuando una onda electromagnética incide sobre una antena, los campos eléctricos y magnéticos de la onda pueden interactuar de manera diferenciada con el sistema receptor, dependiendo del tipo de antena. En antenas como las dipolares o helicoidales, es el campo eléctrico el que ejerce una fuerza oscilante sobre los electrones libres del conductor, provocando un desplazamiento colectivo que se traduce en una corriente eléctrica inducida. Esta corriente, al ser alterna y oscilatoria, refleja la información transportada por la onda, generando una diferencia de potencial entre los extremos del conductor.

En cambio, las antenas magnéticas circulares o isoloop funcionan de acuerdo con un principio diferente. Estas estructuras cerradas, en forma de bucle conductor, interactúan principalmente con el componente magnético de la onda incidente. Cuando el campo magnético oscilante atraviesa el área encerrada por el lazo, induce una corriente eléctrica según la ley de Faraday, debido a la variación del flujo magnético en el tiempo. Este tipo de antena es especialmente útil para la detección de ondas con polarización magnética

dominante o en situaciones donde el campo eléctrico es débil o difícil de captar. Así, las antenas isoloop permiten acceder a otro canal de interacción onda-materia, ampliando el espectro de análisis.

Como se plante en el libro (Stutzman y Thiele, 2005), la eficiencia con la que una antena convierte energía electromagnética en señal eléctrica utilizable depende de múltiples factores, siendo la geometría del sistema uno de los más determinantes. Para que el acoplamiento entre la onda incidente y la antena sea eficaz, es indispensable que exista resonancia entre la frecuencia de la señal y las dimensiones físicas del sistema. En antenas lineales, esto implica que la longitud del conductor debe ser una fracción específica (comúnmente un cuarto o la mitad) de la longitud de onda. En antenas de lazo, en cambio, la resonancia se logra ajustando la inductancia del bucle y la capacitancia total del sistema, para que su frecuencia natural coincida con la señal recibida.

El diseño tridimensional y las propiedades electromagnéticas del sistema antena juegan un papel clave. Parámetros como el diámetro del lazo en las isoloop, o el número de espiras, paso helicoidal y diámetro del conductor en las helicoidales, determinan no solo su frecuencia central de resonancia, sino también el ancho de banda y la respuesta direccional.

En particular, las antenas helicoidales, ampliamente empleadas en aplicaciones de radioastronomía solar, presentan una configuración en espiral que las hace especialmente sensibles a señales con polarización circular, una característica común en ciertas emisiones provenientes del Sol. Esta sensibilidad se deriva del hecho de que la espiral de la antena puede adaptarse al giro del campo eléctrico de la onda, maximizando la transferencia de energía cuando la polarización es coincidente.

Por otro lado, las antenas magnéticas circulares (isoloop) se utilizan frecuentemente en frecuencias más bajas (HF/VHF), donde el tamaño de una antena lineal resonante sería impráctico. Estas antenas son especialmente valiosas en entornos ruidosos, ya que tienden a ser menos sensibles al ruido eléctrico ambiental, captando preferentemente la componente magnética de la señal. En radioastronomía o detección solar, esto puede resultar útil para complementar observaciones basadas en otras geometrías.

Durante la recepción de señales, la onda electromagnética proveniente del Sol llega a la antena desde la región de radiación o zona lejana, manifestándose como un frente de onda bien definido en el que los campos eléctricos y magnéticos son mutuamente perpendiculares y están sincronizados en fase. La antena, entonces, actúa como un convertidor selectivo de energía, filtrando espacial y frecuencialmente las señales. La directividad (preferencia de recepción en ciertas direcciones), la ganancia (eficiencia relativa) y el ancho de banda (rango de frecuencias útiles) son características clave determinadas por el tipo de antena y su orientación.

La polarización de la onda incidente es otro factor crucial. Las antenas helicoidales están diseñadas para polarización circular (derecha o izquierda), mientras que las antenas magnéticas circulares son menos sensibles a la polarización eléctrica, ya que su acoplamiento se da con el campo magnético. Esta diferencia hace que ambas antenas se complementen y, en conjunto, permitan un análisis más completo del fenómeno electromagnético observado.

Finalmente, propiedades como la conductividad del material y las condiciones dieléctricas del entorno también afectan la respuesta del sistema, modificando la velocidad de propagación de las señales y las condiciones de resonancia. En suma, tanto las antenas helicoidales como las magnéticas circulares constituyen dispositivos activos de interacción

materia-radiación, que permiten no solo captar señales, sino también filtrar, amplificar y estudiar con precisión la información contenida en las ondas provenientes del entorno cósmico. Esto posibilita, desde la superficie terrestre, la observación detallada de fenómenos solares a través de múltiples canales físicos de acoplamiento.

Hasta este punto, se ha presentado un recorrido teórico y técnico por los fundamentos de la radioastronomía, así como una caracterización detallada de las antenas helicoidales y de bucle magnético, haciendo énfasis en sus principios de funcionamiento, parámetros electromagnéticos relevantes y especificaciones de diseño. Este contexto ha permitido construir una base sólida para abordar el propósito final de este trabajo.

En consecuencia, en el siguiente capítulo se realizará el análisis de un conjunto de datos previamente obtenidos por el radiotelescopio de la Universidad Tecnológica de Pereira. Este estudio busca ofrecer una aproximación al proceso de captación y tratamiento de señales de radio provenientes del Sol, evidenciar el papel que desempeñan estas tecnologías en la observación radioastronómica de fenómenos solares.

Capítulo 3

Análisis de Señales de Radio de un Radiotelescopio con Antena Magnética Circular Isoloop

3.1. Calibración y procesamiento de la señal en la Antena Magnética Circular isoloop

Como se mencionó al finalizar el capítulo anterior, en este apartado se presentará el análisis de un conjunto de datos previamente obtenidos por el radiotelescopio de la Universidad Tecnológica de Pereira. No obstante, antes de abordar directamente el estudio de estos registros, es importante completar la revisión de los elementos fundamentales que conforman el sistema del radiotelescopio.

En el capítulo previo se examinó con detalle la antena, componente esencial para la captación de señales; por lo tanto, en esta sección se describen los otros dos elementos clave: el radio receptor y el software de procesamiento de datos. Ambos cumplen un papel determinante en la calidad final de la señal registrada y, por tanto, en la fiabilidad de los resultados obtenidos. La figura 3.1 ilustra la configuración del radiotelescopio utilizado, el cual integra estos tres elementos de forma articulada para el monitoreo de la actividad solar.

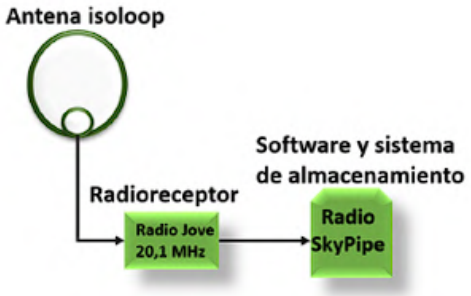


Figura 3.1: [Diagrama de bloques del radiotelescopio desarrollado en el OAUTP]. Tomado de Desarrollo de un Sistema Electrónico para el Monitoreo de las Radioemisiones Solares y Jovianas en $20,1\ MHz$. (p. 43), por H. Galvis, 2016.

Las señales analizadas en este proyecto fueron captadas por un radiotelescopio con una antena receptora isoloop. Estas ondas, que han viajado millones de kilómetros desde

el Sol hasta la Tierra, al ser captadas por este tipo de antenas suelen tener una señal muy débil, por lo que requiere un proceso adicional de filtrado, amplificación y conversión, por medio de un radio receptor.

El receptor de ondas, segundo elemento fundamental del radiotelescopio, es un sistema electrónico donde su función principal es detectar y amplificar las señales débiles provenientes del espacio captadas por la antena, en este caso, específicamente aquellas emitidas por el Sol. Una vez amplificadas, las señales son transformadas en una señal eléctrica lo suficientemente fuerte para que esta información sea útil y pueda interpretarse como audio o representarse gráficamente mediante un software especializado. El receptor utilizado en ese proyecto de la UTP corresponde al modelo desarrollado por el programa Radio JOVE de la NASA, ideal para el tipo de observación solar realizada. Este equipo fue incorporado específicamente para ese trabajo, facilitando tanto la captación como el análisis de las señales.

Internamente, el receptor está conformado por una serie de bloques funcionales, cada uno con una tarea específica en el procesamiento de la señal, como se ilustra en la figura 3.2.

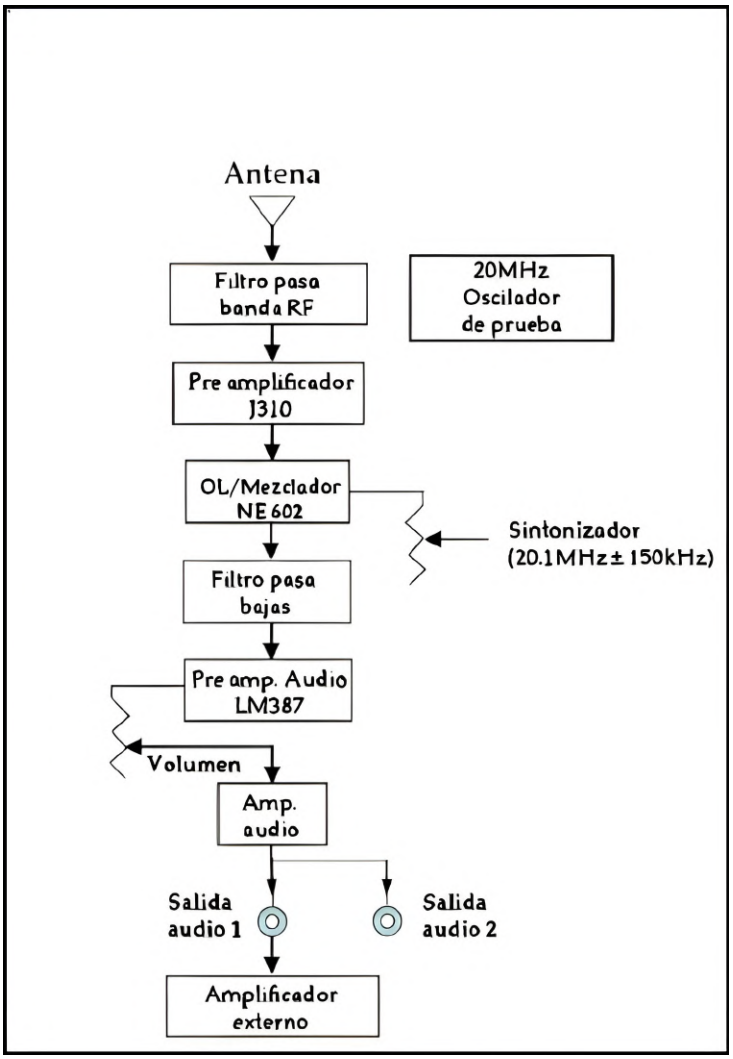


Figura 3.2: [Diagrama de bloques del receptor de radio ondas del proyecto Radio Jove de NASA]. Tomado de Desarrollo de un Sistema Electrónico para el Monitoreo de las Radioemisiones Solares y Jovianas en $20,1\ MHz$. (p. 54), por H. Galvis, 2016.

Este diagrama representa el sistema de recepción de señales de una antena magnética

circular, detallando el procesamiento de la señal desde su captura en la antena hasta su salida en formato de audio.

