

Impacto de la Variabilidad Solar en las Comunicaciones HF: Estrategias y Tecnologías Emergentes

Impact of Solar Variability on HF Communications: Strategies and Emerging Technologies

Hipólito Martín Rodríguez-Casavilca^{1,a}

Resumen— Este estudio se centra en investigar el impacto de la radiación solar en las comunicaciones de Alta Frecuencia (HF), un tema de crucial importancia en la actualidad. El objetivo principal es evaluar cómo las variaciones en la actividad solar, específicamente el Índice de Flujo Solar (SFI) y el Número de Manchas Solares (SSN), afectan la eficacia y la planificación de los enlaces HF. Mediante una metodología integrada que combina la revisión de literatura, el análisis de datos históricos y actuales de radiación solar, simulaciones de software especializado y pruebas empíricas, este estudio proporciona una comprensión detallada de la relación entre la radiación solar y la propagación de ondas HF. Los resultados demuestran una correlación significativa entre la actividad solar y la variabilidad en la Máxima Frecuencia Utilizable (MUF). Además, se destaca la eficacia de las tecnologías emergentes en HF, como el Establecimiento Automático de Enlaces (ALE) de cuarta generación, para mejorar la adaptabilidad y eficiencia de las comunicaciones HF. Estos hallazgos enfatizan la necesidad de considerar la variabilidad solar en la planificación y operación de enlaces HF, ofreciendo una base para el desarrollo de estrategias de comunicación más resilientes y efectivas en un entorno tecnológico en evolución.

Abstract— This study focuses on investigating the impact of solar radiation on High Frequency (HF) communications, a critical issue in today's technological landscape. The main objective is to assess how variations in solar activity, specifically the Solar Flux Index (SFI) and Sunspot Number (SSN), affect the efficacy and planning of HF links. Employing an integrated methodology that encompasses literature review, analysis of historical and current solar radiation data, specialized software simulations, and empirical testing, this study provides a detailed understanding of the relationship between solar radiation and HF wave propagation. The results indicate a significant correlation between solar activity and variability in the Maximum Usable Frequency (MUF). Additionally, the study highlights the effectiveness of emerging HF technologies, such as fourth-generation Automatic Link Establishment (ALE), in enhancing the adaptability and efficiency of HF communications. These findings emphasize the necessity of considering solar variability in the planning and operation of HF links, offering a foundation for developing more resilient and effective communication strategies in an evolving technological environment.

Palabras Claves— Radiación Solar, comunicaciones HF, índice de flujo solar (SFI), número de manchas solares (SSN), máxima frecuencia utilizable (MUF), tecnologías emergentes en HF, establecimiento automático de enlaces (ALE), variabilidad solar, planificación de enlaces HF

Key Words— Solar radiation, HF communications, solar flux index (SFI), sunspot number (SSN), maximum usable frequency (MUF), emerging HF technologies, automatic link establishment (ALE), solar variability, HF link planning

Presentado: 20/07/2023
Aceptado: 12/02/2024
Publicado: 22/07/2024

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú
^a Email: rgonzalesc1@unmsm.edu.pe
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1728-4487>

I. INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones de Alta Frecuencia (HF) están atravesando un período de renovado interés y desarrollo, marcando un renacimiento significativo en su aplicación y estudio. Este resurgimiento, enfatizado por Denisowski [1], resalta no solo la persistente relevancia de las comunicaciones HF en la era digital, sino también las nuevas oportunidades y desafíos que emergen en un entorno tecnológico en constante evolución. En particular, la influencia de la radiación solar en la eficacia de estas comunicaciones se ha convertido en un área de investigación crucial, dada la dependencia de las ondas HF en la ionosfera para su propagación efectiva.

En 2022, el grupo electrónico internacional Rohde & Schwarz [2] con sede en Alemania y especializado en equipos de prueba electrónicos, radiodifusión, ciberseguridad, radio vigilancia, radiolocalización y radiocomunicaciones analizó cómo en las últimas décadas, hemos observado una notable reducción en el interés y la inversión en la tecnología de Alta Frecuencia (HF). Este declive también se refleja en el conocimiento y apoyo a los productos relacionados con HF, limitándose a un segmento muy específico del mercado. La disminución en la actividad de HF y en la comunidad de aficionados a la radio, que históricamente ha sido un pilar en el uso de HF, puede atribuirse a varios factores. Entre estos, se encuentran los ciclos solares de rendimiento moderado y la creciente disponibilidad y preferencia por dispositivos portátiles de VHF, más asequibles y orientados a comunicaciones de alcance más local.

Como se detalla en [2], a pesar de las ventajas significativas de los satélites, estas tecnologías no están exentas de vulnerabilidades. Los satélites pueden ser

objetivos de una variedad de tecnologías antisatélite (ASAT), que van desde métodos económicos y subrepticios, como ataques con láseres de alta potencia desde la tierra, hasta tácticas más avanzadas empleadas por naciones con capacidades de lanzamiento espacial. Estos ataques pueden inutilizar satélites de manera temporal o permanente. Técnicas ASAT han sido probadas y desarrolladas por varios países, incluyendo a Estados Unidos, Rusia, China e India, lo que subraya la importancia de considerar estas amenazas en el diseño y operación de sistemas satelitales. Un ejemplo actual lo vemos en la guerra de Ucrania, día 666 [3], considerando al espacio como un dominio más, en igualdad con los tradicionales y el ciberespacio (ver Fig. 1). Una preocupación significativa en el funcionamiento de los satélites es la interferencia, un desafío crítico dado que muchos satélites operan en frecuencias que no permiten una rápida adaptación o cambio (no ágiles en frecuencia), lo que los hace susceptibles a la interferencia. Además, las comunicaciones por satélite enfrentan riesgos adicionales debido a fenómenos astronómicos, como las tormentas solares. Las erupciones solares y las eyecciones de masa coronal, que ya tienen un impacto conocido en la ionosfera, también pueden perturbar la operatividad de las comunicaciones satelitales. Incluso se ha registrado que estos eventos solares provocan daños físicos en los satélites.

