



Universidad Autónoma
de Entre Ríos

Facultad de Ciencia
y Tecnología

LICENCIATURA EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN

TESINA DE GRADO

**CODIFICACIÓN DE DATOS DE TELEMETRÍA
PARA TRANSMISIÓN POR MEDIO DE
SEÑALES DE RADIO INFERIORES A 30 MHZ**

AUTOR

IGNACIO NICOLAS BEBER

DIRECTOR

INGENIERO JORGE SCHMUKLER

DOCENTES

INGENIERA MÓNICA VERA

LICENCIADA PAMELA ESTEFANIA BONADEO

LICENCIADO DAMIÁN EXEQUIEL CIAN

ABRIL DE 2026

Facultad de Ciencia y Tecnología
Universidad Autónoma de Entre Ríos
Oro Verde, Entre Ríos, República Argentina

DEDICATORIA

Para Verónica y Lorenzo, quienes supieron acompañarme en las ausencias, entendieron el esfuerzo y me sostuvieron con amor en el largo camino hasta esta meta.

Para Jose Antonio, mi padre, la inspiración original de esta carrera, uno de los primeros licenciados en sistemas, cuyo ejemplo me guió hasta aquí.

AGRADECIMIENTOS

Al cerrar esta etapa, quiero agradecer a las personas que hicieron posible esta tesina.

Primero, al Ing. Jorge Schmukler, mi Director, por la guía, la paciencia y el aguante durante todo el proceso. Sin su acompañamiento, este trabajo no hubiera llegado a término.

Al Dr. Joseph H. Taylor (K1JT), radioaficionado, Premio Nobel e inventor del protocolo WSPR, por responder personalmente mis consultas. Que alguien de su trayectoria se tome el tiempo de contestar fue algo que valoro especialmente.

A los docentes de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la UADER, por la formación recibida a lo largo de la carrera.

También al personal de la facultad –directivos, administrativos y maestranza– por el trabajo diario que sostiene la institución.

A mis compañeros de cursada, especialmente a Emanuel, Hernán y Jerónimo, por el compañerismo y por leer y revisar esta tesina en la etapa final. Su mirada crítica ayudó a mejorar el resultado.

A la comunidad radioaficionada, que no solo dio origen al tema de esta tesina, sino que ha sido parte de mi formación técnica y personal.

Y, finalmente, a mi familia. A mi esposa Verónica y a mi hijo Lorenzo, por bancarme en las horas de trabajo y por estar siempre. A mi padre, por haber despertado en mí el interés por esta profesión.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	8
INTRODUCCIÓN	9
OBJETIVOS	11
OBJETIVO GENERAL	11
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
CAPÍTULO 1 – FUNDAMENTOS CONCEPTUALES	12
1.1 – TELEMETRÍA	12
1.2 – SEÑALES DE RADIO	15
1.2.1 – BANDAS DEL ESPECTRO HF	18
1.2.2 – MODULACIÓN DE SEÑALES DE RADIO	20
1.2.3 – PROPAGACIÓN DE SEÑALES DE RADIO	21
1.2.4 – COMPARACIÓN CON OTRAS BANDAS	25
1.3 – CODIFICACIÓN DE DATOS	26
1.3.1 – REDUNDANCIA	27
1.3.2 – CORRECCIÓN DE ERRORES	27
1.3.3 – COMPRESIÓN DE DATOS	28
1.4 – MAGNITUDES Y UNIDADES	29
1.5 – SÍNTESIS CONCEPTUAL Y VINCULACIÓN CON EL PROBLEMA	31
CAPÍTULO 2 – ANÁLISIS DEL PROTOCOLO WSPR	32
2.1 – EL PROTOCOLO WEAK SIGNAL PROPAGATION REPORTER	32
2.2 – PRINCIPIOS DE DISEÑO	33
2.2.1 – DETALLE DE LA TRAMA DEL MENSAJE	34
2.2.2 – REQUISITOS DE HARDWARE Y SINCRONIZACIÓN	35
2.3 – ANÁLISIS DEL CÓDIGO FUENTE DEL PROTOCOLO	35
2.3.1 – EL CÓDIGO FUENTE DE NHASH.C	36
2.3.2 – EL CÓDIGO FUENTE DE WSPRCODE.F90	37
2.4 – VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL PROTOCOLO WSPR	38
2.4.1 – VENTAJAS ESTRATÉGICAS	38
2.4.2 – LIMITACIONES INHERENTES	38
2.5 – EVALUACIÓN TÉCNICA DEL USO DE WSPR EN TELEMETRÍA	39
2.5.1 – CONSUMO ENERGÉTICO ESTIMADO POR TRANSMISIÓN	39
2.5.2 – HARDWARE DISPONIBLE EN EL MERCADO COMPATIBLE	40
2.5.3 – RANGOS DE POTENCIA Y DESEMPEÑO ESPERADO	41
2.6 – SÍNTESIS ESTRUCTURAL E IMPLICANCIAS PARA TELEMETRÍA	42
CAPÍTULO 3 – ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DEL PROTOCOLO WSPR	43
3.1 – OBTENCIÓN Y DEPURACIÓN DE LOS DATOS	43
3.2 – ALCANCE GEOGRÁFICO DEL PROTOCOLO WSPR	46
3.2.1 – DISTANCIA MEDIA POR BANDA	46
3.2.2 – DISTANCIA MEDIA, MÁXIMA POR POTENCIA	47
3.2.3 – DISTANCIA MEDIA POR POTENCIA Y BANDA	49
3.2.4 – DISTANCIA MÁXIMA POR POTENCIA Y BANDA	50
3.3 – RELACIÓN ENTRE LA DISTANCIA Y LA CALIDAD DE SEÑAL (SNR)	51

3.3.1 – DISPERSIÓN DEL SNR EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA	51
3.3.2 – DISTRIBUCIÓN DE SNR PROMEDIO POR BANDA Y POTENCIA	52
3.4 – INFLUENCIA DEL CICLO SOLAR EN EL DESEMPEÑO	53
3.4.1 – VARIACIÓN DE LA DISTANCIA MEDIA POR BANDA Y AÑO	54
3.4.2 – VARIACIÓN DEL SNR PROMEDIO POR BANDA Y AÑO	55
3.5 – ROBUSTEZ FRENTE A VARIACIONES DIARIAS DE LA IONOSFERA	56
3.5.1 – DISTRIBUCIÓN DEL SNR SEGÚN LA HORA DEL DÍA	57
3.5.2 – DISTRIBUCIÓN DE LA DISTANCIA ALCANZADA SEGÚN LA HORA	58
3.6 – SÍNTESIS EMPÍRICA Y FUNDAMENTACIÓN DEL DISEÑO	60
CAPÍTULO 4 – DISEÑO DEL ESQUEMA DE CODIFICACIÓN	61
4.1 – FUNDAMENTACIÓN DEL USO DE WSPR PARA TELEMETRÍA	61
4.2 – ESQUEMA DE CODIFICACIÓN DE DATOS DE TELEMETRÍA PROPUESTO	62
4.3 – MODIFICACIONES IMPLEMENTADAS Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL	63
4.3.1 – VALIDACIÓN NOMINAL	64
4.3.2 – ESTRÉS DE LÍMITES	66
4.3.3 – VALORES NEGATIVOS	68
4.4 – CATÁLOGO DE MAGNITUDES Y UNIDADES	69
4.5 – SÍNTESIS DEL DISEÑO Y APOORTE DE LA INVESTIGACIÓN	70
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	71
VENTAJAS DEL ENFOQUE ADOPTADO	72
LIMITACIONES DEL USO DE WSPR EN TELEMETRÍA	73
POSIBILIDADES DE APLICACIÓN EN ESCENARIOS REALES	74
FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	74
BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXO I – SCRIPTS DE OBTENCIÓN DE DATOS	79
ANEXO II – SCRIPTS DE PROCESAMIENTO DE DATOS	83
ANÁLISIS 1: DISTANCIA MEDIA POR BANDA (KM)	83
ANÁLISIS 2: DISTANCIA MEDIA, MÁXIMA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR SEGÚN POTENCIA EMITIDA	84
ANÁLISIS 3: DISTANCIA MEDIA, MÁXIMA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR POR POTENCIA Y BANDA	86
ANÁLISIS 4: DISTANCIA MÁXIMA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR POR POTENCIA	88
ANÁLISIS 5: DISPERSIÓN SNR VS DISTANCIA POR BANDA	89
ANÁLISIS 6: SNR PROMEDIO POR BANDA Y POTENCIA EMITIDA EN BANDAS SELECCIONADAS	91
ANÁLISIS 7: DISTANCIA MEDIA POR BANDA Y AÑO	92
ANÁLISIS 8: SNR PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR POR BANDA Y AÑO	94
ANÁLISIS 9: SNR POR HORA DEL DÍA	95
ANÁLISIS 10: DISTANCIA POR HORA DEL DÍA	97
ANEXO III – CATÁLOGO DE MAGNITUDES Y UNIDADES	100