El recorrido de la señal comienza en la antena, la cual capta las ondas electromagnéticas del entorno y las convierte en señales eléctricas de muy baja intensidad. Estas señales pasan en primer lugar por un filtro pasa-banda RF, cuya función es seleccionar únicamente la banda de frecuencias deseada, en este caso, centrada en los $20,1\ MHz$, eliminando así interferencias de otras frecuencias no deseadas. A continuación, la señal filtrada es dirigida a un pre-amplificador J310, que incrementa su intensidad para que pueda ser procesada eficazmente en las etapas posteriores sin distorsión significativa.

Seguidamente, la señal ingresa a un bloque conformado por un oscilador local (OL) y un mezclador NE602, donde ocurre la conversión de frecuencia. Este proceso, conocido como heterodinación, consiste en combinar la señal entrante con la señal generada por un oscilador de prueba de 20 MHz. El resultado es una señal de frecuencia intermedia (FI), que facilita su procesamiento. Este paso es crucial para centrar la detección en un rango específico de frecuencias alrededor de los $20,1\ MHz$, con una tolerancia de ± 150 kHz.

Luego, la señal resultante pasa a través de un filtro pasa-bajas, el cual elimina componentes de alta frecuencia generadas en la mezcla, dejando pasar solo aquellas dentro del rango de interés. Esta señal ya depurada es enviada a un pre-amplificador de audio LM387, que ajusta su nivel para facilitar su posterior manipulación como señal de audio.

A partir de este punto, el sistema incorpora un control de volumen, lo que permite ajustar la amplitud de la señal según las necesidades del oyente o del sistema de registro. La señal es entonces enviada a un amplificador de audio, que refuerza la señal final para su salida en dos canales distintos: Salida de audio 1 y Salida de audio 2, brindando versatilidad en la conexión con dispositivos externos.

Finalmente, la señal de audio puede enviarse a un amplificador externo o conectarse a una interfaz de audio para su digitalización. Para ese proyecto, se utilizó un cable mono conectado a la tarjeta de sonido del computador, lo que permitió su análisis mediante un software especializado. Para tal propósito, el equipo empleó Radio SkyPipe, una herramienta que permite visualizar gráficamente la intensidad de la señal a lo largo del tiempo, facilitando su interpretación.

3.2. Software empleado

Radio SkyPipe es un software desarrollado por Jim Sky, ingeniero especializado en programación y diseño electrónico. Fue presentado en el evento de la *Society of Amateur Radio Astronomers* (SARA), con la intención de facilitar el intercambio de observaciones astronómicas en tiempo real.

Concebido como una herramienta accesible y gratuita, está pensado para ser utilizado incluso con equipos básicos, como una tarjeta de sonido común. Su filosofía se basa en una idea poderosa: hacer visible aquello que no puede ser visto, captando emisiones de radio provenientes del espacio y representándolas gráficamente, como se plantea en el trabajo de (Sky Pipe Documentación, 2015).

Este programa permite la recolección y visualización de datos analógicos en forma de ondas de radio, digitalizados en tiempo real mediante una conexión a Internet u otra red IP. Además, puede funcionar de manera independiente, recolectando información a través

de una tarjeta de sonido o de un convertidor analógico-digital conectado al puerto del computador. Su diseño lo convierte en una herramienta útil tanto para la observación en vivo como para el análisis posterior de los datos registrados.

A diferencia de los telescopios ópticos, que sólo permiten observar lo que se encuentra en el espectro visible, este software fue creado con el propósito de registrar y graficar las emisiones de radio del Sol y otros cuerpos celestes, revelando fenómenos a través de la lectura de variaciones en las señales de radio. Estas señales recogidas por una antena o un receptor, son convertidas en gráficos que permiten visualizar la actividad solar o planetaria.

Una de sus principales ventajas es la capacidad de compartir observaciones en tiempo real con usuarios de todo el mundo. Esto resulta especialmente valioso cuando se trata de fenómenos astronómicos esporádicos, como ciertas emisiones provenientes del Sol o de Júpiter, que podrían confundirse con interferencias locales si solo se registran desde un solo lugar. Comparar datos recogidos desde distintos puntos permite corroborar los eventos con mayor precisión.

En proyectos de observación astronómica, especialmente en aquellos centrados en la radioastronomía, el rol del software es esencial para el procesamiento y visualización de los datos. En este sentido, programas como Radio SkyPipe se convierten en aliados clave para el análisis e interpretación de información científica. Incluso instituciones como la NASA han proporcionado licencias para fomentar su uso en iniciativas educativas y de investigación, fortaleciendo el acceso al conocimiento del universo invisible.

Este software compatible con Windows, opera en tres modos distintos: Autónomo, Cliente, y Servidor. En el modo autónomo, el computador funciona como una unidad autónoma de adquisición de datos a través de la tarjeta de sonido, generando gráficos tipo *stripchart*[1] que se actualizan continuamente durante la recolección; al finalizar, los registros pueden guardarse en archivos con extensión ".spd" (SkyPipe Data) para su posterior análisis o edición. El modo servidor amplía esta funcionalidad, permitiendo que el equipo envíe los datos recopilados mediante una conexión TCP/IP a otros dispositivos remotos que también utilicen el programa. Finalmente, el modo cliente permite al usuario recibir en tiempo real las observaciones realizadas por otros radiotelescopios conectados a la red, facilitando el acceso compartido a información astronómica desde distintos puntos de observación.

Este software se caracteriza por su interfaz sencilla y funcional, compuesta principalmente por dos barras de trabajo: una dedicada al control de la visualización de la señal y otra orientada a las configuraciones internas y parámetros de medición definidos por el usuario.

La barra de herramientas mostrada en la figura 3.3 está compuesta por varios botones organizados en recuadros, cada uno con funciones específicas para el manejo de la señal. En la parte superior se encuentra el botón Start Chart, que permite iniciar el registro de datos, los cuales se almacenan automáticamente con la extensión .spd. Justo debajo, en las dos primeras filas, se ubican ocho botones destinados a ajustar los límites de visualización y la escala en los ejes vertical y horizontal. En la tercera fila, el tercer botón activa el cursor, una línea vertical que aparece en el gráfico y permite consultar los valores exactos de un punto de datos. A su lado, el cuarto botón corresponde al cuadro de zoom, que permite seleccionar una región del gráfico y ampliarla. En la cuarta fila se encuentra la

[1] Tipo de gráfico que muestra datos en tiempo real a medida que son adquiridos.

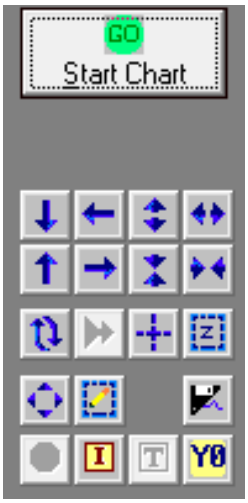


Figura 3.3: [Barra de Herramientas Radio SkyPipe]. Tomado del programa Radio SkyPipe.

opción de vista completa, que muestra toda la observación en una sola ventana, el segundo botón desde arriba en la última columna despliega la información temporal del inicio del registro (día, mes, año, hora, minutos y segundos), y el último botón, guardar vista, permite almacenar un fragmento específico de la señal visible en pantalla, solicitando un nombre de archivo para su registro.

La otra barra fundamental es la barra de tareas, dentro de la cual se encuentra la ventana más importante del programa: el panel de opciones, mostrado a continuación.

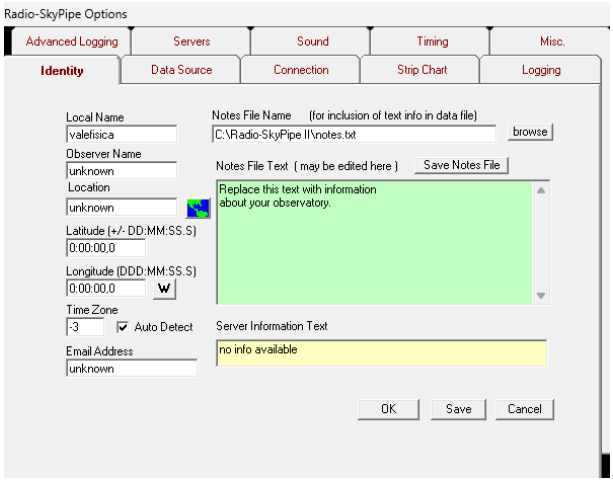


Figura 3.4: [Ventana de opción en la barra de tareas Radio SkyPipe]. Tomado del programa Radio SkyPipe.

En esta ventana se encuentran diversas opciones para configurar el perfil del usuario, así como el almacenamiento y tratamiento de los datos registrados. En la pestaña Identity se establece la información relacionada con la localización del observatorio o de la persona que realiza las observaciones, incluyendo nombre, coordenadas, zona horaria y correo electrónico. En la sección Data Source se configura la fuente de entrada de sonido y su formato. La pestaña Connection permite definir el tipo de conexión a Internet, mientras que en Sound se selecciona la frecuencia de muestreo y el tipo de tarjeta de sonido utilizada. Por su parte, la pestaña Timing establece el intervalo de tiempo entre puntos de registro, medido en milisegundos, lo cual es especialmente útil para eventos astronómicos breves, como los estallidos solares. Finalmente, la sección Strip Chart permite definir el rango

temporal (en segundos) que se visualizará en pantalla durante la adquisición de datos.

Otros paneles importantes dentro de la barra de tareas del programa son los siguientes: View, que permite consultar datos de archivos guardados, acceder a la información del observatorio que realizó los registros, iniciar un nuevo registro en modo cliente y compararlo con la señal propia; Mode, donde se configura el software según uno de los tres modos de funcionamiento mencionados previamente; Priority, que permite seleccionar la calidad con la que se desean revisar los registros, ya sea en calidad normal, media, alta o en tiempo real. Por último, el panel Tools agrupa herramientas especializadas para el análisis detallado de señales seleccionadas por el usuario. Algunas de sus funciones incluyen la sincronización con el tiempo atómico a través de internet, la creación de nuevas señales a partir del promedio de varias señales existentes, la búsqueda de eventos destacados en la base de datos de Radio Sky y el conteo de picos o variaciones bruscas en una señal. Además, cuenta con utilidades como Calibration Wizard, que permite calibrar el eje vertical según la temperatura de la antena, y Null Sound Background, que establece un valor de referencia cero para el ruido ambiental del observatorio.

3.3. Contextualización de los datos del OAUTP

La toma de los datos utilizados en este trabajo, fueron captados en la ciudad de Pereira, Colombia, en la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP), específicamente en la terraza del Observatorio Astronómico, sede del Grupo de Investigación en Astroingeniería Alfa Orión, las coordenadas geográficas del sitio de observación son aproximadamente latitud 4°48'00"N y longitud 75°41'41"W, con una zona horaria de UTC -5.

Desde comienzos de julio de 2015, el radiotelescopio desarrollado fue instalado con una orientación este-oeste, alineada con la trayectoria aparente del planeta Júpiter en la bóveda celeste. Se mantuvo en operación continua durante el día, dado que las emisiones solares no pueden predecirse con exactitud. De este modo, se aseguraba la posibilidad de registrar cualquier evento relevante en el momento en que ocurriera.

Desde que el radiotelescopio entró en funcionamiento hasta el mes de junio de 2016, se logró registrar una serie de emisiones solares en el rango de radiofrecuencia decamétrica. Para confirmar que estas señales provenían efectivamente del Sol, se realizó una verificación cruzada utilizando dos fuentes de datos especializadas en monitoreo de actividad solar en radiofrecuencia: el Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) y el Space Weather Prediction Center (SWPC), ambos pertenecientes a la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los Estados Unidos.

En el software, se encuentran registrados en la pestaña "Metadata" detalles sobre la configuración técnica del sistema de adquisición de datos utilizado durante la observación. El canal de detección activo fue el CH 1, y la fuente de datos corresponde al canal izquierdo de la tarjeta de sonido del computador.