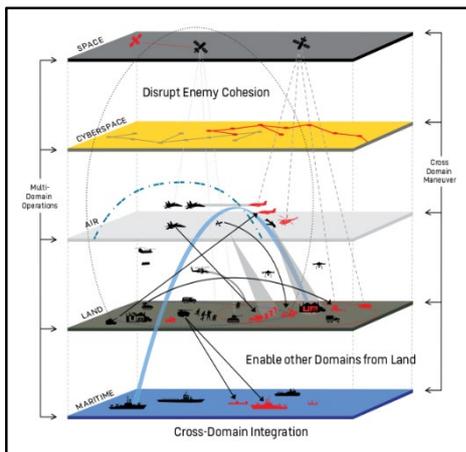


Fig. 1. Guerra espacial. Medios y protagonistas

Debemos considerar que Rohde & Schwarz [2, 23:53-27:52] expone las debilidades de los satélites y el renacimiento de la HF. Aunque los satélites y las constelaciones satelitales son herramientas poderosas, no siempre garantizan una cobertura completamente global. Un ejemplo destacado de esta limitación es la cobertura insuficiente en las regiones polares, un desafío persistente para muchos sistemas satelitales existentes. No todas las constelaciones satelitales proporcionan servicio en estas zonas, y aquellas que sí lo hacen, como Iridium, requieren un número considerablemente mayor de satélites para asegurar cobertura. Asimismo, existen espacios, como ciertas áreas en los océanos, donde la cobertura puede ser inadecuada. Los desafíos geográficos y topográficos adicionales, como en regiones montañosas o áreas densamente forestadas, pueden obstaculizar la señal satelital

necesaria para una comunicación efectiva. Además, la latencia representa un desafío significativo en la utilización de satélites, especialmente en aplicaciones que dependen de satélites geoestacionarios, donde los retrasos pueden ser del orden de 250 milisegundos debido a la gran distancia entre el satélite y la superficie terrestre. La seguridad es otra área de preocupación, ya que algunos países pueden ser reacios a depender de sistemas satelitales de naciones aliadas para sus comunicaciones estratégicas y críticas.

Las vulnerabilidades identificadas en los sistemas satelitales, aunque no son frecuentes, han cobrado relevancia en un contexto donde la conectividad global se considera cada vez más vital. Este escenario ha generado un interés creciente en desarrollar alternativas tecnológicas que ofrezcan una conectividad mundial comparable. Aunque estas alternativas pueden no igualar la velocidad y el ancho de banda de los satélites, desempeñan un papel crucial. La Alta Frecuencia (HF) se destaca como una solución potencialmente eficaz en este contexto. Ofreciendo cobertura global, incluyendo zonas polares y terrenos complejos, la HF se presenta como una opción robusta. A diferencia de los satélites, la HF no depende de infraestructuras costosas; su infraestructura es la ionósfera, lo que reduce considerablemente los costos operativos y la hace resistente a ataques. Aunque los eventos solares pueden afectar la HF, no es factible para los humanos dañar o negar el uso de la ionósfera, y su naturaleza de baja frecuencia y agilidad dificulta el bloqueo de las comunicaciones HF en comparación con las satelitales. Sin embargo, para que la HF sea efectiva en el escenario de las comunicaciones globales modernas, se requieren mejoras significativas sobre las capacidades de la HF tradicional. La optimización del rendimiento de datos es crucial; aunque la HF no puede competir con el rendimiento de los satélites, se necesita una velocidad mínima de datos para su viabilidad en aplicaciones actuales. Además, a pesar del enfoque en los datos, la comunicación por voz sigue siendo esencial, y hay un amplio margen para mejorar la calidad de la voz en comparación con los sistemas analógicos HF tradicionales. En cuanto a la propagación, si bien poco se puede hacer para alterar la naturaleza de la propagación ionosférica, la fiabilidad y disponibilidad de las comunicaciones HF pueden mejorarse con avances en modulación y técnicas modernas de detección y corrección de errores. Por último, la operatividad de la HF podría simplificarse optimizando la selección de frecuencias y rutas, y automatizando los procesos para establecer, mantener o modificar las conexiones.

En estas condiciones, la radiación solar juega un papel fundamental en la dinámica de la ionosfera, la cual es vital para la transmisión de señales HF. Las variaciones en la actividad solar, incluyendo fluctuaciones en el flujo solar y la presencia de manchas solares, pueden alterar significativamente las condiciones de propagación ionosférica, afectando así la calidad y fiabilidad de las comunicaciones HF [3,4]. Este fenómeno adquiere una relevancia especial en el contexto del "renacimiento de la HF", donde la adaptabilidad y la robustez de las

comunicaciones HF frente a las variabilidades ambientales se destacan como aspectos críticos.