ÍNDICE DE TABLAS

Bandas HF del servicio de aficionados y características de propagación asociadas.....	19
Comparación de bandas HF, VHF y UHF en aplicaciones de radiocomunicaciones.....	25
Estimación de consumo energético por transmisión y por jornada operativa.....	40
Distancias medias y máximas de propagación por banda HF.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Modos de propagación de ondas de radio (Wireless propagation modes).....	22
Distribución de densidad electrónica en regiones ionosféricas.....	23
Distancia media de enlaces WSPR según banda de frecuencia.....	47
Distancia de enlace en función de la potencia: media, máxima y dispersión.....	48
Distancia de enlace según potencia y banda: media y dispersión.....	49
Distancia de enlace según potencia en bandas seleccionadas: capacidad máxima de propagación.....	50
Relación entre SNR y distancia por banda.....	52
SNR promedio según banda y potencia emitida.....	53
Distancia de propagación por banda y año: relación con el ciclo solar.....	54
SNR promedio por banda y año: relación con el ciclo solar.....	56
Variación horaria del SNR.....	58
Variación de la distancia de enlace según la hora del día.....	59
Codificación y decodificación de temperatura en rango positivo normalizado.....	65
Codificación y decodificación de valores máximos: representación del límite superior del sistema.....	67
Codificación y decodificación de valores negativos.....	69

RESUMEN

La transmisión de datos de telemetría en entornos remotos sin infraestructura convencional plantea el desafío de utilizar medios alternativos de largo alcance y bajo consumo energético. En este contexto, el problema tecnológico abordado en esta investigación consistió en analizar la factibilidad de emplear el protocolo Weak Signal Propagation Reporter (WSPR), originalmente diseñado para experimentación en señales débiles, como canal potencial para la transmisión de telemetría de muy baja tasa de datos.

Como solución conceptual y técnica, se diseñó un nuevo esquema de codificación capaz de insertar información de sensores empleando el protocolo WSPR, y respetando sus restricciones estructurales. El esquema define una distribución de bits que permite identificar de manera unívoca el sensor, la magnitud medida y el valor correspondiente, incluyendo el tratamiento de valores límite y números negativos. Se desarrolló un prototipo funcional del módulo de codificación y decodificación mediante la adaptación del código fuente original del software WSPR.

La evaluación del trabajo se realizó en dos niveles. En primer lugar, se analizó el rendimiento del protocolo WSPR sin modificaciones, utilizando una base de datos pública de reportes globales para estudiar métricas como distancia alcanzada, relación señal–ruido y potencia de transmisión, con el fin de estimar su alcance y confiabilidad como soporte de telemetría. En segundo lugar, se validó la consistencia del esquema propuesto mediante pruebas controladas de generación y recuperación de datos.

Los resultados indican que, desde el punto de vista técnico y metodológico, WSPR presenta características adecuadas para aplicaciones de telemetría de baja tasa y largo alcance. Si bien la implementación completa del módulo de transmisión y recepción queda planteada como etapa posterior, el trabajo establece una base sólida y replicable para el desarrollo futuro de sistemas de monitoreo remoto empleando señales de radio inferiores a 30 Mhz.

Palabras clave: *telemetría, radiofrecuencia, protocolos de comunicación*

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la telemetría se ha consolidado como un componente esencial en sistemas de monitoreo, control y comunicación remota. Su utilización atraviesa campos tan diversos como la exploración espacial, la medicina, la industria energética, la gestión ambiental y, más recientemente, el Internet de las Cosas (IoT). En todos estos contextos, la telemetría¹ permite recolectar datos a distancia y transformarlos en información útil para la toma de decisiones en tiempo real o diferido. Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos significativos cuando debe operar en entornos de propagación hostiles, con recursos energéticos limitados o con restricciones de espectro radioeléctrico².

En particular, la transmisión de datos en el rango de alta frecuencia³ (HF) adquiere relevancia por su capacidad de cubrir largas distancias sin necesidad de infraestructura intermedia, aprovechando fenómenos de propagación ionosférica^{4 5}.

Este atributo convierte al HF en una alternativa viable para redes de sensores desplegadas en zonas remotas, ambientes marinos o escenarios de emergencia donde otros medios de comunicación resultan impracticables. No obstante, la naturaleza variable de la ionosfera, la presencia de ruido electromagnético⁶ y el reducido ancho de banda⁷ disponible imponen fuertes limitaciones técnicas que deben ser consideradas en el diseño de sistemas de comunicación robustos basado en señales de radio.

El protocolo *Weak Signal Propagation Reporter (WSPR)*⁸ se ha posicionado como una herramienta de gran valor para estudiar la propagación de señales débiles⁹ en HF. Su

¹ Telemetría: Proceso por el cual se realizan mediciones en una ubicación remota y los resultados se transmiten por telecomunicación (International Electrotechnical Commission, s.f., IEC 701–01–25).

² Espectro radioeléctrico: La porción del espectro electromagnético que se encuentra en el rango de frecuencias utilizado para radiocomunicaciones, incluyendo radiación, transmisión, emisión o recepción de ondas de radio, y cuya gestión se regula internacionalmente para asegurar compatibilidad y eficiencia de uso (Unión Internacional de Telecomunicaciones [UIT], 2020).

³ Alta Frecuencia (HF): rango del espectro radioeléctrico comprendido entre 3 y 30 MHz, utilizado en radiocomunicaciones de largo alcance (Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Radiocomunicaciones [UIT–R], 2020).

⁴ Ionosfera: Capa de la atmósfera terrestre situada aproximadamente entre los 60 km y 1.000 km de altitud (Unión Internacional de Telecomunicaciones [UIT], 2020).

⁵ Propagación ionosférica: fenómeno de rebote de la señal en las capas de la ionosfera, permitiendo que las señales sigan trayectorias más allá del horizonte y alcanzan grandes distancias mediante uno o varios rebotes (Unión Internacional de Telecomunicaciones [UIT], 2020).

⁶ Ruido electromagnético: fenómeno electromagnético variable en el tiempo que no contiene información y que se suma o superpone a una señal útil, degradando su calidad y dificultando la correcta recepción (International Electrotechnical Commission, 2009, IEC 161–01–02).

⁷ Ancho de banda: La diferencia entre las frecuencias extremas que delimitan una banda de frecuencias utilizada por una señal (International Electrotechnical Commission, 2017, IEC 103–09–02).

⁸ WSPR (Weak Signal Propagation Reporter): protocolo digital diseñado para estudiar propagación, capaz de decodificar señales con relaciones señal–ruido muy bajas. (American Radio Relay League, 2021).

⁹ Señal débil: transmisión cuya potencia está por debajo del nivel de ruido, pero que puede recuperarse mediante técnicas de codificación y corrección. (Sklar, 2001).

capacidad para decodificar transmisiones con relaciones señal–ruido negativas y su bajo consumo de ancho de banda lo convierten en un candidato idóneo para transportar información telemétrica de manera experimental.

A pesar de ello, la literatura existente se centra mayormente en su uso como medio de análisis de propagación, sin explorar en profundidad su potencial como portador de datos específicos provenientes de sensores.

El presente trabajo se propone cubrir ese vacío mediante el diseño, implementación experimental y validación de un esquema de codificación de datos de telemetría que reutiliza la estructura de tramas de 50 bits de información definida por el protocolo WSPR en su especificación original. Para ello, se desarrolla un marco teórico que revisa los fundamentos de la telemetría, la radiofrecuencia y la codificación digital, se analizan los límites y alcances del protocolo en distintos escenarios de propagación, y se realiza una validación experimental del esquema propuesto a través de ejemplos prácticos.

La relevancia de esta investigación radica en demostrar la factibilidad de reutilizar un protocolo¹⁰ ampliamente difundido en la comunidad radioaficionada para fines de telemetría de bajo caudal, aportando un modelo replicable en aplicaciones de bajo costo y consumo energético. Al mismo tiempo, se contribuye a la reflexión académica sobre la convergencia entre tecnologías tradicionales de radiocomunicación y las demandas contemporáneas de transmisión de datos en condiciones extremas.

En función de lo expuesto, la presente investigación se estructura en cuatro capítulos articulados de manera progresiva. En el Capítulo 1 se desarrollan los fundamentos conceptuales relativos a propagación ionosférica, modulación digital y sistemas de telemetría en entornos de señal débil. El Capítulo 2 analiza en profundidad el protocolo WSPR, su arquitectura interna y sus restricciones estructurales. El Capítulo 3 presenta el análisis empírico de desempeño basado en datos reales de transmisión, evaluando alcance, relación señal–ruido y comportamiento por banda. Finalmente, el Capítulo 4 propone y valida experimentalmente un esquema original de codificación de datos de telemetría adaptado a la estructura del protocolo WSPR.