El método de detección fue por promedio "Average", lo que implica que las señales fueron suavizadas para reducir el ruido. La tarjeta de sonido usada fue una Realtek High Definition, específicamente identificada como "Altavoces". El formato de grabación de la señal fue PCM a 11,025kHz, 16 bits, mono y el nivel de volumen del canal fue de 50 %.

La temporización del muestreo estuvo controlada por el temporizador del sistema operativo Windows, y se aplicó una corrección de temporización con un factor de 1, lo

cual indica que se intentó mantener una buena sincronización entre el tiempo y la toma de datos. Finalmente, el período de muestreo solicitado fue de 100 milisegundos, lo cual define la resolución temporal con la que se esperaba registrar la señal.

3.3.1. Interpretación de los ejes en la gráfica de Radio SkyPipe

Como se mencionó en el capítulo 1, el Sol presenta diferentes clasificaciones, por lo que podemos decir que es un cuerpo térmico y no térmico, de tipo galáctico con un espectro de emisión continuo. Las radiaciones tanto térmicas como no térmicas del Sol se originan a partir de fenómenos como las llamaradas solares, las eyecciones de masa coronal, las manchas solares y el viento solar, en conjunto con el campo magnético solar.

Para efectos de este trabajo, se considerará al Sol principalmente como un cuerpo térmico, capaz de emitir radiación en forma de ondas de radio, particularmente mediante el mecanismo del frenado magnético[2]. Esta característica se relaciona directamente con su capacidad de emitir energía en todo el espectro electromagnético, lo que lo clasifica como un cuerpo con espectro de emisión continua.

Dicha emisión puede describirse mediante la ley de Planck, que establece la intensidad de la radiación electromagnética como una función de la frecuencia de emisión y la temperatura del cuerpo. Matemáticamente, esto se expresa como:

$$I(f,T) = \frac{2\pi f^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \tag{3.1}$$

donde $I(f,T)$ representa la intensidad de la radiación electromagnética, f es la frecuencia de emisión, T es la temperatura a la que se encuentra el cuerpo, y h, c, k son la constante de Planck, la velocidad de la luz y la constante de Boltzmann, respectivamente.

La razón por la cual se considerará al Sol como un cuerpo térmico en este trabajo es que, en la gráfica del software, la señal aparece en unidades SPU, las cuales no corresponden a unidades físicas reales como voltios, vatios o kelvin. Por ello, no es posible interpretar directamente la magnitud de la señal sin realizar una calibración. Es necesario convertir esas unidades SPU a una magnitud que tenga un significado físico: la temperatura de la antena.

Toda resistencia eléctrica genera una señal de ruido débil debido al movimiento aleatorio de los electrones, incluso en ausencia de una señal de radio externa. Cuando la resistencia se calienta, ese movimiento aumenta, y con él también la intensidad del ruido. Si dicha resistencia se conecta a un receptor de radio, este puede captar la señal de ruido generada, y la potencia que recibe puede calcularse mediante una fórmula específica.

$$P = k_B \cdot T \cdot B \tag{3.2}$$

donde P representa la potencia en Watts, k_B es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta expresada en kelvin, y B corresponde al ancho de banda del receptor en hertz.

Esta potencia se toma como una magnitud equivalente que permite describir cuánta energía de radio (potencia) está siendo captada por la antena, y se representa como

[2]Es la emisión de radiación que ocurre cuando una partícula cargada cambia su trayectoria (y por tanto su velocidad) al interactuar con un campo magnético, liberando energía en forma de ondas electromagnéticas, usualmente en el rango de radio.

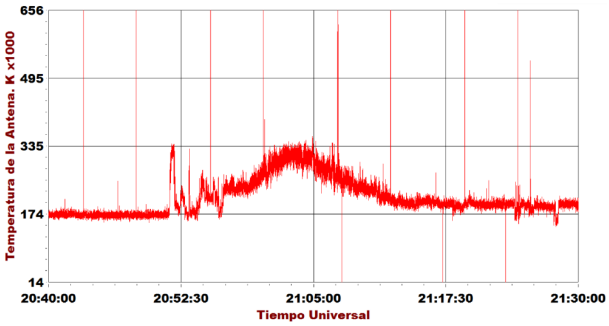


Figura 3.5: [Detección solar por medio del software Radio SkyPipe]. Tomado de Desarrollo de un Sistema Electrónico para el Monitoreo de las Radioemisiones Solares y Jovianas en $20,1\ MHz$. (p. 69), por H. Galvis, 2016.

temperatura de antena. Las unidades que se muestran en el software, tal como se aprecia en la figura 3.5 de demostración, son en el eje horizontal (eje x) corresponden al Tiempo Universal (UT), por ejemplo, de 20:40:00 a 21:30:00. Este eje indica el momento exacto en que fue detectada cada porción de la señal, y sus unidades están expresadas en el formato hora:minutos:segundos. Por otro lado, el eje vertical (eje y) representa la temperatura de la antena en kelvin, multiplicada por mil, lo que corresponde a una medida indirecta de la potencia electromagnética que recibe la antena. Esta escala, expresada en miles de kelvin, permite cuantificar la intensidad de la señal en función de su temperatura equivalente.

En radioastronomía, la temperatura de la antena representa la señal que recibe el receptor, expresada como si fuera equivalente al ruido térmico generado por una resistencia a cierta temperatura. Para reproducir este escenario sin utilizar una resistencia física, se emplea un calibrador de ruido, un dispositivo diseñado para generar una cantidad conocida de ruido térmico, simulando así el comportamiento de una resistencia caliente.

La conversión de las unidades SPU a temperatura absoluta de la antena lo realizaron mediante el asistente de calibración incluido en el software Radio SkyPipe 2. Este asistente se encarga de efectuar automáticamente los cálculos necesarios para transformar las lecturas de SPU en una medida física interpretable. Está diseñado para operar directamente con una fuente de ruido calibrada, como la mencionada anteriormente, que simula el ruido térmico de una resistencia conocida. Durante el proceso de calibración, el asistente también elimina el ruido interno generado por la tarjeta de sonido del computador, el cual podría interferir con las mediciones, y utiliza una señal de referencia calibrada que permite realizar la conversión de forma precisa, obteniendo así una temperatura de antena confiable.

3.4. Interpretación de los datos de la NOAA

Tal como se mencionó anteriormente, cada uno de los registros obtenidos por el radiotelescopio del OAUTP fue comparado con los datos publicados por la NOAA, específicamente a través del satélite GOES y la base de datos del SWPC. Esta comparación no solo permite validar las señales detectadas desde Tierra, sino también asegurar que el análisis se realice con base en fuentes confiables y verificadas, lo cual resulta esencial para garantizar la precisión y solidez de los resultados.

No obstante, es fundamental tener en cuenta que ambos programas operan en distintos rangos del espectro electromagnético al captado por el radiotelescopio de la UTP, especí-

ficamente en el rango de radio y en el de rayos X. Sin embargo, los eventos solares, como erupciones o fulguraciones, generan radiación en diversas longitudes de onda, cubriendo prácticamente la totalidad del espectro. Por ello, aunque la antena utilizada y los datos de la NOAA registran señales en bandas diferentes, es posible identificar correspondencias tanto temporales como estructurales entre ellas. Esto se debe a que todas estas señales representan manifestaciones de un mismo fenómeno energético solar, observado a través de distintas "ventanas" espectrales.

Como lo plantea (White y cols., 2011) desde hace tiempo se ha reconocido que las emisiones de radio del Sol son un complemento importante en el estudio de los rayos X duros. Esto se debe a que ambos tipos de emisiones están asociados a electrones con energías mayores a 10 keV. Estos electrones, además de generar rayos X mediante bremsstrahlung (radiación de frenado), también producen emisiones de radio a través de diversos mecanismos físicos en la corona solar. Gracias a esa variedad de procesos, las observaciones en radio permiten acceder a información diagnóstica más amplia que la que ofrecen únicamente los rayos X. Por lo tanto, al combinar ambos rangos del espectro electromagnético, se logra una mejor detección y caracterización de poblaciones de electrones energéticos, tanto térmicos como no térmicos, presentes en la atmósfera solar.

3.4.1. Geostationary Satellite Server

Los datos capturados por el satélite GOES corresponden al GOES-15, que en su momento era el modelo que estaba operando desde el 4 de marzo de 2010 y posteriormente fue transferido a la Fuerza Espacial de los Estados Unidos renombrado como EWS-G2. Aunque estos datos corresponden al mismo evento y periodo de tiempo que los registrados por el radiotelescopio de la UTP, no presentan una coincidencia exacta en su forma. Esto se debe a que cada instrumento opera en rangos diferentes del espectro electromagnético: mientras el radiotelescopio de la UTP capta señales en radiofrecuencias, el GOES-15 está diseñado para detectar emisiones solares en el rango de los rayos X.

Los datos del satélite GOES se presentan sobre un fondo oscuro, en el cual se incluye toda la información relevante de la observación, como la fecha, la hora y las escalas de medición. La gráfica muestra la evolución del flujo de rayos X solares en función del tiempo, expresado en vatios por metro cuadrado (W/m^2) y representado en escala logarítmica. Esta elección de escala es necesaria, ya que una representación lineal haría imperceptibles los eventos de menor intensidad, como lo muestra la figura 3.6.

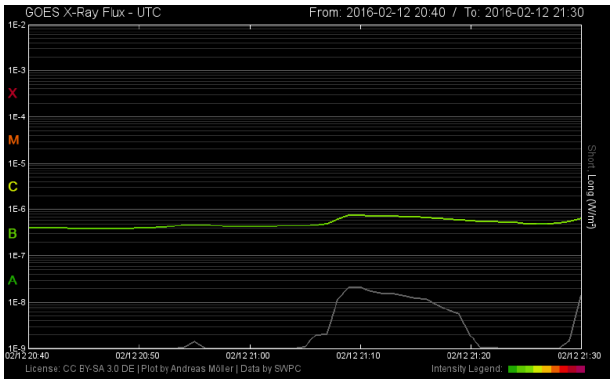


Figura 3.6: [Detección solar del GOES]. Tomado de Desarrollo de un Sistema Electrónico para el Monitoreo de las Radioemisiones Solares y Jovianas en 20, 1 MHz. (p. 70), por H. Galvis, 2016.

En cada gráfico suelen aparecer dos curvas: una correspondiente al rango de 0.5 a 4.0

Ångströms (trazo gris), y otra al rango de 1.0 a 8.0 Ångströms (trazo verde o amarillo). Estas representan diferentes bandas de energía dentro del espectro de los rayos X.

Dependiendo de la intensidad y la naturaleza del fenómeno solar, las señales registradas por el radiotelescopio de la UTP pueden mostrar una mayor similitud con una u otra de estas curvas. Algunos eventos coinciden más con el comportamiento del trazo gris, que representa longitudes de onda más cortas y, por tanto, rayos X más energéticos. Otros, en cambio, se asemejan más al trazo verde o amarillo, correspondiente a longitudes de onda más largas, asociadas a rayos X de menor energía.

Otros parámetros que pueden apreciarse en la gráfica son: los datos registrados, cuya fecha y hora se encuentran ubicadas en la parte superior derecha; la clasificación de la intensidad de los eventos solares, ubicada en el lado izquierdo del gráfico, donde aparecen las letras A, B, C, M y X, las cuales están relacionadas con la línea amarillo-verde; la leyenda de colores, ubicada en la parte inferior derecha, la cual indica la intensidad de los eventos observados mediante una escala que va del verde (menos intenso) al rojo (más intenso), lo que facilita la identificación rápida de la magnitud de los picos en la gráfica. Finalmente, en la parte inferior del gráfico se especifica que los datos provienen del SWPC (Space Weather Prediction Center) y que fueron graficados por Andreas Möller bajo una licencia CC BY-SA 3.0, lo que refuerza la credibilidad y el origen confiable de la información presentada.