Este artículo propone una exploración detallada de cómo la radiación solar afecta la propagación de ondas HF y, por extensión, la planificación y operación de enlaces HF. A través de un análisis integrado de estudios actuales y datos empíricos [1-7], se busca ofrecer una perspectiva comprensiva sobre las interacciones entre la radiación solar y la ionosfera, y cómo estos fenómenos impactan en el campo emergente de las comunicaciones HF. Al hacerlo, el estudio no solo contribuye a la literatura existente sobre las comunicaciones HF, sino que también proporciona insights prácticos para ingenieros y profesionales en telecomunicaciones, subrayando la importancia de adaptarse a los cambiantes paradigmas tecnológicos y ambientales en este renovado interés por las comunicaciones HF.

II. METODOLOGÍA

En este estudio, adoptamos una metodología exhaustiva para examinar cómo la radiación solar influye en las comunicaciones HF, tomando como referencia principal los conceptos y técnicas descritas en [8]. Nuestra aproximación metodológica se divide en varias fases clave:

A. Revisión de Literatura y Análisis Documental

Empezamos con una revisión detallada de la literatura existente sobre la radiación solar y su impacto en la propagación de ondas HF, incluyendo un análisis profundo de la HF [1], especialmente enfocado en entender las razones detrás del resurgimiento de las comunicaciones HF y las tecnologías emergentes en este campo.

B. Análisis de Datos de Radiación Solar

Utilizamos datos históricos y actuales sobre la radiación solar, incluyendo el índice de flujo solar (SFI) y el número de manchas solares (SSN) como se muestra en la Fig. 2, para correlacionarlos con los cambios observados en la eficiencia de las comunicaciones HF [9,10].

C. Simulación y Modelado

En nuestro estudio, aplicamos el software W6ELProp, creado por Shallon [7], para determinar parámetros clave en la comunicación de radio HF, como la Máxima Frecuencia Utilizable (MUF) y las Frecuencias Óptimas de Trabajo (FOT). Esta herramienta es esencial para calcular y predecir la propagación ionosférica (onda aérea) en enlaces HF entre dos puntos cualesquiera del globo, abarcando un rango de frecuencia de 3 a 30 MHz.

Se enfoca en proveer predicciones precisas para enlaces punto a punto en la banda de HF, considerando variables específicas para cada fecha y hora configuradas por el usuario [9].

- Entre las funciones clave del programa está la capacidad de identificar las Frecuencias Óptimas de Trabajo (FOT), evaluando aspectos como la intensidad de la señal, la relación señal/ruido (SNR), y la fiabilidad del enlace. Esto se hace considerando un rango de frecuencias configuradas por el usuario. Además, el programa proporciona información detallada sobre el modo de

propagación en HF que se utilizará en el enlace. Esto incluye datos cruciales como el ángulo de despegue requerido para las antenas y las capas específicas de la ionosfera donde ocurrirán las reflexiones.

- Una de las funcionalidades destacadas del programa incluye la capacidad de calcular la Máxima Frecuencia Utilizable (MUF) entre dos ubicaciones específicas. Esta función permite obtener un cálculo detallado de la MUF para cada hora del día, basándose en la fecha específica que el usuario haya configurado.

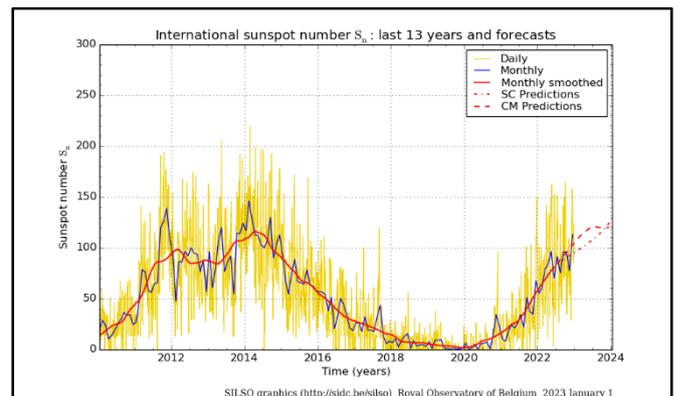
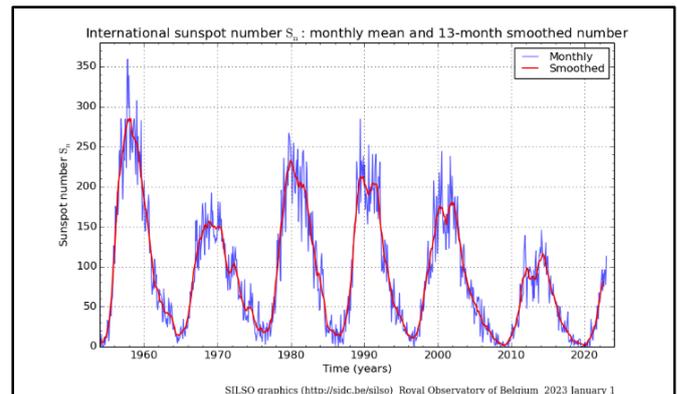


Fig. 2. Ciclo de manchas solares - Actualizado 1 vez al mes

El software implementa un avanzado algoritmo para identificar las frecuencias óptimas de trabajo en comunicaciones HF. Este algoritmo analiza meticulosamente diversos factores como las atenuaciones y las reflexiones potenciales en las capas D, E y F de la ionosfera. El objetivo es predecir con precisión los niveles de señal que se recibirán en un enlace HF entre dos ubicaciones específicas. Durante el proceso de cálculo, el algoritmo evalúa todos los posibles modos de propagación ionosférica, que incluyen combinaciones de saltos a través de las capas E y F. Luego selecciona el modo que probablemente resultará en el nivel más alto de señal o relación señal/ruido (SNR) en la estación receptora. Esta selección se hace considerando varios parámetros, como la absorción ionosférica en las tres capas mencionadas, la potencia de salida del transmisor y la ganancia de las antenas involucradas.