¹⁰ Protocolo: Conjunto de reglas que determinan el formato, el significado y la secuencia de los mensajes intercambiados, junto con las acciones que deben ejecutarse cuando estos se transmiten o reciben (Tanenbaum & Wetherall, 2011).

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un esquema de codificación de datos de telemetría para su transmisión mediante señales de radio, utilizando el protocolo de comunicación Weak Signal Propagation Reporter.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar los conceptos de telemetría y señales de radio necesarios para el proyecto.
- Investigar el funcionamiento del protocolo Weak Signal Propagation Reporter.
- Analizar el desempeño del protocolo Weak Signal Propagation Reporter para la transmisión de datos de telemetría.
- Proponer un esquema de codificación de datos de telemetría utilizando el protocolo Weak Signal Propagation Reporter.

CAPÍTULO 1 – FUNDAMENTOS CONCEPTUALES

El presente capítulo introduce los conceptos fundamentales necesarios para comprender el contexto técnico de la telemetría en entornos de radiofrecuencia. En particular, se abordan los principios generales de la telemetría, sus aplicaciones en distintos ámbitos y las condiciones específicas que presenta su implementación en el espectro de alta frecuencia (HF).

En primer lugar, se presentan las definiciones fundamentales de telemetría y se examinan los escenarios donde la medición directa resulta inviable, insegura o antieconómica. Posteriormente, se describen las principales características del espectro radioeléctrico, diferenciando sus comportamientos en HF respecto de bandas superiores (VHF¹¹/UHF¹²), y se introducen los fenómenos de propagación que condicionan el diseño de sistemas robustos para entornos de señal débil.

1.1 – TELEMETRÍA

La telemetría es el proceso automatizado de medición remota y transmisión de datos desde puntos de adquisición distribuidos hacia uno o más sistemas centrales en los que esa información es registrada, monitoreada, analizada o utilizada para control (International Electrotechnical Commission, s.f., IEC 701-01-25).

Etimológicamente, el término proviene del griego *tēle* (a distancia) y *mētron* (medida), logrando el concepto de “medición a distancia”. Aunque sus primeras aplicaciones se asociaron a ámbitos militares e industriales, hoy la telemetría atraviesa múltiples sectores científicos y técnicos, expandiéndose con el advenimiento del Internet de las Cosas (IoT)¹³.

Por su parte, la IEEE, en su IEEE Std 100, la describe como “el proceso de medir y recopilar datos desde puntos remotos y transmitir esa información hacia equipos receptores para monitoreo, análisis o control” (IEEE Standards Association, 2000). Ambas definiciones destacan tres elementos: automatización, remotización y transmisión, rasgos que distinguen a la telemetría de otros esquemas de medición puramente locales.

¹¹ VHF (*Very High Frequency*): Banda del espectro radioeléctrico comprendida entre 30 MHz y 300 MHz, utilizada en radiocomunicaciones móviles, servicios aeronáuticos, marítimos, difusión de FM, enlaces punto-a-punto y aplicaciones técnicas que requieren propagación predominantemente en línea de vista (Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Radiocomunicaciones [UIT-R], 2020).

¹² UHF (*Ultra High Frequency*): Banda del espectro radioeléctrico comprendida entre 300 MHz y 3 GHz, empleada en televisión digital, comunicaciones móviles terrestres, sistemas satelitales de baja órbita, Wi-Fi, radar y diversos servicios de radiocomunicación que requieren anchos de banda mayores y propagación principalmente line-of-sight (Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Radiocomunicaciones [UIT-R], 2020).

¹³ IoT (Internet of Things): Red de objetos físicos dotados de capacidades de sensado, procesamiento y comunicación, que intercambian datos y operan de manera autónoma a través de Internet sin intervención humana constante (International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector [ITU-T], 2012, Recommendation ITU-T Y.2060).

Desde el punto de vista funcional, un sistema de telemetría se compone de los siguientes bloques:

- Sensores: dispositivo que detecta o mide una magnitud física –como temperatura, presión, humedad, luz, posición, aceleración o cualquier otra variable analógica o digital– y la convierte en una señal interpretable por un sistema electrónico, ya sea eléctrica, digital u óptica. Los sensores se caracterizan por parámetros como precisión, estabilidad, resolución, rango operativo, sensibilidad y linealidad, que determinan su desempeño (Tanenbaum & Wetherall, 2011).
- Unidad de adquisición de datos: módulo encargado de recibir señales provenientes de uno o varios sensores, realizar su conversión, digitalización, filtrado y procesamiento inicial, y transmitirlos a un sistema central o plataforma de análisis (Stallings, 2016).
- Unidad de transmisión: Dispositivo o módulo responsable de formatear y enviar datos a través de un medio de comunicación físico o inalámbrico, convirtiendo la información en señales apropiadas (Stallings, 2016).
- Canal de comunicación: Medio a través del cual se transmite información entre un emisor y un receptor, pudiendo ser alámbrico –como RS–232/485, Ethernet o fibra óptica– o inalámbrico, mediante radiofrecuencia, redes celulares o enlaces satelitales (Tanenbaum & Wetherall, 2011).
- Receptor o estación base: Dispositivo que recibe las señales transmitidas por una unidad remota y transforma en datos interpretables por el sistema. Una estación base puede además almacenar, procesar y reenviar la información hacia plataformas de monitoreo o control (Tanenbaum & Wetherall, 2011).

La telemetría resulta esencial cuando la medición directa es inviable, insegura o antieconómica. La exploración espacial constituye un caso de inviabilidad técnica; el monitoreo de volcanes y reactores nucleares responde a la necesidad de reducir riesgos por inseguridad; y la supervisión de procesos industriales automatizados o la gestión de recursos naturales en zonas remotas ilustran situaciones donde la medición directa sería antieconómica. Otros ámbitos donde la telemetría se aplica de manera significativa incluyen la medicina, el transporte, la meteorología y la industria del petróleo y gas.

Los sistemas de telemetría deben balancear los siguientes aspectos:

- Eficiencia energética: minimización del consumo, ciclos de transmisión, modos de suspensión, aprovechamiento de energías renovables.

- Robustez y confiabilidad: resistencia a ruido, interferencias, *fading*¹⁴, multitrayectoria, y tolerancia a fallas.
- Eficiencia espectral: elección de esquemas de modulación¹⁵/codificación¹⁶ que optimicen la tasa de error de bit para un determinado SNR¹⁷.
- Sincronización temporal¹⁸ y exactitud¹⁹: particularmente relevante en escenarios que requieren correlación temporal exacta.
- Escalabilidad: capacidad para integrar miles o millones de nodos, con protocolos y sensores diversos.
- Resiliencia en entornos desconectados: estrategias store & forward²⁰ y delay/disruption tolerant networking²¹ cuando la conectividad es intermitente o altamente degradada.

Desde una perspectiva sistémica, la telemetría se concibe en este trabajo como un sistema integral y distribuido, cuya finalidad consiste en transformar mediciones en información accionable mediante canales remotos. La selección tecnológica involucra componentes funcionales (sensor, adquisición, transmisión y recepción) y requisitos no funcionales críticos, tales como consumo energético, robustez, seguridad, escalabilidad y sincronización.

¹⁴ Fading: Desvanecimiento de señal. Es la variación en la intensidad de una señal de radio recibida a lo largo del tiempo, causada por interferencias entre múltiples trayectorias de propagación, cambios en la ionósfera, movimiento del emisor o receptor, o fenómenos atmosféricos, afectando la estabilidad y calidad de la comunicación (International Electrotechnical Commission, 2006).

¹⁵ Modulación: Proceso por el cual una magnitud que caracteriza una oscilación o una onda sigue las variaciones de una señal o de otra oscilación u onda (International Electrotechnical Commission, s.f., IEC 701-03-08).

¹⁶ Codificación: Proceso mediante el cual la información se transforma o representa siguiendo un conjunto de reglas definidas por un código, con el objetivo de permitir su transmisión, almacenamiento o procesamiento de manera estructurada y fiable (International Electrotechnical Commission, s.f., IEC 701-03-07).

¹⁷ Relación señal-ruido (SNR): Métrica que cuantifica la proporción entre la potencia de la señal útil y la potencia del ruido presente en un canal de comunicación, expresada generalmente en decibelios (dB) (Tanenbaum & Wetherall, 2011).

¹⁸ Sincronización temporal: Proceso mediante el cual los sistemas de una red mantienen un tiempo coherente, asegurando que los eventos ocurran en el orden correcto y con referencias temporales comparables. La sincronización permite coordinar transmisiones, evitar colisiones, ordenar mensajes y garantizar que la comunicación distribuida opere con consistencia lógica y temporal (Tanenbaum & Wetherall, 2011).