3.4.2. Space Weather Prediction Center

La tabla de datos del SWPC presenta un registro detallado de los eventos solares detectados. En esta base se encuentra una tabla en formato texto, donde se listan los parámetros característicos de cada fenómeno observado, como se muestra en la siguiente figura 3.7.

```
:Product: 20160212events.txt
:Created: 2016 Feb 15 0357 UT
:Date: 2016 02 12
# Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Weather Prediction Center
# Please send comments and suggestions to SWPC.Webmaster@noaa.gov
#
# Missing data: ////
# Updated every 5 minutes.
#                          Edited Events for 2016 Feb 12
#
#Event    Begin    Max      End  Obs  Q  Type  Loc/Frq   Particulars       Reg#
#-------------------------------------------------------------------------------
4390      2023   2023     2023  PAL  U   RBR  245       120
4390 +    2023   ////     2023  SAG  C   RSP  025-129   III/2

4400 +    2105   2110     2120  G15  5   XRA  1-8A      B7.5    5.3E-04   2497
```

Figura 3.7: [Detección solar del SWPC]. Tomado de Desarrollo de un Sistema Electrónico para el Monitoreo de las Radioemisiones Solares y Jovianas en $20,1\ MHz$. (p. 70), por H. Galvis, 2016.

En la parte superior de la tabla se encuentra el encabezado con los metadatos del archivo. El campo "Product" indica el nombre del archivo de eventos; "Created" y "Date" muestran la fecha y hora en que se generó el documento, y la fecha real de los eventos registrados, respectivamente.

Después de la línea punteada se listan los eventos solares detectados, cada uno representado en una fila, asociada a la descripción de cada columna definida antes de la línea punteada. Los elementos que componen las columnas esta tabla son los siguientes: "Event", que corresponde al número identificador del evento dentro del registro de ese día; "Begin / Max / End", que indican la hora (en formato UTC) de inicio, momento de máxima intensidad y finalización del evento, respectivamente; "Obs", que señala el código del observatorio que detectó el evento; "Q", que representa el nivel de calidad del dato,

expresado con un número del 1 al 5, donde 5 indica la máxima calidad; “Type”, que indica el tipo de fenómeno registrado; “Loc/Frq”, que señala el rango espectral donde fue registrada la emisión; “Particulars”, que muestra la clasificación del evento según su intensidad, acompañada de un valor numérico que indica la magnitud exacta, el valor numérico del flujo máximo de rayos X expresado en notación científica; y finalmente, “Reg”, que indica el número de la región activa del Sol donde ocurrió el evento, lo cual permite rastrear su origen físico en la superficie solar.

3.5. Análisis de gráficas de detecciones solares

Para los fines de este trabajo, se seleccionaron dos conjuntos de datos representativos correspondientes a diferentes niveles de intensidad en las señales registradas. El primer conjunto corresponde a un evento con la actividad solar más baja registrada, mientras que el segundo refleja un evento con una mayor intensidad en la señal captada. Esta selección permite comparar y contrastar cómo se manifiestan las variaciones en la emisión de ondas de radio según el nivel de actividad solar, así como establecer relaciones con los registros obtenidos por la NOAA en el mismo intervalo de tiempo.

La toma de baja actividad solar corresponde a la figura 3.8 mostrada a continuación.

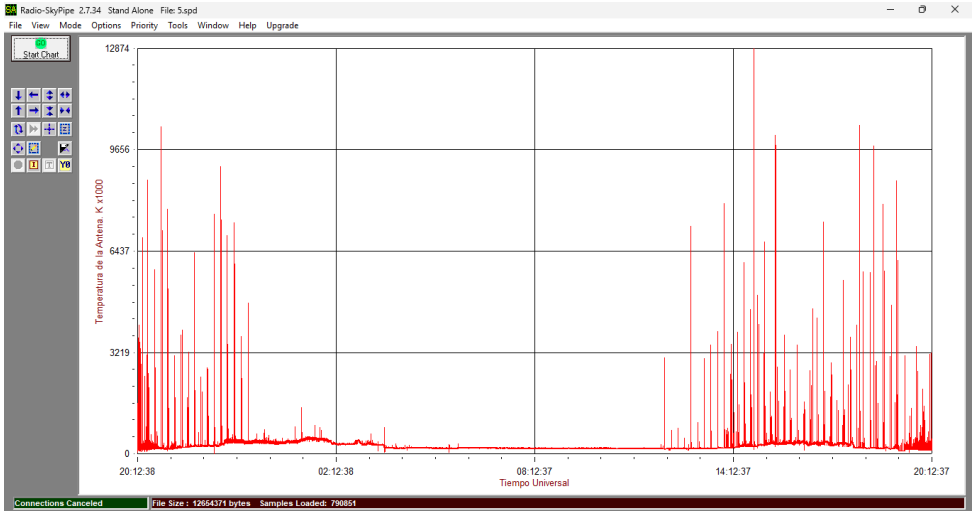


Figura 3.8: [Detección solar de los días 4-5 de abril de 2016]. Nota. Imagen tomada de archivo privado. Hamilton Galvis, 2016.

El intervalo de tiempo registrado en el archivo comienza el 4 de abril de 2016 a las 20:12:38 y finaliza el 5 de abril de 2016 a las 20:12:38, lo que representa una duración total de 24 horas. Durante este período se recolectaron un total de 790.851 muestras, con una frecuencia de muestreo de 9,153 muestras por segundo, un período promedio de muestreo de 0,109 segundos por muestra.

Sin embargo, se tomó la muestra del sexto registro solar captado por el radiotelescopio, correspondiente al día 5 de abril de 2016, registrada en UT entre las 15:00:00 y las 17:59:00, abarcando un rango de aproximadamente 194,000 K a 380,000 K. Este registro estuvo dividido en dos emisiones independientes, como lo muestra la figura 3.9.

La primera, ubicada en la parte superior de la imagen, fue registrada en UT entre las 15:00:00 y las 16:30:00, y abarca un rango de 280.000 K a 380.000 K. El crecimiento progresivo de la señal inició alrededor de las 15:15:00 UT, con un ascenso que se desa-

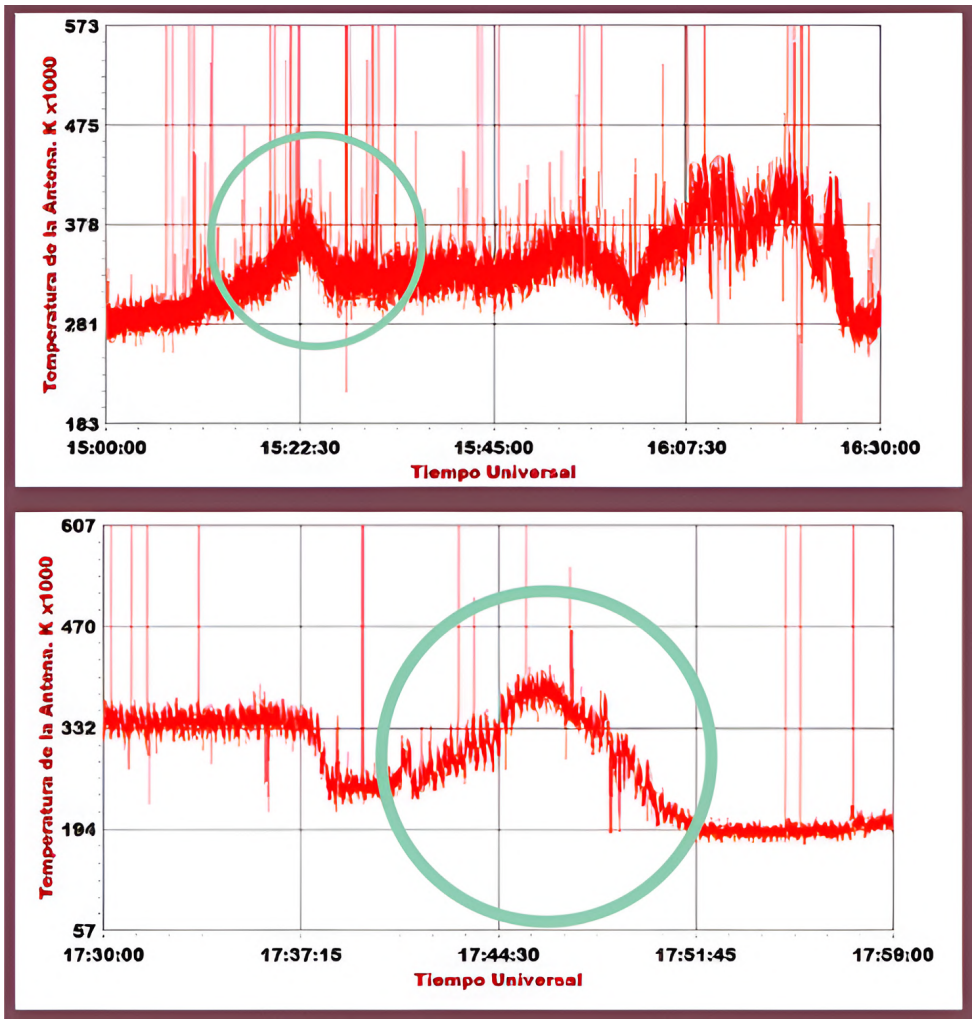


Figura 3.9: [Sexto registro solar del día 5 de abril de 2016 (15:00-17:59 UTC)]. Tomado de Desarrollo de un Sistema Electrónico para el Monitoreo de las Radioemisiones Solares y Jovianas en 20,1 MHz. (p. 74-75), por H. Galvis, 2016.

rrolló durante aproximadamente 8 minutos, alcanzando un pico hacia las 15:23:00 UT. Posteriormente, la señal se mantuvo en una meseta estable hasta cerca de las 15:30:00 UT. A partir de ese momento, se observa un leve descenso, aunque sin retornar al piso de ruido, lo cual sugiere una fase de decaimiento o depresión temporal del fenómeno. Luego, hacia las 16:00:00 UT, se registra un nuevo aumento de la señal que se extiende hasta las 16:08:00 UT, esta vez con un incremento más ruidoso e inestable, caracterizado por variaciones bruscas y picos que alcanzan incluso valores superiores a los 380.000 K. La señal se mantiene elevada hasta cerca de las 16:20:00 UT, momento en el cual inicia un descenso abrupto que culmina con un retorno claro al piso de ruido hacia las 16:25:00 UT.

La segunda señal, ubicada en la parte de abajo de la figura, fue registrada en horario UT entre las 17:30:00 y las 17:59:00, abarcando un rango de temperatura entre 194,000 K y 340,000 K. Al inicio del registro, la señal se mantiene estable por encima del piso de ruido, en torno a los 300.000 K. Esta estabilidad persiste hasta aproximadamente las 17:41:00 UT, momento en el que comienza un ascenso progresivo que alcanza su punto máximo alrededor de las 17:46:00 UT. Posteriormente, se observa un descenso pronunciado que finaliza hacia las 17:51:45 UT, cuando la señal vuelve a estabilizarse en el nivel del piso de ruido, lo que indica que esta segunda señal fue 46,000 K mayor que la primera.