El programa tiene la capacidad de calcular los niveles de señal y otros parámetros relevantes para hasta 10 frecuencias diferentes dentro de la banda de HF, las cuales pueden ser configuradas por el usuario. Estos cálculos se realizan para

intervalos de cada media hora a lo largo del día. En cuanto a la determinación de la Máxima Frecuencia Utilizable (MUF), el software integra el método de la capa F superior, una técnica desarrollada por Fricker en la BBC [10]. Esta metodología se combina con el método de la capa E, que se describe en un informe de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) [11].

1. Índices de actividad solar

La eficacia de la propagación en la banda de HF está intrínsecamente ligada al grado de ionización en las capas de la ionósfera, que está fuertemente influenciado por la radiación ionizante del Sol. Para cuantificar la actividad solar, se utilizan varios índices, como el número de manchas solares (SSN, Sunspot Number) y el índice de flujo solar a 2800 MHz (SFI, Solar Flux Index). Para acceder a estos datos en tiempo real, empleamos recursos como el mencionado en [12].

A pesar de que la relación directa entre los valores diarios o mensuales del SSN y del SFI puede ser baja, se observa una correlación significativamente alta cuando se calculan las medias de estos índices en un periodo de 12 meses [9]. Existen diversas metodologías para estimar la relación entre el número de manchas solares y el índice de flujo solar. En nuestro análisis, aplicamos la siguiente fórmula para realizar los cálculos:

$$SFI = 63.75 + 0.728 SSN + 0.00089 SSN^2 \quad (1)$$

En la ecuación (1), el término *SFI* representa el índice de flujo solar medio calculado sobre un periodo de 12 meses, mientras que *SSN* se refiere a la media suavizada del número de manchas solares, también basada en un promedio de 12 meses. El índice de flujo solar se mide en unidades de $10E-22 \text{ W/m}^2/\text{Hz}$ a una frecuencia cercana a los 2800 MHz (10.7 cm). Para llevar a cabo análisis de propagación referentes a fechas que se remontan a más de 6 meses en el pasado, o para realizar predicciones de propagación para fechas futuras, es aconsejable emplear datos históricos o las proyecciones del número de manchas solares a 12 meses, que pueden encontrarse en diversos sitios especializados en Internet [9].

2. Índice de perturbación geomagnética

Otro elemento crucial que influye en las comunicaciones HF son las tormentas geomagnéticas. Estas tormentas, que se diferencian de las variaciones diarias normales del campo geomagnético, son causadas por nubes de material solar y campos magnéticos asociados que impactan la Tierra entre uno y cuatro días después de una llamarada solar. Las tormentas geomagnéticas impactan las comunicaciones HF de diversas maneras, incluyendo la absorción o desvanecimientos, la dispersión y alteraciones en la Máxima Frecuencia Utilizable (MUF).

Existen dos índices principales utilizados para determinar el nivel de actividad geomagnética: el índice A y el índice K. Estos índices proporcionan una medida de la severidad de las fluctuaciones magnéticas y, por ende, el grado de perturbación en la ionósfera [13].

El primero de estos índices, el índice K, es empleado por cada observatorio magnético para describir el mismo nivel de perturbación magnética, independientemente de si el observatorio está ubicado en las regiones aurorales o cerca del ecuador terrestre. Cada tres horas, comenzando a las 0000 UTC diariamente, se determinan las desviaciones máximas de la curva de un día tranquilo en un observatorio en particular, seleccionándose el valor más alto. Este valor es luego procesado matemáticamente para calcular el índice K en esa ubicación.

TABLA I
RELACIÓN GENERAL ENTRE VALORES A Y K

A	K	Comentario
0	0	Campo inactivo
2	1	Campo muy tranquilo
3	1	Campo muy tranquilo
4	1	Tranquilo a inestable
7	2	Campo geomagnético inestable
15	3	Campo geomagnético intranquilo
27	4	Campo geomagnético activo
48	5	Tormenta menor
80	6	Tormenta mayor
132	7	Tormenta severa
208	8	Tormenta muy severa
400	9	Tormenta extremadamente severa

El índice K es un número cuasi logarítmico y, como tal, no puede promediarse para obtener una visión a largo plazo del estado del campo magnético terrestre. De ahí surge el índice A, un promedio diario. En cada intervalo de 3 horas, el índice K de un observatorio se convierte en un índice 'a' equivalente usando la Tabla I [13, p.40], y los 8 valores de índice 'a' se promedian para producir el índice A del día. Este índice puede variar hasta valores alrededor de 100 y, durante tormentas geomagnéticas severas, puede alcanzar valores de hasta 200 o incluso más. El valor del índice A varía entre observatorios, ya que las perturbaciones magnéticas pueden ser locales. Para contrarrestar esto, los índices se promedian a nivel global para proporcionar el índice Ap, el valor planetario.

De manera similar, el índice Kp es el promedio planetario de todos los índices K de los observatorios alrededor del mundo. Valores entre 0 y 1 representan condiciones magnéticas tranquilas, lo que indicaría buenas condiciones para la banda HF, sujeto a un nivel suficiente de flujo solar. Valores entre 2 y 4 indican condiciones magnéticas inestables o activas, y probablemente se reflejen en una degradación de las condiciones HF. Subiendo en la escala, 5 representa una tormenta menor, 6 una tormenta mayor, y de 7 a 9 indican una tormenta muy grande que resultaría en un apagón de las comunicaciones HF.