¹⁹ Exactitud: Grado en que un instrumento de medida proporciona un valor indicado cercano al valor verdadero del mensurando (International Electrotechnical Commission, s.f., IEC 311-06-08).

²⁰ Store-and-forward consiste en almacenar temporalmente los paquetes en cada nodo intermedio hasta poder enviarlos al siguiente salto, garantizando así la integridad y la entrega ordenada aun cuando el canal no esté disponible de manera continua. Es un mecanismo clásico en redes de conmutación por paquetes y aparece descrito en la bibliografía fundacional de redes de datos (Tanenbaum & Wetherall, 2011; Stallings, 2016).

²¹ Delay/Disruption Tolerant Networking (DTN): es una arquitectura pensada para redes con latencias muy altas, cortes frecuentes y particiones. Cada nodo almacena los datos de forma persistente y los envía cuando reaparece la conectividad para asegurar la entrega (Cerf et al., 2007).

1.2 – SEÑALES DE RADIO

El término radiofrecuencia (RF) alude al conjunto de frecuencias del espectro electromagnético empleadas para la transmisión de señales de radio, convencionalmente comprendidas entre 3 kHz y 300 GHz, conforme a la clasificación del espectro establecida en el Reglamento de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (International Telecommunication Union, 2020, p.25).

En este dominio, la información se transporta mediante ondas electromagnéticas radiadas que se propagan en el espacio sin requerir un medio conductor material (International Electrotechnical Commission, 2006). El carácter radioeléctrico de estas señales refiere tanto a su naturaleza física como a su condición regulatoria y operativa: el espacio radioeléctrico constituye un recurso limitado y regulado, cuyo uso está sujeto a normas técnicas, límites de emisión y reglas de coordinación espectral definidas en el Reglamento de Radiocomunicaciones (International Telecommunication Union, 2020).

Desde el punto de vista físico, una señal de RF se describe por parámetros fundamentales: frecuencia, longitud de onda, fase, potencia, polarización, ancho de banda y tiempo de ocupación. Estos parámetros no solo determinan el comportamiento de propagación (por ejemplo, si la onda puede refractarse en la ionosfera o si exige línea de vista), sino también la capacidad de transportar información de forma robusta frente a ruido e interferencias. En términos operativos, toda transmisión de RF implica una antena transmisora, un canal de propagación y una antena receptora, con sus correspondientes condicionantes: directividad y ganancia, eficiencia de radiación, impedancia característica²², ancho de banda operativo y compatibilidad electromagnética (Balanis, 2016; Kraus, 1988).

La antena ocupa un lugar central en el “espectro radioeléctrico”: es el dispositivo que convierte señales eléctricas en ondas electromagnéticas radiadas (y viceversa). Su rendimiento se caracteriza, entre otras métricas, por la directividad (capacidad de concentrar la energía radiada en ciertas direcciones), la ganancia (directividad ponderada por la eficiencia), la polarización (lineal, circular o elíptica) y el ancho de banda útil. La polarización, en particular, debe acoplarse entre transmisor y receptor para evitar pérdidas significativas por desalineamiento. Asimismo, la impedancia de entrada de la antena (antenna input impedance)²³ debe estar adaptada a la impedancia del sistema de transmisión (típicamente 50 ohm en sistemas de radioaficionados e instrumentación de RF)

²² Impedancia característica (characteristic impedance): parámetro propio de una línea de transmisión o guía de ondas, definido como la relación entre la tensión y la corriente asociadas a una onda progresiva que se propaga en un único sentido a lo largo del medio (International Electrotechnical Commission, s.f., IEV 726–07–01).

²³ Impedancia de entrada de la antena (antenna input impedance): relación compleja entre la tensión y la corriente en el punto de alimentación de la antena en una frecuencia determinada (International Electrotechnical Commission, s.f., IEV 712–02–57).

para minimizar reflexiones y maximizar la transferencia de potencia. Se emplea la Relación de Ondas Estacionarias (ROE / SWR, *Standing Wave Ratio*)²⁴ para expresar cuán bien acoplado está el sistema; una ROE elevada indica potencia reflejada y, por ende, ineficiencias y potenciales daños al transmisor.

El canal radioeléctrico (el medio por el que se propaga la onda) es inherentemente ruidoso, variable y, a menudo, impredecible. A diferencia de un canal cableado, el entorno radioeléctrico está sujeto a ruidos naturales (atmosféricos y galácticos), interferencias artificiales (dispositivos electrónicos, líneas de potencia, equipamiento industrial), reflexiones, difracciones, dispersión multitrayectoria y, en HF, refracción ionosférica.

El Sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT, UIT-R) publica diversas recomendaciones técnicas. Entre ellas, la Recomendación UIT-R P.372-17 que caracteriza estadísticamente el ruido radioeléctrico en función de la frecuencia y el tipo de entorno (industrial, urbano, rural), lo que permite estimar niveles pisos de ruido razonables y ajustar la metodología de diseño del enlace (UIT-R, 2021). Esta variabilidad del canal justifica el uso de modos de transmisión robustos y protocolos con corrección de errores, especialmente en escenarios de baja potencia o telemetría de baja tasa de bit (*bit rate*)²⁵ como los que aborda la presente.

En el aspecto radioeléctrico regulatorio, cada transmisión debe respetar límites de potencia de RF²⁶, ancho de banda, tiempo de transmisión, clase de emisión (designator ITU) y bandas de operación autorizadas. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (International Telecommunication Union, 2020), a través del Reglamento de Radiocomunicaciones, define bandas, servicios y prioridades, mientras que los reguladores nacionales implementan y fiscalizan esas reglas. Adicionalmente, existen conceptos operativos relevantes como la potencia isotrópica radiada equivalente (p.i.r.e. / e.i.r.p., *equivalent isotropically radiated power*)²⁷, que refleja la potencia efectiva “aparente” en la dirección de máxima radiación si el sistema irradiara uniformemente en todas las

²⁴ Relación de Ondas Estacionarias (ROE / SWR, *Standing Wave Ratio*): Relación que refleja el grado de adaptación entre el sistema de transmisión y la antena (International Electrotechnical Commission, s.f., IEV 705-04-49).

²⁵ Tasa de bits (bit/s, *bit rate*): Número de bits transferidos por unidad de tiempo en un sistema o canal de transmisión; típicamente expresado en bit/s, kbit/s, Mbit/s o Gbit/s (International Electrotechnical Commission, s.f., IEV 704-16-07)

²⁶ Potencia de radiofrecuencia (RF power): Potencia eléctrica asociada a una señal en el rango de radiofrecuencia, suministrada por el transmisor al sistema de antena y destinada a su radiación como onda electromagnética; en términos regulatorios, corresponde a la potencia media entregada a la antena bajo condiciones normales de funcionamiento (International Telecommunication Union, 2020, RR 1.158).

²⁷ Potencia isotrópica radiada equivalente (p.i.r.e. / e.i.r.p., *equivalent isotropically radiated power*): Potencia que un sistema transmisor-antena debe radiar para que una antena isotrópica ficticia genere en la misma dirección la misma densidad de potencia; representa el producto de la potencia suministrada a la antena por el transmisor y la ganancia absoluta de la antena en la dirección dada (International Electrotechnical Commission, s.f., IEV 712-02-51).

direcciones. Si bien su cálculo formal involucra ganancias y pérdidas, su lectura práctica es directa: expresa cuánto “impacto radioeléctrico” produce realmente un transmisor y su antena en el espacio. Este indicador resulta clave para compatibilizar emisiones, proteger servicios sensibles y cumplir con límites técnicos bajo licencia.

El concepto de “espectro radioeléctrico” incluye, por lo tanto, cuatro dimensiones integradas:

- física (las ondas en el espacio, con sus parámetros y restricciones);
- dispositiva (antenas, líneas de transmisión, filtros, combinadores, acoples);
- canal y entorno (ruido, interferencias, propagación, regulaciones);
- operativa–normativa (potencias autorizadas, máscaras, clases de emisión, ocupación temporal, coordinación entre servicios).

En radioafición y en otras aplicaciones que emplean el espectro de HF, estas dimensiones deben considerarse en conjunto: una señal “bien construida” desde lo digital (modulación, corrección de errores hacia adelante (FEC, *Forward Error Correction*)²⁸, sincronización) puede fracasar cuando la antena está mal adaptada, la polarización no coincide, la p.i.r.e. no alcanza niveles suficientes frente al ruido del entorno, o cuando invade espectralmente bandas no autorizadas. La robustez de un sistema de radiofrecuencia debe entenderse como una propiedad sistémica, sustentada en la coherencia entre el diseño electromagnético, el cumplimiento del marco regulatorio, la adecuación del esquema de modulación y codificación, y la capacidad del receptor para detectar, sincronizar y decodificar señales en condiciones de baja relación señal–ruido.