Con base en lo anterior, ambos eventos registrados por el radiotelescopio de la UTP fueron comparados con las señales obtenidas por el satélite GOES, específicamente con el trazo gris correspondiente al rango de 0.5 a 4.0 Ångströms. En dichas comparativas, que fueron ubicadas en la misma posición que cada una de las emisiones para facilitar la observación, se evidencian picos que sobresalen claramente por encima del nivel de flujo estable, como lo muestra la figura 3.10, lo cual refuerza la correspondencia temporal entre ambas detecciones y permite validar la presencia del evento solar desde diferentes instrumentos.

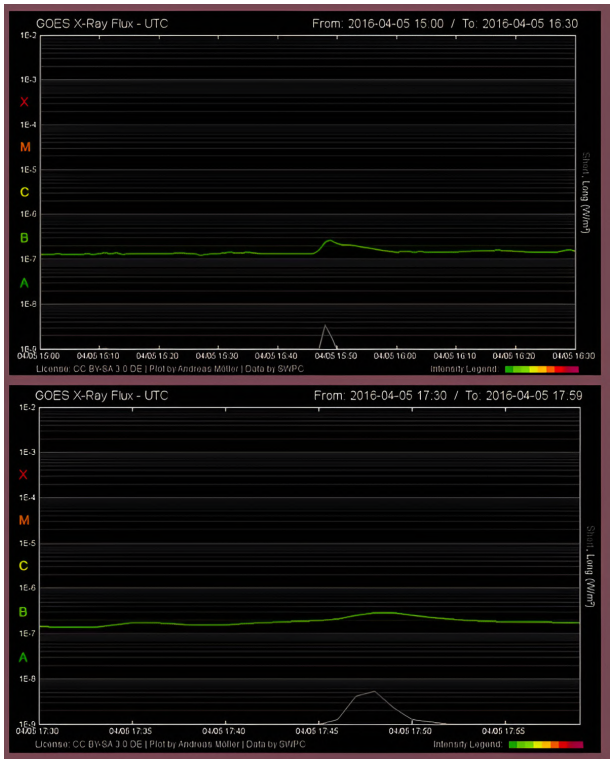


Figura 3.10: [Registro solar del GOES del día 5 de abril de 2016 (15:00-18:00 UTC)]. Tomado de Desarrollo de un Sistema Electrónico para el Monitoreo de las Radioemisiones Solares y Jovianas en 20, 1 MHz. (p. 74-75), por H. Galvis, 2016.

Por último, la base de datos del SWPC de la figura 3.11 presenta, justo después de la línea punteada, la información correspondiente a los dos eventos analizados, los cuales se encuentran listados en el mismo orden en que fueron presentados anteriormente.

```
:Product: 20160405events.txt
:Created: 2016 Apr 08 0357 UT
:Date: 2016 04 05
# Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Weather Prediction Center
# Please send comments and suggestions to SWPC.Webmaster@noaa.gov
#
# Missing data: ////
# Updated every 5 minutes.
#                          Edited Events for 2016 Apr 05
#
#Event    Begin    Max       End  Obs  Q  Type  Loc/Frq   Particulars       Reg#
#-----------------------------------------------------------------------------

8950 +    1546   1549      1554  G15  5   XRA  1-8A      B2.5    7.6E-05   2528

8960      1745   1748      1751  G15  5   XRA  1-8A      B2.8    6.2E-05   2528
```

Figura 3.11: [Base de datos del SWPC del día 5 de abril de 2016]. Tomado de Desarrollo de un Sistema Electrónico para el Monitoreo de las Radioemisiones Solares y Jovianas en 20,1 MHz. (p. 76), por H. Galvis, 2016.

La primera emisión, identificada con el número 8950 y registrada por el satélite *GOES-15*, corresponde a un evento que dio inicio a las 15:46 UTC, alcanzó su máximo nivel de intensidad a las 15:49 UTC y concluyó a las 15:54 UTC. Esta fulguración fue clasificada como un evento tipo *XRA* (rayos X), dentro del rango espectral de 1–8 Å. La intensidad máxima alcanzada correspondió a una clase *B2.5*, y con una calidad de nivel 5. Además, se asoció a la región activa número 2528 en la superficie solar.

La segunda emisión, registrada con el número 8960, también fue detectada por el satélite *GOES-15* durante la misma jornada. Este evento comenzó a las 17:45 UTC, alcanzó su punto máximo de intensidad a las 17:48 UTC y concluyó a las 17:51 UTC. Al igual que la emisión anterior, se trató de una fulguración del tipo XRA, dentro del mismo rango espectral de 1–8 Å. En esta ocasión, la intensidad fue ligeramente mayor, siendo clasificada como *B2.8*. El evento estuvo vinculado a la misma región activa 2528 y, nuevamente, se registró con una calidad de dato nivel 5.

A diferencia de los eventos de baja actividad previamente analizados, la figura 3.12 muestra los episodios de mayor actividad solar captados en los datos disponibles.

Este registro comenzó el 21 de noviembre de 2015 a las 00:47:40 UTC y finalizó exactamente 24 horas después, el 22 de noviembre a la misma hora. Durante ese tiempo se capturaron 789.442 muestras, con una tasa de muestreo promedio de 9,137 muestras por segundo, lo que refleja una adquisición continua y densa de datos. El período promedio entre muestras fue de 0,109 segundos, lo cual es consistente con la frecuencia de muestreo.

La muestra que se tomó de este registro corresponde al día 21 de noviembre de 2015, registrada en UT entre las 12:00:00 y las 16:00:00, abarcando un rango de aproximadamente 260,000 K a 568,000 K. Este registro tuvo una única emisión detectable por el radiotelescopio, como lo muestra la figura 3.13.

En el gráfico se observa un único pico de gran amplitud, claramente delimitado y centrado alrededor de las 14:00 UTC. La intensidad alcanzó un valor máximo de aproximadamente 568 Ta, destacándose notablemente sobre un nivel base o piso de ruido estimado en 260 Ta. Esta variación sostenida y bien definida en la curva sugiere la detección de una emisión solar significativa, posiblemente asociada a una fulguración, dado su perfil suave en ascenso y descenso, y la persistencia del incremento en el tiempo. La

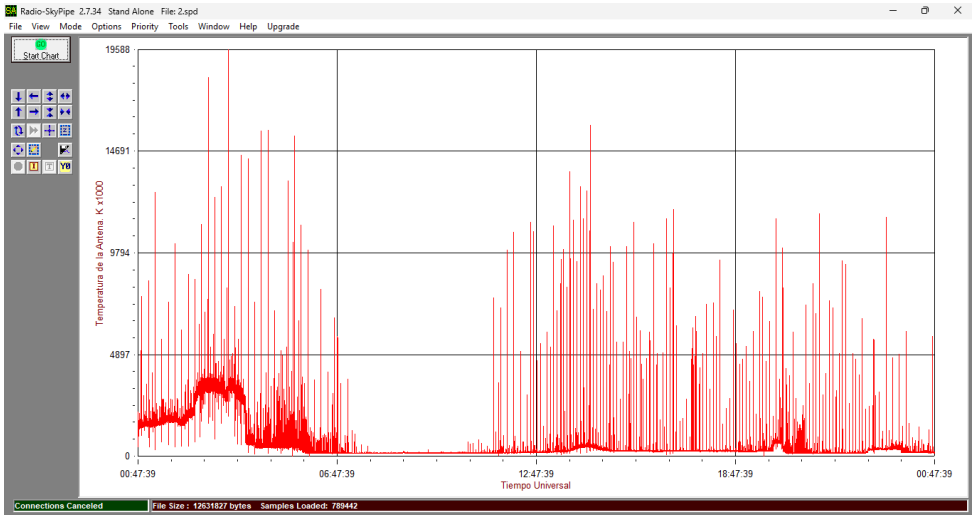


Figura 3.12: [Detección solar de los días 21-22 de noviembre de 2015]. Nota. Imagen tomada de archivo privado. Hamilton Galvis , 2015.

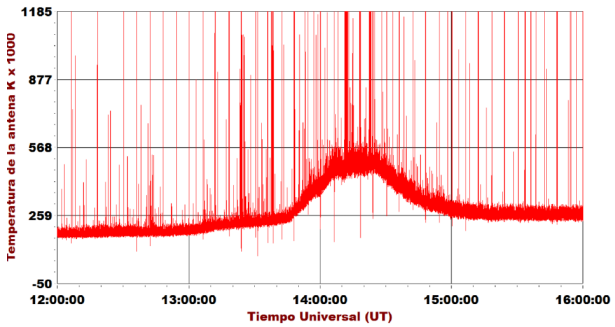


Figura 3.13: [Registro solar del día 21 de noviembre de 2015 (12:00-16:00 UTC)]. Tomado de Desarrollo de un Sistema Electrónico para el Monitoreo de las Radioemisiones Solares y Jovianas en $20,1\ MHz$. (p. 68), por H. Galvis, 2016.

evolución del pulso evidencia una fase de aumento continuo de temperatura, seguida por una fase de descenso progresivo, lo que indica un fenómeno de emisión sostenida más que un pulso breve o ruido aleatorio.

Con respecto a la emisión de menor intensidad mencionada anteriormente del día 5 de abril de 2016, esta nueva medida presentó un incremento de aproximadamente 208,000 K por encima del nivel de ruido de piso para el primer registro, mientras que en el caso de la segunda señal, el aumento fue de alrededor de 162,000 K respecto al mismo nivel de referencia.

La congruencia entre los registros del GOES y los resultados obtenidos mediante el software (línea verde-amarilla) se evidencia en la figura 3.14 al observar que la señal captada por el radiotelescopio (línea roja) coincide notablemente con el comportamiento, de la segunda señal registrada, del flujo de rayos X registrado por el satélite GOES.

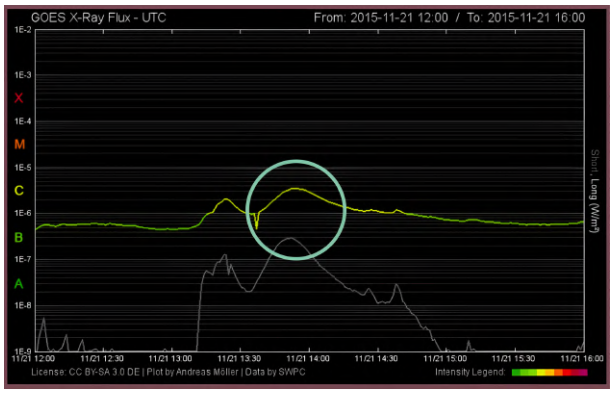


Figura 3.14: [Registro solar del GOES del día 21 de noviembre de 2016 (12:00-16:00 UTC)]. Tomado de Desarrollo de un Sistema Electrónico para el Monitoreo de las Radioemisiones Solares y Jovianas en 20,1 MHz. (p. 74-75), por H. Galvis, 2016.

La corroboración de las representaciones gráficas mediante la base de datos del Space Weather Prediction Center (SWPC) evidenció que en ese momento ocurrieron dos eventos de emisión dentro del intervalo temporal analizado.

```
:Product: 20151121events.txt
:Created: 2015 Nov 24 0357 UT
:Date: 2015 11 21
# Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Weather Prediction Center
# Please send comments and suggestions to SWPC.Webmaster@noaa.gov
#
# Missing data: ////
# Updated every 5 minutes.
#                          Edited Events for 2015 Nov 21
#
#Event    Begin    Max       End  Obs  Q  Type  Loc/Frq   Particulars       Reg#
#-------------------------------------------------------------------------------
3560 +    1311   1324      1329  G15  5   XRA  1-8A      C2.0    1.4E-03   2454

3610      1336   1353      1405  G15  5   XRA  1-8A      C3.3    4.3E-03   2454
```

Figura 3.15: [Base de datos del SWPC del día 21 de noviembre de 2015]. Tomado de Desarrollo de un Sistema Electrónico para el Monitoreo de las Radioemisiones Solares y Jovianas en 20,1 MHz. (p. 69), por H. Galvis, 2016.