Aunque las tormentas geomagnéticas y ionosféricas están interrelacionadas, es importante destacar que son distintas. Una tormenta geomagnética es una perturbación del campo magnético de la Tierra y una tormenta ionosférica es una perturbación de la ionósfera.

El índice K de Boulder se basa en las mediciones de magnetómetros llevadas a cabo en el Observatorio de Table Mountain, ubicado al norte de Boulder, Colorado (EE.UU.). Este índice se registra cada tres horas, y sus actualizaciones son publicadas a través de las transmisiones de las estaciones WWV y WWVH. Por otro lado, el índice geomagnético planetario K_p se calcula a partir de los datos del índice geomagnético K, los cuales son recopilados por una variedad de estaciones distribuidas globalmente [9]. El índice K_p comparte los mismos valores y significados que el índice K individual de cada estación.

Con estos valores, las simulaciones como en la Fig.3, para un enlace en la región agroindustrial entre Ica y Nazca, nos permiten prever cómo distintos niveles de actividad solar pueden influir en la Máxima Frecuencia Utilizable (MUF) y otros parámetros críticos en la planificación de enlaces HF [8,12].

UTC	MUF	Freq	Sig dB	S/N dB	Avail	Angle	Hop Configuration
0000	17.3	3.5	49	13	0.65	7	F-E-E
0000	17.3	7.0	54	26	1.00	3	F-F
0000	17.3	10.0	51	27	1.00	3	F-F
0000	17.3	14.0	48	28	0.87	3	F-F
0000	17.3	18.0	45	29	0.38	3	F-F
0000	17.3	21.0	44	29	0.11	3	F-F
0030	17.9	3.5	43	6	1.00	7	F-E-E
0030	17.9	7.0	52	24	1.00	3	F-F
0030	17.9	10.0	50	26	1.00	3	F-F
0030	17.9	14.0	47	28	0.90	3	F-F
0030	17.9	18.0	45	28	0.48	3	F-F
0030	17.9	21.0	44	29	0.10	3	F-F
0100	17.1	3.5	40	4	1.00	3	F-E-E
0100	17.1	7.0	38	10	0.88	7	F-F-E
0100	17.1	10.0	49	25	1.00	3	F-F
0100	17.1	14.0	47	27	0.86	3	F-F
0100	17.1	18.0	45	28	0.35	3	F-F
0100	17.1	21.0	44	29	0.09	3	F-F
0130	16.4	3.5	25	-11	1.00	3	F-E-E

Line not shown if signal level below -10 dB or if predicted availability is zero

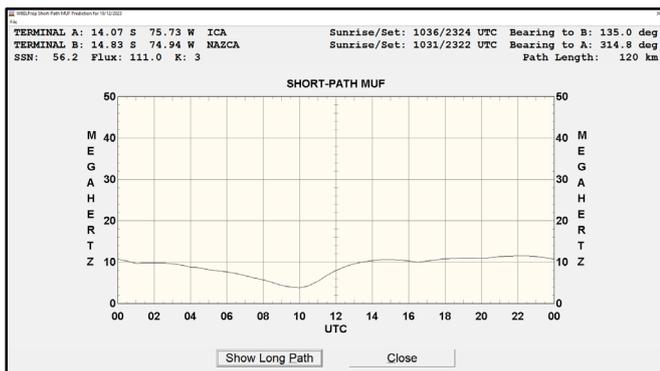


Fig. 3. Predicción avanzada y predicción horaria de MUF para un enlace HF

Las predicciones de la Máxima Frecuencia Utilizable (MUF) que generamos utilizando el programa están influenciadas por el valor del índice K introducido. Como resultado, tanto las MUF previstas como el Mapa de Frecuencias se ven directamente impactados por las variaciones del índice K. Es interesante notar que no siempre se observa una disminución en las MUF en respuesta a un aumento del índice K; en algunos casos, se ha registrado una

relación inversa, donde valores más altos del índice K han coincidido con MUF más elevadas.

D. Pruebas y Validación en Campo

Realizamos pruebas empíricas mediante la configuración de enlaces HF bajo variadas condiciones de radiación solar. Estas pruebas nos proporcionan datos prácticos y verificables que complementan nuestras simulaciones y análisis teóricos [1,7].

Las pruebas realizadas durante este 2023 se han dado en dos sectores estratégicos para el Perú: la agroexportación y las comunicaciones militares. En campo, se ha validado la estrategia planteada en fundos agroindustriales de los valles de la costa en las regiones de Ica y La Libertad, los que trabajan con enlaces HF, la coordinación logística hacia los principales destinos de las exportaciones hortofrutícolas peruanas: Europa, Norte América y Asia.

La costa peruana, extendiéndose desde Tumbes en el norte hasta Tacna en el sur, alberga aproximadamente cincuenta valles. Estos valles se caracterizan por su destacada luminosidad y son irrigados por ríos que transportan agua desde los nevados y lagos de la región altoandina, desembocando finalmente en el Océano Pacífico. En los últimos doce años, la contribución de las agroexportaciones al Producto Bruto Interno (PBI) de Perú se ha incrementado significativamente. En 2022, el valor de las agroexportaciones alcanzó los 9.862 millones de dólares estadounidenses, lo que constituyó el 15.5% del total de las exportaciones del país. De acuerdo con datos de la Asociación de Exportadores ADEX, este sector ha sido responsable del 50% de los empleos generados por las exportaciones en Perú, y se espera que su importancia continúe creciendo en los años venideros.