En el caso particular de HF, el espectro radioeléctrico adquiere además una dimensión ionosférica: la estructura y dinámica del plasma ionosférico determina cuándo, cómo y con qué parámetros es posible establecer enlaces estables. La planificación de frecuencias, la elección de horarios de transmisión, la orientación y tipo de antena (por ejemplo, antenas optimizadas para radiación de alto ángulo en enlaces con propagación por onda ionosférica de incidencia casi vertical (*Near Vertical Incidence Skywave, NVIS*)²⁹ frente

²⁸ Corrección de errores hacia adelante (FEC, *Forward Error Correction*): Técnica mediante la cual el emisor adiciona una cantidad controlada de bits redundantes a los datos transmitidos de tal forma que el receptor pueda corregir automáticamente unos cuantos errores sin necesidad de retransmisión, lo que mejora la confiabilidad en canales ruidosos (International Electrotechnical Commission, s.f., IECV 702–05–20).

²⁹ Propagación por onda ionosférica de incidencia casi vertical (*Near Vertical Incidence Skywave, NVIS*): Modo de propagación ionosférica en el cual las ondas de alta frecuencia (HF) son radiadas hacia la ionosfera con ángulos cercanos a la vertical, permitiendo que la señal sea reflejada y retorne a la Tierra a distancias cortas o intermedias donde la onda de superficie no alcanza. NVIS se emplea para comunicaciones regionales en HF, especialmente en zonas montañosas o con obstáculos, y depende críticamente de la altura y densidad de la capa ionosférica F (International Telecommunication Union Radiocommunication Sector [ITU–R], 2019, Recommendation ITU–R P.533).

a antenas direccionales para saltos largos³⁰), y la selección de protocolos resilientes a SNR negativas son todas decisiones que emergen de comprender y respetar el carácter radioeléctrico y radiofísico del medio (Davies, 1990; Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Radiocomunicaciones [UIT–R], 2019, 2021).

Finalmente, en el diseño de sistemas caracterizados por consumo energético reducido y ancho de banda extremadamente limitado, cada decisión radioeléctrica incide de manera directa en la viabilidad técnica del sistema. En particular, deben considerarse de forma integrada los siguientes aspectos:

- Cumplimiento regulatorio: la potencia isotrópica radiada equivalente (p.i.r.e.), el ancho de banda ocupado y el ciclo de trabajo (duty cycle)³¹ deben ajustarse a los límites establecidos para evitar interferencias a otros servicios.
- Conformidad espectral: los filtros y máscaras espectrales deben garantizar emisiones compatibles con el entorno radioeléctrico y dentro de las bandas autorizadas.
- Robustez del enlace: la reproducibilidad de la comunicación frente a variaciones del entorno y de la propagación debe evaluarse bajo distintos escenarios operativos.
- Margen energético: los valores de energía por bit respecto a la densidad espectral de ruido (E_b/N_0)³² deben analizarse considerando los modelos de ruido definidos por la UIT, a fin de determinar la factibilidad del enlace en condiciones de señal débil.

La interacción entre estos factores determina la factibilidad operativa del sistema en aplicaciones de muy baja tasa de datos.

1.2.1 – BANDAS DEL ESPECTRO HF

En el contexto de las radiocomunicaciones de alta frecuencia (HF), las denominadas bandas corresponden a segmentos específicos del espectro radioeléctrico asignados a los servicios de aficionados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) (International Telecommunication Union, 2020), y coordinados por las organizaciones regionales, como la International Amateur Radio Union (IARU). Estas bandas, expresadas

³⁰ Antena direccional para salto largo: Tipo de antena diseñada para concentrar la emisión o recepción de señales en una dirección específica, optimizando el ángulo bajo de radiación necesario para enlaces a larga distancia mediante propagación ionosférica (American Radio Relay League, 2019).

³¹ Ciclo de trabajo (*duty cycle*): Relación, en un intervalo de tiempo determinado, entre la duración continua de carga o actividad y el tiempo total del ciclo, expresada habitualmente como porcentaje o razón (International Electrotechnical Commission, s.f., IEC 851–12–03).

³² Energía por bit (E_b/N_0 , *energy per bit to noise–power spectral density ratio*): Parámetro que cuantifica la energía asociada a cada bit transmitido en relación con la densidad espectral de potencia del ruido presente en el canal (Tanenbaum & Wetherall, 2011).

en metros, hacen referencia a la longitud de onda central aproximada, derivada de la relación inversa entre frecuencia y longitud de onda según la ecuación fundamental:

$$\lambda = c/f$$

donde λ (lambda) es la longitud de onda (en metros), c es la velocidad de la luz en el vacío (299.792.458 metros por segundo aceptándose la versión redondeada a 300.000.000 m/s), y f la frecuencia (en Hz).

Cada banda de HF presenta comportamientos propios de propagación que la hacen más adecuada para determinados tipos de comunicación, ya sea de corto, medio o largo alcance. Asimismo, el marco regulatorio puede imponer restricciones específicas en cuanto a potencia máxima autorizada, modos de transmisión o segmentos de banda disponibles, mientras. En la Tabla 01 se presenta una síntesis elaborada en el marco de la presente investigación.

Tabla 01

Bandas HF del servicio de aficionados y características de propagación asociadas

Banda	Frecuencia (MHz)	Funcionamiento característico
160 metros	1.80 – 2.00	Alcance de 100 a 500 km; extensión nocturna hasta ~1.000 km. Predominio de propagación en horario nocturno.
80 metros	3.50 – 4.00	Alcance de 300 a 1.000 km durante la noche; limitado en horario diurno.
60 metros	5.33 – 5.40	Alcance de 500 a 1.500 km. Comportamiento relativamente estable entre día y noche.
40 metros	7.00 – 7.30	Alcance de 500 a 2.000 km de día y hasta >8.000 km de noche.
30 metros	10.10 – 10.15	Alcance de 1.000 a 8.000 km. Comportamiento estable en distintas condiciones diarias.
20 metros	14.00 – 14.35	Alcance de 3.000 a 15.000 km. Óptima en horario diurno y alta actividad solar.
17 metros	18.06 – 18.16	Alcance de 2.000 a 14.000 km. Dependiente de condiciones ionosféricas favorables.
15 metros	21.00 – 21.45	Alcance de 2.000 a 16.000 km. Fuerte dependencia del ciclo solar.
12 metros	24.89 – 24.99	Alcance de 1.500 a 12.000 km. Dependiente del ciclo solar.
10 metros	28.00 – 29.70	Alcance de 500 a >18.000 km. Alta variabilidad según el ciclo solar.

1.2.2 – MODULACIÓN DE SEÑALES DE RADIO

Modulación y codificación son los mecanismos centrales para hacer transportable la información sobre una onda portadora. En términos clásicos, se distinguen modulación en amplitud (AM), banda lateral única (SSB), modulación de frecuencia (FM) y modulación por desplazamiento en frecuencia (FSK / 4-FSK, *Frequency-Shift Keying* / 4-*Frequency-Shift-Keying*)³³. En las últimas décadas, la integración de codificación con corrección de errores (FEC), Intercalado (*interleaving*)³⁴, sincronización de alta precisión y detección coherente ha permitido sostener comunicaciones en condiciones de ruido e interferencia que serían inviables con esquemas analógicos o digitales menos sofisticados (Proakis & Salehi, 2008; Sklar, 2001).

En el caso particular de las bandas HF descritas en la Sección 1.2.1, la lógica de diseño difiere sustancialmente de la adoptada en VHF o UHF. Las bandas HF presentan propagación ionosférica variable, absorción en la capa D y dependencia del ciclo solar, lo que introduce fluctuaciones significativas en el canal (UIT-R, 2021). En este contexto, la eficiencia espectral bruta no constituye el criterio rector de diseño; por el contrario, adquieren mayor relevancia la robustez frente a relaciones señal-ruido bajas, la operación en anchos de banda reducidos y la resiliencia ante desvanecimientos, tal como se discute en la literatura clásica de comunicaciones digitales (Proakis & Salehi, 2008; Sklar, 2001).

Esta lógica fundamenta la arquitectura técnica del protocolo WSPR, caracterizada por la concentración de energía en aproximadamente 6 Hz, el uso de modulación 4-FSK de muy baja tasa de símbolos, la aplicación de codificación convolucional con FEC y el interleaving temporal. En este contexto, diversos estudios han demostrado que es posible lograr la decodificación de señales con relaciones señal-ruido (SNR) negativas cercanas a -30 Decibel (dB, *decibel*)³⁵, así como alcances intercontinentales empleando potencias inferiores a 1 W, lo que evidencia que en bandas HF la detectabilidad y la robustez resultan más relevantes que la tasa de transmisión de datos (Taylor & Walker, 2010; Taylor, 2017).