La primera emisión, identificada con el número 3560 y registrada por el satélite *GOES-15*, corresponde a un evento que dio inicio a las 13:11 UTC, alcanzó su máximo nivel de intensidad a las 13:24 UTC y concluyó a las 13:29 UTC. Esta fulguración fue clasificada como un evento tipo XRA, dentro del rango espectral de 1–8 Å. La intensidad máxima alcanzada correspondió a una clase *C2.0*, y el registro cuenta con una calidad de *nivel* 5, la más alta según los estándares del SWPC. Además, se asoció a la región activa número 2454 en la superficie solar.

La segunda emisión, registrada con el número 3610, también fue detectada por el satélite *GOES-15* durante la misma jornada. Este evento comenzó a las 13:36 UTC, alcanzó su punto máximo de intensidad a las 13:53 UTC y concluyó a las 14:05 UTC. Al igual que la emisión anterior, se trató de una fulguración del tipo XRA, dentro del mismo rango espectral de 1–8 Å. En esta ocasión, la intensidad fue ligeramente mayor, siendo clasificada como *C3.3*. El evento, asociado nuevamente a la región activa 2454, fue registrado con calidad de dato nivel 5.

No obstante, el radiotelescopio de la UTP registró la segunda emisión detectada tanto por el GOES como por el SWPC.

A partir del análisis realizado, se puede afirmar que el radiotelescopio está captando ondas de radio provenientes del Sol y no de otras fuentes similares, afirmación que se sustenta en varios factores: en primer lugar, el instrumento opera a una frecuencia de $20,1\ MHz$, dentro del rango característico de las emisiones de radio solares, las cuales suelen encontrarse en frecuencias bajas entre 10 y 100 MHz, dependiendo de la actividad solar. Además, el radiotelescopio funciona de manera continua a lo largo del día, permitiendo registrar señales cuya intensidad varía rápidamente en cortos periodos de tiempo, un comportamiento típico de las emisiones solares. Por otra parte, el equipo fue sometido a una calibración rigurosa, ajustando parámetros como su patrón de radiación y polarización, garantizando así la precisión de las mediciones. Finalmente, los datos obtenidos fueron comparados con los registros del Space Weather Prediction Center (SWPC) y del satélite GOES, evidenciando que las señales captadas coinciden con eventos solares reportados en los momentos de observación.

3.6. Implicaciones de la actividad solar en nuestro entorno

En el capítulo 1 se introdujo la clasificación de las fulguraciones solares, detallando sus distintas categorías. Es importante recordar que la escala de intensidad de rayos X es logarítmica, donde cada clase representa una intensidad diez veces superior a la anterior. Si bien las clasificaciones originales eran C, M y X, el desarrollo de instrumentos más sensibles hizo posible la observación de fulguraciones de menor magnitud, designadas como A y B. Estas clasificaciones, basadas en el flujo máximo (W/m^2), se pueden visualizar en la figura 3.16.

Clase	W/m^2 entre 1 y 8 Angstroms
A	$< 10^{-7}$
B	$\geq 10^{-7} < 10^{-6}$
C	$\geq 10^{-6} < 10^{-5}$
M	$\geq 10^{-5} < 10^{-4}$
X	$\geq 10^{-4}$

Figura 3.16: [Clasificación de las llamaradas solares]. Tomado de Análisis integrado del efecto producido por una fulguración solar en la Ionosfera terrestre a latitudes medias altas. Recuperado de https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/178274f

En la tabla, las unidades W/m^2 entre 1 y 8 Ångstroms significan que se está midiendo la potencia del flujo de radiación (en vatios por metro cuadrado) que llega a la Tierra, pero solo dentro de un rango específico de longitudes de onda: de 1 a 8 Å (0,1 a 0,8 nm), que corresponde a rayos X blandos.

En concordancia con los análisis previos y la clasificación establecida, las tres emisiones solares registradas se encontraron dentro de las categorías bajas. La primera emisión analizada alcanzó un nivel B2.5, seguida por una de B2.8 y finalmente una de C3.3.

Además de la clasificación de fulguraciones solares basada en el flujo de rayos X, existen otras escalas de clima espacial consideradas por la NOAA, escalas que fueron introducidas con el objetivo de comunicar al público general las condiciones de clima espacial tanto actuales como futuras, así como sus posibles efectos sobre las personas y los sistemas tecnológicos. Mientras que muchos productos del SWPC describen el estado del entorno espacial, pocas herramientas habían logrado representar de manera accesible los impactos que podrían experimentarse a consecuencia de las perturbaciones ambientales. Las escalas establecidas por la NOAA permiten llenar este vacío informativo, proporcionando un marco claro y estructurado para comprender los posibles efectos del clima espacial. Se dividen en tres tipos de eventos: tormentas geomagnéticas, tormentas de radiación solar y apagones de radio, cada una con niveles numerados, similares a los utilizados en la clasificación de llamaradas solares, como se muestra en la figura 3.17. Cada nivel enumera los posibles efectos asociados, describe su frecuencia de ocurrencia y cuantifica la intensidad de la causa física subyacente, brindando así una herramienta valiosa tanto para usuarios técnicos como para el público interesado, tal y como lo plantea la (Space Weather Prediction Center, 2025).

Level	Radio blackouts		Proton storms		Geomagnetic storms	
	Scale	X-ray	Scale	Pfu*	Scale	Kp
Extreme	R5	X20	S5	100000	G5	9
Severe	R4	X10	S4	10000	G4	8
Strong	R3	X1	S3	1000	G3	7
Moderate	R2	M5	S2	100	G2	6
Minor	R1	M1	S1	10	G1	5

Pfu: Particle flux unit: number of particles with an energy ≥ 10 MeV*

Figura 3.17: [Escalas de clima espacial de la NOAA] Tomado de Análisis integrado del efecto producido por una fulguración solar en la Ionosfera terrestre a latitudes medias altas. Recuperado de https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/178274f

La primera columna, color verde, corresponde a la escala de apagones de radio debido a la actividad solar. En un nivel R1 (Menor), los efectos son prácticamente imperceptibles: la comunicación por radio sufre una degradación leve y ocasional, y los sistemas de navegación solo experimentan breves alteraciones. En R2 (Moderado), los apagones de comunicación por radio son más notorios, afectando el lado de la Tierra expuesto al Sol durante decenas de minutos, mientras que las señales de navegación también se ven degradadas durante ese tiempo.

Continuando, con un evento R3 (Fuerte), el apagón de radio cubre un área amplia, interrumpiendo las comunicaciones por cerca de una hora en la región iluminada por el Sol, generando una degradación más seria en los sistemas de navegación por baja frecuencia. A medida que la situación progresa hacia un R4 (Severo), se pierde prácticamente todo el contacto por radio HF en gran parte del área iluminada, durante una o dos horas, y los errores en la navegación aumentan significativamente, dificultando la localización

precisa tanto en aire como en mar. Finalmente, en un escenario R5 (Extremo), el apagón de radio es total y prolongado durante varias horas en todo el hemisferio iluminado por el Sol, afectando gravemente las comunicaciones de marineros, aviadores y otros sistemas críticos; además, los errores de navegación satelital se vuelven tan serios que incluso pueden afectar zonas que entran en la noche tras el paso del Sol.

La segunda columna, color azul, presenta la escala S para clasificar los efectos de eventos solares relacionados con tormentas de radiación solar. En un nivel S1 (Menor), no existen riesgos biológicos ni problemas importantes para los satélites; sólo se observan pequeños efectos en las comunicaciones de radio en regiones polares. Con un S2 (Moderado), los pasajeros y tripulaciones de vuelos en altitudes elevadas pueden enfrentar un leve riesgo de radiación, y los satélites pueden experimentar perturbaciones aisladas en su funcionamiento, afectando mínimamente las comunicaciones.

Al pasar a un S3 (Fuerte), se recomienda a los astronautas en actividades extravehiculares (EVA) que eviten exponerse, debido a un riesgo mayor de radiación; los satélites pueden sufrir fallos temporales en sus sistemas de imágenes y una disminución en la eficiencia de sus paneles solares, mientras que las comunicaciones de radio HF se deterioran en zonas polares. En el nivel S4 (Severo), el riesgo de radiación para astronautas y aeronaves de alta altitud se vuelve inevitable; los satélites pueden sufrir errores importantes en memoria, daños en sus sistemas de navegación, y los paneles solares pierden eficiencia, afectando de manera prolongada las comunicaciones en el Ártico y la Antártida. Finalmente, en el máximo nivel, S5 (Extremo), la radiación alcanza niveles tan altos que expone gravemente a astronautas y a vuelos de gran altitud, pudiendo inutilizar satélites enteros, borrar datos, inutilizar sistemas de navegación, dañar paneles solares permanentemente, e interrumpir por completo las comunicaciones de alta frecuencia en regiones polares, complicando aún más la navegación global.

La tercera columna, color naranja, muestra las tormentas geomagnéticas. En un nivel G1 (Menor), los impactos son bastante leves: apenas se perciben pequeñas fluctuaciones en las redes eléctricas y algunos satélites pueden experimentar mínimas alteraciones, mientras que fenómenos naturales como las auroras son visibles en zonas cercanas a los polos. Cuando subimos al nivel G2 (Moderado), las redes eléctricas de alta latitud pueden empezar a sufrir problemas de voltaje y, en el espacio, el control de los satélites puede requerir pequeños ajustes debido a alteraciones en su órbita.

También la propagación de señales de radio de alta frecuencia empieza a verse afectada. Con una tormenta G3 (Fuerte), las perturbaciones son más notables: los sistemas eléctricos podrían requerir correcciones de voltaje y protección adicional, los satélites presentan más dificultades para mantener su orientación y resistencia, y además las comunicaciones por radio y navegación satelital empiezan a fallar de forma intermitente; incluso, las auroras pueden verse en latitudes más bajas. En un escenario G4 (Severo), los daños aumentan: los sistemas eléctricos pueden presentar fallos más generalizados, los satélites necesitan maniobras más frecuentes para corregir su rumbo, y las comunicaciones de radio de baja frecuencia sufren interrupciones prolongadas; auroras visibles en regiones aún más alejadas de los polos son un claro indicativo. Finalmente, una tormenta G5 (Extrema) provoca una disrupción significativa: posibles apagones a gran escala, serios daños a los transformadores eléctricos, grandes cargas en los satélites que comprometen su operación, interrupciones prolongadas en las comunicaciones de radio.

Aunque no existe una equivalencia directa entre la clasificación de fulguraciones solares basada en el flujo de rayos X (categorías A, B, C, M y X) y las tres escalas de clima

espacial mostradas en la figura anterior 3.17, es posible establecer una relación conceptual entre ambas medidas en cuanto a su potencial impacto en la Tierra. Las fulguraciones analizadas, clasificadas dentro de las categorías B2.5, B2.8 y C3.3, representan eventos de baja intensidad, que en general no provocan efectos significativos sobre el entorno terrestre. De acuerdo con la escala de tormentas geomagnéticas, estos niveles de actividad corresponderían, en el mejor de los casos, a un nivel G1 (menor), caracterizado por fluctuaciones débiles en las redes eléctricas, leves efectos sobre las operaciones satelitales y auroras visibles únicamente en latitudes altas.

Las emisiones analizadas, al encontrarse en las categorías B y C, no representan una amenaza significativa. El flujo de fondo durante el máximo solar suele encontrarse en niveles B, por lo que las emisiones B2.5 y B2.8 corresponden a eventos de baja intensidad, sin capacidad para generar perturbaciones notables en el entorno terrestre. La emisión clasificada como C3.3, aunque de una categoría superior, sigue siendo considerada una fulguración menor. Las fulguraciones de clase C generalmente tienen poco o ningún efecto en la Tierra, salvo que sean de larga duración, lo cual no fue el caso en las observaciones registradas.