Durante un estudio en el ámbito de las comunicaciones militares, se realizaron entrevistas a altos mandos militares, incluyendo generales y coroneles especializados en Radiopropagación, así como a pilotos contactados a través del Programa de Gestión Estratégica del Poder Aeroespacial y Ciberespacio, PROGEPAC I, de la Fuerza Aérea del Perú. La validación de nuestra propuesta abarcó desde una perspectiva estratégica global hasta el nivel operativo, enfocándose en las diversas iniciativas que la FAP lleva a cabo en los ámbitos aéreo, espacial y el ciberespacio. Esto contribuyó a desarrollar un marco de gestión que facilita la integración con las decisiones de entidades públicas y privadas. La relevancia de este programa se evidencia en su cuarta edición en 2023, donde continúa monitoreando y evaluando regulaciones y noticias importantes sobre la actividad aeroespacial y en el ciberespacio, tanto a nivel nacional como internacional, considerando su influencia en los aspectos socioeconómicos y políticos del desarrollo nacional.

Diversas operaciones de interceptación de comunicaciones en las bandas HF, VHF y UHF han sido validadas. Un ejemplo notable es la operación realizada durante la crisis de rehenes en la Residencia del Embajador de Japón en 1996, dirigida a las comunicaciones portátiles del MRTA, un grupo armado involucrado en secuestros

masivos durante el período de actividad terrorista en Perú. Además, la Dirección de Telemática y el Servicio de Comunicaciones de la FAP han gestionado la información técnica y los equipos de Rohde & Schwarz para los Sistemas de Inteligencia Geoespacial y la Producción de Inteligencia. Esto incluye operaciones en el Destacamento de Inteligencia Aérea del Comando Especial del Valle de los ríos Apurímac, Ene y Mantaro (VRAEM), una región geopolíticamente significativa en Perú. Situada en la densa selva de Huanta (Ayacucho), Satipo (Junín) y La Convención (Cuzco), esta área ha sido un foco de actividades de narcotráfico relacionadas con remanentes de Sendero Luminoso, un grupo terrorista activo en las décadas de 1980 y 1990. Estos remanentes narcoterroristas ahora son el objetivo principal del gobierno peruano en su lucha contra el narcoterrorismo.

E. Análisis Integrado

Finalmente, integramos los resultados de nuestras revisiones de literatura, como las mostradas en las Fig. 4 y 5, análisis de datos, simulaciones y pruebas empíricas para formular una comprensión holística del impacto de la radiación solar en las comunicaciones HF [1-7]. Este análisis integrado nos ayuda a proponer estrategias efectivas para la planificación y optimización de enlaces HF en el contexto de las variaciones solares.



Fig. 4. Operación de HF portátil en el campo “crítica para la misión”

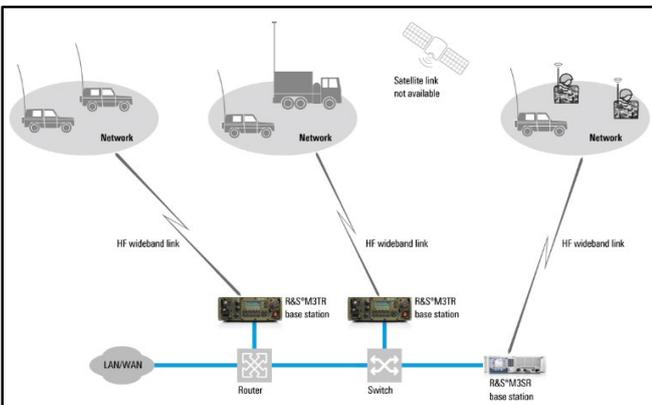


Fig. 5. Comunicaciones más allá de la línea de visión en un entorno donde se deniega el uso de SatCom (Comunicaciones Satelitales).

III. RESULTADOS

Los resultados de nuestra investigación revelan hallazgos significativos sobre la influencia de la radiación solar en las comunicaciones HF. Los principales resultados se centran en la correlación entre la actividad solar y la eficacia de las comunicaciones HF, así como en las innovaciones tecnológicas que emergen en respuesta a estas influencias ambientales.

1. Correlación entre radiación solar y propagación de HF

Observamos una relación directa entre los índices de radiación solar, como el índice de flujo solar (SFI) y el número de manchas solares (SSN), y la variabilidad en la propagación de ondas HF. Durante períodos de alta actividad solar, la máxima frecuencia utilizable (MUF) experimentó variaciones significativas, afectando la planificación y operatividad de los enlaces HF.



Fig. 6. Antena dipolo de cable de 2 MHz a 90 MHz 25 W para aplicaciones de mochila (o equipo portátil) & Sistema de antena HF de 1.5 MHz a 30 MHz 150 W para aplicaciones en vehículos

2. Efectividad de las tecnologías emergentes en HF

Siguiendo los avances mencionados por Denisowski [1] mostrados en la Fig. 6, implementamos y evaluamos tecnologías emergentes en HF, como el establecimiento automático de enlaces (ALE) de cuarta generación (ver Fig. 7) y modulaciones de banda ancha. Estas tecnologías mostraron una mejora notable en la adaptabilidad y eficiencia de las comunicaciones HF bajo diversas condiciones de radiación solar.