³³ Modulación por desplazamiento en frecuencia (FSK / 4-FSK, *Frequency-Shift Keying* / 4-*Frequency-Shift-Keying*): Técnica de modulación digital en la que la información se representa mediante cambios discretos de frecuencia de la portadora; en FSK convencional se emplean dos frecuencias, mientras que en 4-FSK se usan cuatro frecuencias distintas para representar dos bits por símbolo (International Electrotechnical Commission, s.f., IEV 702-06-47).

³⁴ Intercalado (*interleaving*): Técnica utilizada en comunicaciones digitales para redistribuir en el tiempo o en la secuencia los bits o símbolos transmitidos, de modo que los errores que ocurren en ráfagas en el canal se dispersen al llegar al receptor. Al convertir un conjunto de errores concentrados en errores aislados, permite que los códigos de corrección de errores operen con mayor eficacia, mejorando la confiabilidad (Stallings, 2016).

³⁵ Decibel (dB, *decibel*): Unidad logarítmica empleada para expresar la relación entre dos magnitudes, generalmente niveles de potencia o amplitud, definida como una décima parte de un bel. Su uso permite representar variaciones muy grandes mediante escalas compactas, y se aplica a ganancia, atenuación, potencia radiada, niveles de señal y relaciones señal-ruido (International Electrotechnical Commission, s.f., IEV 702-07-02).

En cuanto a las bandas, el espectro RF se organiza (según UIT) en rangos con propiedades de propagación diferenciadas. Las bandas VLF y LF (3–300 kHz) tienden a propagarse como ondas de superficie y son utilizadas para comunicaciones submarinas y navegación. La banda MF (300 kHz–3 MHz) alberga, entre otros, la radiodifusión AM. Las bandas HF (3–30 MHz) son particularmente relevantes para la presente por su capacidad de propagarse mediante reflexión/refracción ionosférica, posibilitando comunicaciones intercontinentales sin infraestructura intermedia. En VHF (30–300 MHz) y UHF (300 MHz–3 GHz) predomina la propagación directa o por línea de vista (LOS) y, aunque ofrecen mayores tasas de datos y mejor previsibilidad del canal, no resuelven por sí mismas el problema del gran alcance sin infraestructura.

1.2.3 – PROPAGACIÓN DE SEÑALES DE RADIO

La propagación de las ondas de radio puede darse a través de diferentes modos de propagación, dependiendo de la interacción de la señal con la superficie terrestre, la atmósfera baja o la ionosfera.

Estos modos –onda de superficie³⁶, propagación troposférica³⁷ y propagación ionosférica– determinan el alcance y la estabilidad de las comunicaciones en cada banda. La figura 01 resume gráficamente dichos modos de propagación.

Las señales de HF (3–30 MHz) presentan un rasgo distintivo: su interacción con la ionosfera, región de la atmósfera ionizada por la radiación solar que se extiende, aproximadamente, entre los 60 y los 1.000 km de altitud. Esta región se estructura en capas diferenciadas, convencionalmente denominadas D, E y F; esta última puede subdividirse en F1 y F2 durante el período diurno, como se ilustra en la figura 02. Esta estructura varía diurna, estacional y cíclicamente (en concordancia con el ciclo solar (solar cycle)³⁸) y permite que las ondas de HF se refracten (o “salten”), retornando a tierra a miles de kilómetros del punto de emisión (Davies, 1990).

La capa D, presente durante el día, introduce absorción significativa en frecuencias más bajas, mientras que las capas F1 y F2 facilitan los enlaces de largo alcance; por la

³⁶ Onda de superficie: Modo de propagación de una señal de radio en el cual la onda electromagnética se desplaza siguiendo la curvatura de la superficie terrestre (Unión Internacional de Telecomunicaciones [UIT], 2020).

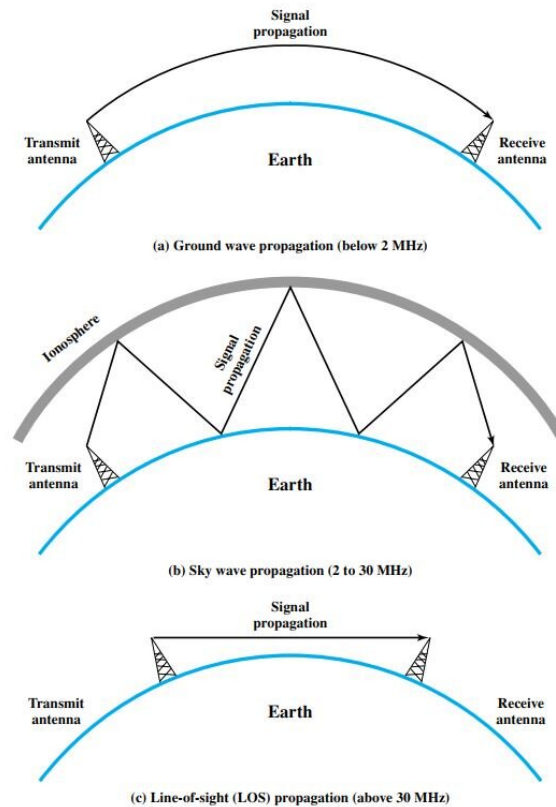
³⁷ Propagación troposférica: Mecanismo de propagación de señales de radio que ocurre en la troposfera, la capa más baja de la atmósfera terrestre (aproximadamente hasta los 10–15 km de altitud), donde las variaciones de temperatura, presión y humedad producen fenómenos de refracción, dispersión o ductos troposféricos que pueden extender el alcance de la señal (Unión Internacional de Telecomunicaciones [UIT], 2020).

³⁸ Ciclo solar (*solar cycle*): Variación periódica de aproximadamente 11 años en la actividad magnética del Sol, caracterizada por cambios en la cantidad de manchas solares, fulguraciones y emisión de radiación ultravioleta y rayos X. Estas variaciones modulan la ionización de las capas superiores de la atmósfera terrestre, afectando directamente la densidad electrónica de la ionosfera y, por tanto, la propagación de ondas de alta frecuencia (Davies, 1990).

noche, la desaparición de la capa D reduce la atenuación y favorece trayectos más extensos.

Figura 01

Modos de propagación de ondas de radio (Wireless propagation modes)



Nota. El gráfico representa los modos de propagación de las ondas de radio: la onda de tierra (*ground wave*), que se desplaza siguiendo la superficie terrestre; de salto ionosférico (*sky wave*), que se refleja en la ionósfera que permite grandes distancias; y la propagación en línea de vista (*line of sight*), utilizada en comunicaciones directas. Reproducido de *A comprehensive notes on computer network* por D. Ghemosu, 2023, ResearchGate https://www.researchgate.net/publication/369542690_A_Comprehensive_Notes_on_Computer_Network

La planificación de enlaces en HF recurre a parámetros operativos como la Frecuencia Máxima Utilizable (MUF)³⁹, la Frecuencia Mínima Utilizable (LUF)⁴⁰ y la Frecuencia Óptima de Trabajo (FOT). Una regla operativa ampliamente adoptada considera

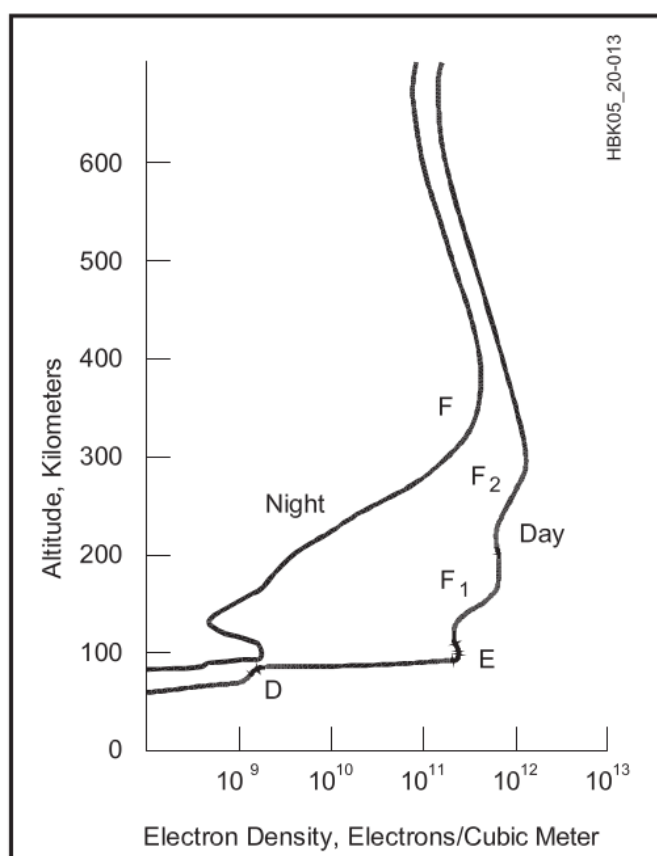
³⁹ Máxima Frecuencia Utilizable (MUF, *Maximum Usable Frequency*): Frecuencia más alta a la que una señal de radio puede ser transmitida entre dos puntos mediante propagación ionosférica, de modo tal que la ionosfera aún la refracte suficientemente para que alcance el destino. Por encima de la MUF, la señal atraviesa la ionosfera sin regresar a la Tierra (Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Radiocomunicaciones [UIT–R], 2019, Recommendation ITU–R P.373).