Para concluir, la radiación espacial representa uno de los mayores retos para las misiones más allá de la órbita terrestre, ya que fuera del campo magnético de la Tierra, los astronautas quedan expuestos a partículas de alta energía capaces de penetrar tejidos, dañar el ADN, aumentar el riesgo de cáncer y afectar órganos vitales. Esta radiación proviene principalmente de tres fuentes: los cinturones de Van Allen que rodean la Tierra, el Sol mediante llamaradas y eyecciones de masa coronal, y los rayos cósmicos galácticos que viajan desde explosiones estelares a velocidades cercanas a la luz. Debido a que esta radiación no se puede ver ni sentir, las agencias espaciales la monitorean constantemente mediante sistemas de dosimetría operativa y dosímetros personales que permiten conocer en tiempo real la exposición acumulada de cada astronauta. Además, se establecen límites de dosis según edad y género para reducir riesgos a largo plazo. La estrategia actual se basa en limitar el tiempo en el espacio y emplear materiales protectores como polietileno o refugios naturales como tubos de lava. Las misiones permiten afinar estas medidas antes de intentar misiones más prolongadas, como las planeadas a Marte.

3.6.1. Consideraciones finales

El análisis detallado del funcionamiento de la antena permitió profundizar en la comprensión de las ondas electromagnéticas, evidenciando la importancia de estudiar no solo los conceptos teóricos, sino también los dispositivos tecnológicos que los materializan. A lo largo de este trabajo, se ha puesto de manifiesto que la interacción entre la onda electromagnética y la materia constituye un proceso esencial en la adquisición e interpretación de datos, especialmente en sistemas como los radiotelescopios, donde las señales captadas poseen una densidad de potencia extremadamente baja. Esta interacción, influida por propiedades del medio como la permitividad eléctrica, la conductividad o la geometría superficial, determina fenómenos como la absorción, reflexión, transmisión y dispersión de la onda, todos cruciales para optimizar el acoplamiento entre el sistema detector y la radiación incidente.

En este contexto, el carácter geométrico de la antena adquiere una relevancia central. La forma, tamaño, orientación y disposición de sus elementos no son arbitrarios, sino que están intrínsecamente diseñados para favorecer la recepción o emisión de ondas en determinadas frecuencias y polarizaciones. Esta relación entre geometría y fenómeno elec-

tromagnético no solo mejora la eficiencia del diseño instrumental, sino que también ofrece una clave conceptual poderosa para vincular la teoría con la experiencia física concreta, estableciendo una linealidad explicativa entre la propagación de la onda, el comportamiento de la materia y el diseño del dispositivo. Esta articulación entre principios físicos y herramientas científicas no debe ser entendida únicamente desde una perspectiva técnica, sino como una oportunidad para reflexionar críticamente sobre los fines de la enseñanza de la física como lo plantean (Pansza y Morán, 2006). La experimentación — entendida como una estrategia que permite al estudiante observar, manipular y construir nuevas explicaciones a partir de fenómenos concretos — es un componente clave para este tipo de enseñanza, pues "se configura como un mecanismo por el cual el estudiante se convierte en el protagonista de su aprendizaje y sujeto consciente de las relaciones que él establece con su entorno" (García y Moreno, 2020, p. 149).

Desde una perspectiva pedagógica, esta investigación subraya el valor de abordar la enseñanza de las ondas electromagnéticas a partir de casos tangibles y contextualizados, como el funcionamiento de un radiotelescopio. Estos dispositivos permiten visualizar una física que normalmente no es accesible a los sentidos, brindando oportunidades para que los estudiantes se apropien de conceptos abstractos a través de experiencias significativas. Al introducir el análisis de la interacción onda-materia mediante un ejemplo real y tecnológicamente relevante, se fortalece la comprensión profunda de los fenómenos físicos y se fomenta el pensamiento crítico, habilidades esenciales en la formación del futuro docente. En este sentido, "el profesor universitario [...] podría ubicar mejor la materia que imparte, dentro del marco general de la carrera, así como la aportación de aprendizajes importantes de dicho programa, para los diferentes momentos del proceso de preparación del estudiante y relacionarlos" (Pansza y Morán, 2006), lo que justifica la inclusión de estos temas en la formación inicial del profesorado. Además, este enfoque responde a la necesidad de integrar teoría y práctica en el aula, reconociendo que las experiencias prácticas experimentales suponen la combinación coordinada de distintos tipos de tareas, en un marco que entrelaza teoría y práctica de forma conjunta y complementaria.

En consecuencia, la pertinencia de este estudio para la formación de licenciados en física va más allá del dominio técnico. Saber cómo funciona una antena o cómo se propagan las ondas electromagnéticas es solo un punto de partida: lo verdaderamente formativo es preguntarse cómo enseñar estos saberes, cómo vincularlos con estrategias didácticas efectivas y qué sentido pueden cobrar en la educación científica escolar. Comprender la interacción entre la onda y la materia desde un enfoque didáctico implica dotar al docente en formación de herramientas para mediar entre la abstracción teórica y la práctica concreta, y para promover una enseñanza de la física que integre ciencia, tecnología y educación como dimensiones inseparables. Como advierten los autores, (Pansza y Morán, 2006), la instrumentación como herramienta didáctica no puede, en ninguna circunstancia, asumirse como escéptica, descargada de connotaciones políticas, lo cual subraya la necesidad de pensar la enseñanza científica como una práctica situada, crítica y socialmente comprometida. Desde esta visión, "la experimentación como camino a la problematización de fenómenos concretos de la naturaleza[...] parte de la curiosidad" y genera nuevas formas de entender e intervenir el entorno desde el aula (García y Moreno, 2020, p. 151).

Así, el estudio de dispositivos como las antenas — y en particular los radiotelescopios — no solo permite desentrañar principios fundamentales del electromagnetismo, sino que ofrece una vía para repensar cómo esos principios pueden ser enseñados, vivenciados y apropiados por los estudiantes, enriqueciendo tanto su formación científica como su visión del universo. Esta propuesta se aleja de los enfoques reduccionistas que entienden el

aprendizaje como mera repetición de contenidos o procedimientos, para acercarse a una perspectiva en la que el conocimiento se construye y resignifica continuamente. Tal como lo señala la crítica a la enseñanza instrumental, "solo se da como posibilidad una propuesta de carácter operacional, más que teórica" (Pansza y Morán, 2006, p. 1), invisibilizando los procesos de construcción de sentido que deben estar en el centro de toda experiencia educativa. En cambio, proponer experiencias experimentales contextualizadas permite que el estudiante "explore, observe, analice, concluya y cree sus propias hipótesis", desarrollando así pensamiento científico reflexivo y crítico (García y Moreno, 2020, p. 153).

Conclusiones

- El documento permitió realizar una exploración alrededor de cómo la radioastronomía se ha consolidado como una herramienta crucial para expandir el conocimiento del universo, específicamente en la exploración de fenómenos astronómicos que en la actualidad se estudian ampliamente a través de los telescopios y satélites en órbita, sin embargo, para el caso de la enseñanza los radiotelescopios brindan una herramienta complementaria de un costo accesible para las instituciones educativas, permitiendo hacer la detección de estos fenómenos desde la Tierra. Adicionalmente, al emplear radiotelescopios, la física y la astronomía aprovechan las propiedades de las ondas electromagnéticas en el rango de radio, permitiendo descubrimientos que aportan a la comprensión de fenómenos astronómicos y electromagnéticos.
- La aplicabilidad del conocimiento permite relacionar las teorías físicas soportadas desde el formalismo matemático con los fenómenos físicos reales y cotidianos, tal es el caso del estudio de las ondas electromagnéticas formalizadas a través de las ecuaciones de Maxwell, ya que, al ser estudiadas desde una perspectiva fenomenológica, permite comprender el proceso de detección que realizan los instrumentos como las radioantenas, al igual que los fenómenos físicos involucrados en dicho proceso. Es por esto por lo que el presente trabajo brinda una alternativa complementaria a la explicación de los fenómenos eléctricos y magnéticos, especificando claramente un ejemplo puntual donde se ven relacionados. Si bien el trabajo, al igual que el radiotelescopio, no fueron implementados en un contexto escolar, si ofrece herramientas conceptuales para que los docentes en formación, de la licenciatura en física de la UPN, que se acerquen al documento tengan un incentivo y un insumo para que puedan llevar propuestas de esta índole e impactar a los estudiantes que tienen a su cargo.
- Tras afrontar una serie de dificultades durante el desarrollo de la investigación —tales como la adquisición de los instrumentos necesarios (debido a sus costos) para filtrar las señales de radio emitidas por el Sol, los cuales permiten un estudio más detallado de dichas señales—, se logró contactar con la Universidad Tecnológica de Pereira, la cual suministró los datos necesarios para culminar la presente investigación.

  Una vez concluida la investigación, se identificó que el análisis de las antenas de alambre, en particular de las helicoidales y de bucle, desempeña un papel fundamental en la detección de ondas electromagnéticas realizada por los radiotelescopios, dada la estrecha relación entre su diseño geométrico y sus propiedades físicas. Una comprensión profunda de sus principios de diseño y funcionamiento no solo permite optimizar su desempeño en aplicaciones específicas, sino que también impulsa el desarrollo de tecnologías más avanzadas para la detección precisa de fenómenos electromagnéticos, consolidando a estas antenas como componentes esenciales en este campo.
- Ahondar en el estudio de la detección de ondas de radio provenientes del Sol y en el

funcionamiento de los dispositivos diseñados para este fin promueve la comprensión de la dinámica solar y de sus repercusiones en el entorno terrestre. Por tal razón, es pertinente que los futuros licenciados adquieran conocimientos al respecto, para que promuevan en sus estudiantes una conciencia crítica sobre los fenómenos solares y su impacto potencial en la vida moderna.

La clasificación de las fulguraciones solares y las escalas de clima espacial, como las definidas por la NOAA, permiten no solo caracterizar los eventos solares en términos de su magnitud física, sino también comprender sus posibles consecuencias sobre las comunicaciones, la navegación, la infraestructura tecnológica y la exposición humana a la radiación.

Así, familiarizarse con las categorías de fulguraciones (A, B, C, M y X) y los niveles de impacto (R, S y G) resulta esencial para interpretar los riesgos y generar respuestas adecuadas que mitiguen las posibles perturbaciones ambientales. La correcta interpretación de fenómenos de baja intensidad, como los eventos B2.5, B2.8 y C3.3 analizados, constituye un primer paso fundamental en la formación de profesionales capaces de abordar con responsabilidad la educación científica y tecnológica de las futuras generaciones.

Referencias

Acevedo, J. A. (2004). *Ciencia, tecnología y sociedad (cts). un enfoque innovador para la enseñanza de las ciencias.* Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias. (Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Jose-Acevedo-Diaz/publication/260612723_Ciencia_Tecnologia_y_Sociedad_CTS_Un_enfoque_innovador_para_la_ensenanza_de_las_ciencias/links/00463531d730900fe4000000/Ciencia-Tecnologia-y-Sociedad-CTS-Un-enfoque-innovador-para-la-ensenanza-de-las-ciencias.pdf)

Agarwal, T. (2022). Wire antenna: Design, working, types, advantages & its uses. *ElProCus - Electronic Projects for Engineering Students*. Descargado de https://www.elprocus.com/wire-antenna/

Aguirre, N. (2024). *Análisis integrado del efecto producido por una fulguración solar en la ionosfera terrestre a latitudes medias altas.* (Trabajo de grado presentado para optar al título de licenciada en física)

Alhejandhro, C. M. (2025). *Tema 3.3. ecuación de continuidad.* Scribd. Descargado de https://pt.scribd.com/doc/96865138/Tema-3-3-Ecuacion-de-Continuidad

América, T., y Santoyo, R. (2021). *Campo cercano y campo lejano.* Tes América. Descargado de https://www.tesamerica.com/campo-cercano-y-campo-lejano/

Anónimo. (s.f.-a). *Ondas electromagnÉticas. conceptos bÁsicos.* https://www.uco.es/organiza/departamentos/ing-electrica/documentos/ONDAS_EM_CONCEPTOS_BASICOS.pdf.