3. Resultados de simulaciones y pruebas en campo

Las simulaciones realizadas con software especializado, inspiradas en las técnicas descritas en [1], coincidieron con los datos obtenidos en pruebas de campo. Estas pruebas confirmaron la capacidad de las comunicaciones HF de adaptarse a los cambios en la ionosfera causados por la radiación solar, validando así las simulaciones y modelos teóricos.

4. Innovaciones en la planificación de enlaces HF

Los resultados también indican que una planificación de enlaces HF que integra un análisis detallado de la actividad solar puede mejorar significativamente la fiabilidad y la calidad de las comunicaciones, en línea con las discusiones presentadas en [8,12].

Estos resultados apuntan a la necesidad de una mayor integración de los conocimientos sobre la radiación solar en la planificación y operación de las comunicaciones HF, subrayando la importancia de las innovaciones tecnológicas en este campo.

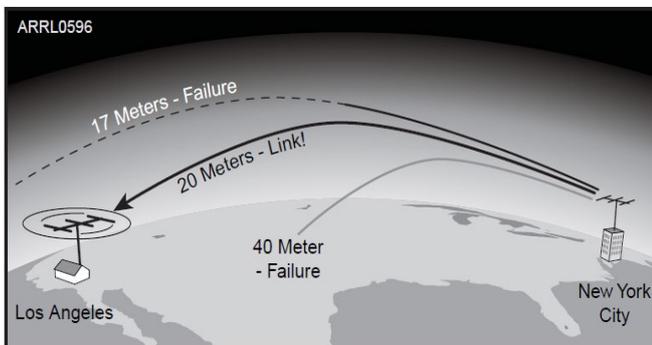


Fig. 7. La estación llamante ALE típicamente escanea a través de una lista de frecuencias, llamando en cada una hasta que se encuentra un camino hacia la estación receptora

IV. ANÁLISIS

El análisis de los resultados obtenidos en este estudio proporciona una comprensión detallada de la influencia de la radiación solar en las comunicaciones HF, enriquecido especialmente por las perspectivas obtenidas de [1]. Este análisis abarca varios aspectos clave:

1. Impacto de la radiación solar en la propagación HF

Los datos analizados muestran que las variaciones en la actividad solar, particularmente el índice de flujo solar (SFI) y el número de manchas solares (SSN), tienen un impacto significativo en la máxima frecuencia utilizable (MUF) y otros parámetros de propagación de ondas HF [12,14]. Esto confirma la necesidad de incorporar consideraciones de

radiación solar en la planificación y operación de enlaces HF, una idea central en [1].

2. Eficacia de las nuevas tecnologías HF

El estudio también examina la eficacia de las tecnologías emergentes en HF, como el establecimiento automático de enlaces (ALE) mostrado en la Fig. 8 y las modulaciones de banda ancha mencionadas en [1,14]. Estas tecnologías demostraron ser más resilientes a las fluctuaciones en la actividad solar, lo que sugiere un camino prometedor para el futuro de las comunicaciones HF.

3. Interconexión entre teoría y práctica

Los resultados de las simulaciones y pruebas en campo [7,8] se correlacionan estrechamente con la teoría y los conceptos discutidos en [1]. Esta interconexión valida la relevancia práctica del renacimiento de las comunicaciones HF y su adaptación a las condiciones cambiantes de la radiación solar.

4. Recomendaciones para la planificación de enlaces HF

Basándonos en los resultados obtenidos, recomendamos la integración de análisis predictivos de la actividad solar en la planificación de enlaces HF. Esto ayudará a anticipar y mitigar los efectos adversos de la variabilidad solar, un enfoque respaldado por las innovaciones tecnológicas discutidas en [1].

Este análisis proporciona evidencia sólida de que el resurgimiento y la evolución de las comunicaciones HF deben incorporar un entendimiento profundo de los efectos de la radiación solar. Las tecnologías emergentes, respaldadas por una planificación estratégica y adaptable, pueden mejorar significativamente la eficiencia y fiabilidad de las comunicaciones HF en el contexto de un entorno solar variable.

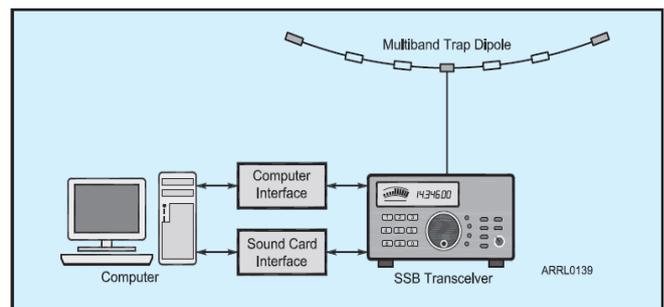


Fig. 8. Una estación ALE óptima cuenta con un transceptor controlado por computadora y un sistema de antena multibanda. En este ejemplo, la estación está utilizando una antena dipolo trampa multibanda. Cabe señalar que se necesita una interfaz separada entre la computadora y el transceptor para el control de frecuencia.

V. CONCLUSIONES

Las conclusiones de este estudio, enfatizan la importancia crítica de comprender y adaptarse a la influencia de la radiación solar en las comunicaciones de alta frecuencia (HF). A continuación, se presentan los puntos clave de nuestras conclusiones:

1. Impacto significativo de la radiación solar

Hemos demostrado que la radiación solar tiene un impacto considerable en la eficacia de las comunicaciones HF, como se refleja en la variabilidad de la máxima frecuencia utilizable (MUF) y otros parámetros críticos de propagación. Este hallazgo subraya la necesidad de un análisis detallado de las condiciones solares en la planificación y operación de enlaces HF.