⁴⁰ Frecuencia Mínima Utilizable (LUF, *Lowest Usable Frequency*): Frecuencia más baja a la que la señal puede ser transmitida entre dos puntos mediante propagación ionosférica con un nivel aceptable de relación señal–ruido. Por debajo de la LUF, la absorción ionosférica y el ruido atmosférico hacen que la señal no sea utilizable (Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Radiocomunicaciones [UIT–R], 2019, Recommendation ITU–R P.373).

a la FOT⁴¹ como un porcentaje de la MUF ($\approx 85\%$), con el fin de mitigar el riesgo de pérdida del trayecto cuando la MUF desciende, fenómeno esperable por la variabilidad ionosférica (UIT-R, 2019; Davies, 1990). La Recomendación UIT-R P.533 compila una metodología de predicción de propagación en HF para estimar probabilidades de enlace, trayectos, pérdidas y márgenes operativos.

Figura 02

Distribución de densidad electrónica en regiones ionosféricas



Nota. Reproducida de The ARRL Handbook for Radio Communications 2022, por ARRL, 021, cap. 19, fig. 19.13, p. 743.

El comportamiento de la propagación en HF depende de múltiples factores físicos que influyen en la atenuación, refracción y estabilidad del enlace radioeléctrico. Tal como se indicó al describir los requisitos de robustez y confiabilidad en sistemas de telemetría

⁴¹ Frecuencia Óptima de Trabajo (FOT, *Optimum Working Frequency*): Frecuencia recomendada para establecer comunicaciones ionosféricas confiables, típicamente calculada como un porcentaje de la MUF (aproximadamente el 80–85 %), proporcionando un compromiso entre estabilidad del enlace, variabilidad ionosférica y probabilidad de desvanecimientos (Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Radiocomunicaciones [UIT–R], 2019, Recommendation ITU–R P.373).

(Sección 1.1), que incluyen resistencia frente a ruido, interferencias y fenómenos de fading, el fading selectivo constituye una manifestación específica de la propagación multitrayectoria en bandas HF. Este fenómeno se produce por interferencias entre trayectorias múltiples con diferentes retardos y fases, generando variaciones rápidas y profundas en la amplitud y fase de la señal recibida.

La multitrayectoria resulta en superposiciones constructivas o destructivas de la misma señal. La absorción ionosférica, especialmente en la capa D, puede “apagar” bandas enteras durante el día. La capa esporádica-E (Es), caracterizada por la aparición de “nubes” altamente ionizadas en la capa E, habilita trayectos inusuales, pero también puede bloquear enlaces esperados. El fenómeno Línea gris (grey line, *terminator propagation*)⁴², vinculado al día-noche, genera ventanas temporales de propagación mejorada.

La propagación de señales de alta frecuencia está fuertemente condicionada por la actividad solar. En particular, el ciclo solar determina los niveles de ionización de la ionosfera, lo que impacta directamente en la distancia y calidad de las comunicaciones. Durante los años de máximo solar, la mayor cantidad de radiación ultravioleta incrementa la ionización de las capas superiores de la atmósfera, habilitando enlaces de largo alcance en bandas altas como 10 o 15 metros. En contraste, durante los mínimos solares, esas bandas experimentan condiciones menos favorables o incluso quedan inutilizables para la propagación por salto ionosférico (Davies, 1990).

El ruido radioeléctrico constituye otro factor crítico en HF. La UIT-R P.372 ofrece modelos para cuantificar los niveles de ruido por tipo de entorno (urbano, suburbano, rural, industrial) y por frecuencia, lo que permite establecer pisos de ruido esperados y dimensionar márgenes de diseño (Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Radiocomunicaciones [UIT–R], 2019, Recommendation ITU–R P.373). La relación señal-ruido (SNR) es la métrica más intuitiva para caracterizar la calidad de un enlace, pero para comparar esquemas de modulación y codificación resulta más informativo utilizar relaciones normalizadas como energía por bit, que desacopla la comparación del ancho de banda. En modos de señal débil, es frecuente operar con índices SNR de valor negativo al medir sobre anchos de banda de referencia relativamente grandes (por ejemplo, 2,5 kHz), al tiempo que la señal útil ocupa solo unos pocos hertz y su decodificación depende de FEC, sincronización e interleaving que permiten extraer información “sumergida” en el ruido (Taylor & Walker, 2010; Taylor, 2017).

Estos modos de propagación determinan qué bandas son más efectivas para las comunicaciones a larga distancia en distintos momentos del día. Todos estos factores

⁴² Línea gris (grey line, *terminator propagation*): Franja crepuscular entre el día y la noche en la que la absorción ionosférica en la capa D disminuye drásticamente mientras que las capas E y F permanecen ionizadas, creando trayectos de propagación HF particularmente eficientes hacia regiones del mundo que se encuentran bajo esa transición (American Radio Relay League, 2020).

justifican diseños robustos que combinen selección dinámica de frecuencia, repetición temporal, codificación con FEC, sincronización estricta y detección coherente.

1.2.4 – COMPARACIÓN CON OTRAS BANDAS

La comparación entre HF y las bandas superiores (VHF/UHF) permite comprender que HF habilita alcance global sin infraestructura intermedia, condición decisiva en entornos remotos, rurales, insulares o de difícil acceso, donde desplegar redes celulares, microondas o satelitales puede ser económica o logísticamente inviable.

Esta comparación se resume en la Tabla 02, donde se presentan de manera sistemática las principales diferencias técnicas entre la banda HF y las bandas VHF/UHF en términos de alcance, necesidad de línea de vista, ancho de banda, niveles de ruido, variabilidad, costo energético y usos típicos.

Tabla 02

Comparación de bandas HF, VHF y UHF en aplicaciones de radiocomunicaciones

Criterio	HF (3–30 MHz)	VHF/UHF (30–3.000 MHz)
Alcance sin infraestructura	Alto (hasta miles de km por propagación ionosférica)	Bajo (generalmente hasta 50 km sin repetidores)
Necesidad de línea de vista (LOS)	No requerida (puede rebotar en la ionosfera)	Requerida (propagación directa o reflejada en obstáculos)
Ancho de banda típico	Estrecho (3–30 kHz en la mayoría de los usos)	Amplio (puede superar los MHz según servicio)
Niveles de ruido esperados	Altos (atmosférico y artificial, especialmente en zonas urbanas)	Bajos a moderados, más predecibles y constantes
Variabilidad temporal	Alta (dependiente de condiciones solares, hora del día, estaciones)	Baja (poco afectada por factores ionosféricos)
Costo energético por bit transmitido	Bajo a moderado (menor potencia pero menor eficiencia espectral)	Alto (más potencia y ancho de banda, pero mejor tasa de datos)
Casos de uso típicos	Larga distancia, radioaficionados, militares y marítimos	Radiocomunicaciones locales, TV, FM, Wi-Fi, telefonía móvil

Las ventajas de HF tienen de limitaciones severas: ancho de banda reducido, ruidos altos, variabilidad temporal, fading y requisitos de protocolos extremadamente robustos para sostener telemetría con SNR negativas (Davies, 1990; International Telecommunication Union Radiocommunication Sector, 2019, 2021).

Por el contrario, VHF y UHF ofrecen mayores tasas de datos, menor susceptibilidad al ruido atmosférico, previsibilidad del canal y disponibilidad de tecnologías maduras (FM,

LTE/5G, Wi-Fi), pero dependen de infraestructura para cubrir grandes áreas y no atraviesan la curvatura terrestre sin repetidores, ducto troposférico (tropospheric duct, tropospheric ducting)⁴³ o satélites.

Bajo este panorama, el uso de HF combinado con modos de señal débil como WSPR se revela como una estrategia técnica coherente para telemetría remota de muy baja tasa de bit: maximiza el alcance, minimiza el consumo y la huella espectral, tolera SNR extremadamente bajas y se ajusta a marcos regulatorios existentes que reservan espacios específicos para estos modos (Taylor & Walker, 2010; Taylor, 2017).

La contracara (baja capacidad por enlace, sincronización estricta, tiempos de transmisión largos) es aceptable cuando la prioridad es la entrega eventual y confiable de pequeños volúmenes de datos en escenarios hostiles o desconectados (Davies, 1990).