Anónimo. (s.f.-b). *Radiotelescopios programa-guía.* https://partner.cab.inta-csic.es/Upload/201309/PG_RT_13.pdf.

Anónimo. (2016). *Archive.org.* https://web.archive.org/web/20070403164012/http://www.fi.uba.ar/materias/6209/download/6-Lineas1.pdf.

Anónimo. (2019). *El espectro electromagnético.* https://www.academia.edu/37870641/El_espectro_electromagn%C3%A9tico.

Anónimo. (s.f.). *2.4 receptores de radio.* https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7053/7053985/tema_2_2007_2008_b.pdf.

Anónimoo. (2024). *Guía de análisis de vswr (relación de onda estacionaria de voltaje) en qucsstudio.* https://denki-sim.blog/es/vswr_es/.

Arnold, S. (2013). *Getting started in radio astronomy.* https://pt.everand.com/book/576613086/Getting-Started-in-Radio-Astronomy-Beginner-Projects-for-the-Amateur.

Balanis, C. A. (2005). *Antenna theory: Analysis and design* (3rd ed.). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

BBC News Mundo. (2019). Así es la primera foto de un agujero negro. *BBC News Mundo*. Descargado de https://www.bbc.com/mundo/noticias-47880446

Boya.L. (1993). La predicción de la radiación cósmica de fondo. *Dialnet*. Descargado de file:///C:/Users/valro/Downloads/Dialnet-LaPrediccionDeLaRadiacionCosmicaDeFondo-62120.pdf

Bustamante, N. (2020). *En busca del cielo más silencioso de colombia.* https://www.eltiempo.com/vida/ciencia/radioastronomia-investigadores-buscaron-el-cielo-mejor-lugar-para-un-observatorio-en-colombia-525566. (El Tiempo)

Carreras, C., Yuste, M., y Sánchez, J. P. (2007). *La importancia del trabajo experimental en física: un ejemplo para distintos niveles de enseñanza.* Descargado de https://www.researchgate.net/publication/228613225_La_importancia_del_trabajo_experimental_en_fisica_un_ejemplo_para_distintos_niveles_de_ensenanza (ResearchGate; fuente desconocida)

CESAR's Booklet. (s.f.). *El espectro electromagnético cesar's booklet.* https://cesar.esa.int/upload/201807/espectro_electromagntico_booklet.pdf.

Cristino, R. (2020). *Protótipo de um sistema de predição de tempestades solares.* Descargado de https://www.comp.uems.br/~ricardo/PFCs/PFC%20214.pdf (Tesis)

ElProCus. (2013). *Wire antenna: Design, working, types, advantages & its uses.* https://www.elprocus.com/wire-antenna/.

Espinoza, G. (2023). *Astronautas en la luna: el efecto de la radiación solar.* Descargado de https://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=1256

European Space Agency (ESA). (2012). *Cosmic microwave background (cmb) radiation.* Descargado de https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Cosmic_Microwave_Background_CMB_radiation

Fontal, B. (2005). *El espectro electromagnético y sus aplicaciones.* http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/16746/espectro_electromagnetico.pdf.

Galvis, H. D., Quintero, E. A., y Cardona, L. F. (2016). Desarrollo de una antena tipo loop magnética para la detección de radio-ondas jovianas a 20.1 mhz. *TECCIENCIA*, *11*(20), 44. Descargado de https://doi.org/10.18180/tecciencia.2016.20.6 doi: 10.18180/tecciencia.2016.20.6

García, A., y Moreno, Y. (2020). *La experimentación en las ciencias naturales y su importancia en la formación de los estudiantes de básica primaria.* Descargado de file:///C:/Users/valro/Downloads/redaca,+Revista+Biograf%C3%ADa+24+12-05-21-mobile-148-158.pdf

Godoy, J. P. (2016). *Un nuevo capítulo en la expansión del universo.* Descargado de https://astronomia.com.ar/un-nuevo-capitulo-en-la-expansion-del-universo/

Guevara, J. (2017). *Design and development of a solar radio interferometer of two elements.* Descargado de https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/60788 (Tesis)

Katzkowicz, R., y Salgado, C. (2006). *Construyendo ciudadanía a través de la educación científica.* UNESCO Oficina Regional de Educación para América Latina y el Caribe y Fundación YPF. (Disponible en: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000159537)

Kraus, J. D. (1950). *Antennas.* New York, Toronto, London: McGraw-Hill Book Company.

Kraus, J. D. (1997). *Antennas* (2nd ed.). New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited. (Sixth reprint 2001. Originally published by McGraw-Hill, Inc., New York. Includes index. Part of the McGraw-Hill series in electrical engineering.)

LinkedIn. (2025). *Fundación cydonia.* https://www.linkedin.com/company/fundaci%C3%B3n-cydonia/?originalSubdomain=co.

Lopez, S. (2017). *El hidrógeno en el universo (i): La emisión del hidrógeno neutro a 21 cm.* Descargado de https://culturacientifica.com/2017/01/20/hidrogeno-universo-i-la-emision-del-hidrogeno-neutro-21-cm/

Moebs, W., Ling, S. J., y Sanny, J. (2021a). *16.2 ondas electromagnéticas planas - física universitaria volumen 2.* OpenStax. Descargado de https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-2/pages/16-2-ondas-electromagneticas-planas#:~:text=La%20corriente%2C%20que%20cambia%20continuamente,se%20propagan%20como%20ondas%20electromagn%C3%A9ticas

Moebs, W., Ling, S. J., y Sanny, J. (2021b). *16.2 ondas electromagnéticas planas - física universitaria volumen 2.* https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-2/pages/16-2-ondas-electromagneticas-planas.

Moebs, W., Ling, S. J., y Sanny, J. (2021c). *8.1 condensadores y capacitancia - física universitaria volumen 2.* OpenStax. Descargado de https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-2/pages/8-1-condensadores-y-capacitancia

NASA. (2022). *Nasa's radio jove project: Home page.* Descargado de https://radiojove.gsfc.nasa.gov/

Observatorio Astronómico UTP. (2024). *Radioastronomía.* https://observatorioastronomico.utp.edu.co/radioastronomia/.

Pansza, M., y Morán, P. (2006). *Instrumentación didáctica en la formación de profesores de física.* Descargado de http://online.aliat.edu.mx/adistancia/ModDisenoYDesarrollo/U2/lecturas/Instrumentacion_didactica.pdf

Parra, S. (2023). *Tormenta solar de diciembre: ¿por qué ocurre y cómo afecta?* Descargado de https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/tormenta-solar-como-afecta-como-prepararse-diciembre_19818

Pellejero Ibáñez, I. (2010). *RIESGOS DERIVADOS DEL CLIMA ESPACIAL.* Descargado de https://www.proteccioncivil.es/catalogo/naturales/climaespacial/jt_clima%20espacial%201/info/REMER%20-%20Riesgos%20derivados%20del%20clima%20espacial%20v2.pdf

Pinzón Peñaloza, J., y Cabrera Bernal, J. C. (2023). *Construcción de un radiotelescopio pequeño para la exploración solar en centros de interés.* Descargado de http://repositorio.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/18813 (Tesis)

Pocoví, M. C., y Hoyos, E. (2011). Corriente de desplazamiento: su presentación en textos y su comprensión por parte de los estudiantes. *Enseñanza de las Ciencias*, *29*(2), 275-288. Descargado de https://www.raco.cat/index.php/Ensenanza/article/download/243838/353441

Popovic, B. D., y Dragovic, M. B. (1982). *Analysis and synthesis of wire-antennas.* Research Studies Press. Descargado de file:///C:/Users/valro/Downloads/B.D.%20Popovic,%20M.B.%20Dragovic,%20A.R.%20Djordjevic%20-%20Analysis%20and%20Synthesis%20of%

20Wire%20Antennas%20(Electronic%20&%20Electrical%20Engineering%20Research%20Studies)-John%20Wiley%20&%20Sons%20Ltd%20(1982).pdf

Pérez, T. M. (2017). Jansky y el nacimiento de la radioastronomía. *Información y Actualidad Astronómica*. Descargado de https://revista.iaa.es/content/janksky-y-el-nacimiento-de-la-radioastronom%C3%ADa

Rojas, J. C. (2018). *Colombia quiere empezar a escuchar el universo.* https://www.eltiempo.com/vida/ciencia/proyecto-de-recuperacion-de-antenas-para-impulsar-la-radioastronomia-208012. (El Tiempo)

Rosas, L. J. C. (2012). *Polarization of an electromagnetic wave.* Wolfram Demonstrations Project. Descargado de https://demonstrations.wolfram.com/PolarizationOfAnElectromagneticWave/

Secretaría de Extensión de la Universidad Nacional de La Plata. (2017). *Facultad de ciencias astronómicas y geofísicas.* https://fcaglp.fcaglp.unlp.edu.ar/~extension/concurso-guias-2018/ABC_Astronomia.pdf.

Segura López, A., Carlos, J., Ayala, C., y De Física, D. (2015). *El concepto de onda electromagnética y su medio de propagación a partir de la teoría de maxwell y los trabajos de hertz.* http://repositorio.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/2141/TE-17815.pdf?sequence=1&isAllowed=y. (Trabajo de grado presentado para optar al título de licenciada en física)

Sky Pipe Documentación. (2015). *Sky pipe documentación.* SlideShare. Descargado de https://pt.slideshare.net/MirarAlCieloPrepa9/sky-pipe-documentacin

Solar-Terrestrial centre of excellence. (2016). *Sc24 and the noaa-scales.* Descargado de https://www.stce.be/news/366/welcome.html

Space Weather Prediction Center. (2025). *Noaa space weather scales.* Descargado de https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation#:~:text=G%203,be%20needed%20for%20orientation%20problems

StudySmarter. (2019). *Onda monocromática: Física, Óptica | studysmarter.* Descargado de https://www.studysmarter.es/resumenes/fisica/electromagnetismo/onda-monocromatica/

Stutzman, W. L., y Thiele, G. A. (2005). *Antenna theory and design* (3rd ed.). http://ael.chungbuk.ac.kr/lectures/graduate/antenna-engineering/stutzman-antenna-theory-and-design-3rd-edition.pdf. John Wiley & Sons.

Sámano, G. (2019). Instrumentalismo y la teoría electromagnética de maxwell. *Open Insight*, *11*(21), 135-159. Descargado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24062020000100007#:~:text=La%20teor%C3%ADa%20electromagn%C3%A9tica%20de%20James,sorprendente%20confirmaci%C3%B3n%20de%20la%20teor%C3%ADa.

Toledano Díaz, M. (2020). *Polarización de ondas electromagnéticas.* Descargado de https://fisicotronica.com/polarizacion-de-ondas-electromagneticas/

Tutorialspoint. (2025a). *Antenna theory radiation pattern.* https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_radiation_pattern.htm.

Tutorialspoint. (2025b). *Loop antenna theory - understanding key concepts.* https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_loop.htm.