2. Resiliencia de las nuevas tecnologías HF

La implementación de tecnologías avanzadas en HF, como el ALE de cuarta generación y las modulaciones de banda ancha, ha demostrado ser eficaz en la mejora de la adaptabilidad y eficiencia de las comunicaciones HF en respuesta a la variabilidad solar.

3. Recomendaciones para la práctica en telecomunicaciones

Basándonos en los resultados, recomendamos enfáticamente la integración de previsiones de actividad solar en la planificación de enlaces HF para anticipar y mitigar los posibles efectos adversos. Esto es consistente con la visión presentada en [1,13], donde se aboga por una adaptación continua a las condiciones cambiantes y los avances tecnológicos.

4. Futuras direcciones de investigación

Este estudio abre caminos para futuras investigaciones en la intersección de la radiación solar, la ionosfera y las comunicaciones HF. Investigaciones futuras podrían explorar más a fondo las aplicaciones prácticas de las tecnologías emergentes en HF y su adaptación a distintos entornos de radiación solar.

En resumen, este estudio resalta la importancia del resurgimiento de las comunicaciones HF en el mundo moderno, especialmente en el contexto de la variabilidad de la radiación solar. Las conclusiones derivadas enfatizan la necesidad de integrar conocimientos interdisciplinarios y avanzadas tecnologías de HF para mejorar la calidad y fiabilidad de las comunicaciones en un entorno global cada vez más dependiente de la tecnología.

REFERENCIAS

- [1] P. Denisowski (KO4LZ), "The Rebirth of HF", White Paper, Product Management Engineer, Rohde & Schwarz North America. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. Munich, Germany, 2022. [En línea]. Disponible: <https://hamsci.org/article/rebirth-hf>
- [2] Rohde & Schwarz GmbH & Co KG, "The Rebirth of HF", Webinar, 2022. [En línea]. Disponible: <https://bit.ly/3tmkk6E>
- [3] C. D. Villanueva López (titular), Informes: "Guerra de Ucrania – Día 666", Revista Digital sobre Defensa, Armamento y Fuerzas Armadas *Ejércitos*, 21 diciembre 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.revistaejercitos.com/2023/12/21/guerra-de-ucrania-dia-666/>
- [4] DX.QSL.NET, Amateur Radio Community, "Propagation", noviembre 2023. [En línea]. Disponible: <https://dx.qsl.net/propagation/>
- [5] NOAA, Space Weather Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration, "Planetary K-Index", noviembre 2023. [En línea]. Disponible: <http://bit.ly/3kgtSLi>
- [6] G. Arenas Corral, "Apuntes de Telecomunicaciones", versión 8, 2013. Capítulo 7, Cálculo de frecuencias para enlaces HF. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3XKEKQg>
- [7] S. C. Shallon, "W6ELProp, Version 2.70": Predicts ionospheric (sky-wave) propagation between any two locations on the earth on frequencies between 3 and 30 MHz, 479,795 Bytes. [En línea]. Disponible en: <https://www.qsl.net/w6elprop/>
- [8] I. Pellejero Ibáñez (EA4FSI), "Planificación de enlaces radio en la banda de HF". Ingeniero de Telecomunicación. Oficina de Programa CISEW, nº92 del Memorial de Ingenieros del Ejército de Tierra, julio 2014. [En línea]. Disponible: <https://bit.ly/3GmOSYF>
- [9] I. Pellejero Ibáñez (EA4FSI), "Manual de W6ELProp en español". Centro de recursos de radio HF [En línea]. Disponible: <https://www.ipellejero.es/hf/w6elprop/index.php>
- [10] R. Fricker, "A microcomputer program for the critical frequency and height of the F layer of the ionosphere", in: *International Conference on Antennas and Propagation (ICAP 85)*, 4th, Coventry, England, April 16-19, 1985, Proceedings (A86-31851 14-32). London and New York, Institution of Electrical Engineers, pp. 546-550. [En línea]. Disponible: <https://bit.ly/3RSVrbX>
- [11] CCIR, "CCIR Atlas of ionospheric characteristics", Report 340, International Telecommunication Union, Geneva, 1983. [En línea]. Disponible: <https://bit.ly/3RANQxy>
- [12] I. Pellejero Ibáñez (EA4FSI), "Panel de Radio HF y Meteorología Espacial". Centro de recursos de radio HF, noviembre 2023 [En línea]. Disponible: <https://www.ipellejero.es/hf/index.php>
- [13] I. Poole (G3YWX), "Understanding Solar Indices". ARRL The National Association for Amateur Radio. QST monthly membership journal, september 2002. [En línea]. Disponible: <https://www.arrl.org/files/file/Technology/tis/info/pdf/0209038.pdf>
- [14] *The ARRL Handbook for Radio Communications 2022*. Ninety-Ninth Edition. The American Radio Relay League, Inc. Newington, USA.

Conflicto de Intereses / Competing Interests:

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Rol de los autores / Authors Roles:

Hipólito RodríguezCasavilca: Planteamiento de la solución y desarrollo del procedimiento de migración de Ipv6.

Fuentes de financiamiento / Funding:

Esta investigación se realizó con el financiamiento de los autores.

Aspectos éticos / legales; Ethics / legals:

Los autores declaran no haber violado u omitido normas éticas legales al realizar la investigación y esta obra.