1.3 – CODIFICACIÓN DE DATOS

La codificación de datos es un pilar en los sistemas de transmisión digital, tal como explican Proakis y Salehi (2008) y Sklar (2001) en sus textos clásicos de comunicaciones, y adquiere especial relevancia cuando el canal posee restricciones severas de ancho de banda, potencia y confiabilidad. Esta situación se presenta en el dominio radioeléctrico por debajo de 30 MHz, donde –como describe Davies (1990) y lo cuantifican las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Radiocomunicaciones [UIT–R], (2019)– el ruido atmosférico, las interferencias artificiales, la variabilidad de la propagación y las latencias impredecibles obligan a emplear técnicas de codificación robustas que garanticen integridad, eficiencia espectral y trazabilidad de la información.

En términos de la teoría de la información, Shannon (1948) planteó que codificar significa transformar los datos fuente en una secuencia binaria optimizada para su transmisión o almacenamiento. En comunicaciones digitales, este concepto se organiza en tres etapas principales (Proakis y Salehi (2008) y Sklar (2001)) que pueden superponerse en la pila de protocolos:

- Codificación de fuente: elimina redundancias estadísticas para reducir el volumen de datos (también llamado compresión de datos⁴⁴).

⁴³ Ducto troposférico (*tropospheric duct, tropospheric ducting*): Fenómeno de propagación anómala que ocurre cuando se forma en la troposfera una capa con un fuerte gradiente negativo de refractividad –generalmente debido a inversiones de temperatura, humedad o ambos– que actúa como una guía de onda natural. En estas condiciones, las ondas de radio pueden quedar confinadas dentro de la capa, propagándose a distancias mucho mayores que las previstas por el modelo de línea de vista, con atenuación reducida y trayectorias cuasi–horizontales. Este efecto puede extender significativamente el alcance en bandas VHF, UHF y microondas (Davies, 1990).

⁴⁴ Compresión de datos (*data compression*): Técnica destinada a reducir la cantidad de bits necesarios para representar información, eliminando redundancias estadísticas o estructurales presentes en los datos originales. La compresión puede ser sin pérdida –cuando la información

- Codificación de canal: agrega redundancia controlada para detectar y corregir errores sin necesidad de retransmisión.
- Codificación de línea: adapta la secuencia binaria al medio físico, para que pueda transmitirse de manera confiable.

En cualquier sistema de comunicaciones existen dos fuerzas en tensión: por un lado, la necesidad de reducir al mínimo la cantidad de bits que se envían (para ahorrar tiempo, ancho de banda y energía); por otro, la necesidad de proteger esos bits contra los errores que introduce el canal. Los tres conceptos fundamentales que permiten equilibrar esa tensión son redundancia, corrección de errores y compresión. Aunque se relacionan, cumplen objetivos distintos y conviene definirlos con precisión antes de elegir una técnica u otra.

1.3.1 – REDUNDANCIA

Una secuencia binaria contiene redundancia si posee más bits de los necesarios para representar la información. Esa redundancia es de tipo:

- Involuntaria: surge de la naturaleza estadística de los datos (por ejemplo, un sensor de temperatura solo produce un subconjunto pequeño de todos los valores posibles).
- Deliberada: se introduce a propósito para cumplir algún objetivo, como detectar o corregir errores en la transmisión.

En canales ruidosos, la redundancia deliberada es indispensable: permite que el receptor reconozca que algo se alteró y, en muchos casos, reconstruya el mensaje original sin necesidad de pedir una retransmisión. El precio es un aumento en la cantidad total de bits enviados. Cuánto redundar y de qué manera depende de la calidad del canal y de las restricciones energéticas del sistema (Hamming, 1950; Reed & Solomon, 1960).

1.3.2 – CORRECCIÓN DE ERRORES

Cuando los bits redundantes se diseñan para reparar la información dañada, estamos en presencia de un método de corrección de errores. Existen dos enfoques:

- Automatic Repeat reQuest (ARQ)
 - El receptor envía un mensaje de confirmación (ACK) cuando recibe la trama.

reconstruida es idéntica a la original– o con pérdida, cuando se descartan partes consideradas perceptualmente irrelevantes para lograr tasas de compresión mayores (Tanenbaum & Wetherall, 2011).

- Si detecta errores mediante un código de detección (por ejemplo, Verificación por Redundancia Cíclica (CRC, *Cyclic Redundancy Check*)⁴⁵), solicita la retransmisión.
- Resulta práctico cuando la latencia es baja y la tasa de error moderada.
- Forward Error Correction (FEC)
 - Los bits de redundancia se agregan de modo que el receptor pueda corregir los errores sin solicitar retransmisión.
 - Fundamental cuando el canal tiene alta latencia o es asimétrico (por ejemplo, transmisión unidireccional en HF).
 - Ejemplos habituales: códigos Hamming⁴⁶, Viterbi⁴⁷, Reed–Solomon⁴⁸, LDPC⁴⁹.

Una forma intuitiva de medir la fuerza de corrección de un código es mediante la tasa de código (por ejemplo 1/2 o 3/4). Un código 1/2 significa “por cada bit útil se transmite un bit extra de redundancia”; un código 3/4 añade menos protección, pero ocupa menos ancho de banda. El diseñador escoge la tasa según la probabilidad esperada de error y el margen de energía disponible. En HF, donde la SNR puede caer a –20 dB o peor, se aceptan tasas bajas (más redundancia) a cambio de fiabilidad.

1.3.3 – COMPRESIÓN DE DATOS

La compresión de datos busca eliminar la redundancia estadística del mensaje, obteniendo como beneficio reducir el tamaño antes de la transmisión. Cuando se aplica correctamente, el receptor recupera la información exacta (compresión sin pérdida o *lossless*⁵⁰).

⁴⁵ Verificación por Redundancia Cíclica (CRC, *Cyclic Redundancy Check*): Mecanismo de detección de errores que trata la secuencia de bits transmitida como un polinomio y calcula un residuo mediante división polinómica en aritmética módulo 2. El emisor añade este residuo como campo de verificación, y el receptor repite el cálculo: si los residuos coinciden, se asume que no hubo errores en la transmisión; si difieren, se detecta la alteración de los datos. CRC ofrece alta capacidad de detección de errores, con costo computacional reducido (Stallings, 2016).

⁴⁶ Códigos Hamming: familia de códigos de detección y corrección de errores introducida por Hamming (1950), que emplea bits de paridad adicionales para identificar y corregir errores de un solo bit en la transmisión digital (Hamming, 1950).

⁴⁷ Algoritmo Viterbi: método óptimo para decodificación de códigos convolucionales basado en programación dinámica (Viterbi, 1967).

⁴⁸ Códigos Reed–Solomon: clase de códigos de corrección de errores introducida por Reed y Solomon (1960), que trabajan sobre bloques de símbolos y permiten detectar y corregir múltiples errores en ráfaga, siendo ampliamente utilizados en discos ópticos, comunicaciones satelitales y estándares digitales (Reed & Solomon, 1960).

⁴⁹ LDPC (Low–Density Parity–Check codes): códigos con decodificación iterativa, capaces de operar cerca del límite teórico de Shannon (Gallager, 1963).

⁵⁰ Compresión *lossless*: método que elimina redundancias estadísticas de los datos y permite reconstruir exactamente la información original al descomprimir. Si no existen redundancias, no es posible reducir el tamaño sin pérdida de información (Shannon, 1948; Proakis & Salehi, 2008).

Algoritmos clásicos como Huffman⁵¹, LZ77⁵² o DEFLATE⁵³ examinan patrones de repetición y producen secuencias más cortas sin alterar el significado (Huffman, 1952; Lempel & Ziv, 1977; Deutsch, 1996). En flujos de telemetría típicos (donde las lecturas cambian lentamente) la ganancia de compresión (*compression gain* / *compression ratio*)⁵⁴ puede rondar el 40 %, disminuyendo en igual medida el uso de canal sin pérdida de información (Stallings, 2016).

Usar compresión requiere tiempo de CPU y, en consecuencia, aumenta la demanda energética. En nodos alimentados por baterías o paneles solares, este costo debe balancearse frente a la ganancia de ancho de banda que aporta la reducción de datos.

1.4 – MAGNITUDES Y UNIDADES

En ciencias e ingeniería, una magnitud es un atributo físico de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede distinguirse cualitativamente y cuantificarse numéricamente. Ejemplos habituales de magnitudes son la frecuencia de una señal, la potencia radiada, la temperatura, la tensión eléctrica o la distancia. Cada magnitud describe una propiedad física concreta del sistema observado.

La revisión comparada se efectuó en el marco de la presente investigación sobre la documentación pública y especificaciones de referencia de cada estándar, considerando su alcance temático, disponibilidad de esquemas de codificación y adecuación a representaciones compactas.

Para expresar una magnitud de manera cuantitativa es necesario asociarla a una unidad de medida. Una unidad es un patrón definido por convenio internacional que permite asignar un valor numérico comparable a una magnitud determinada.

Las unidades no constituyen magnitudes en sí mismas, sino referencias estandarizadas que garantizan coherencia, trazabilidad y comparabilidad en los procesos de medición. Ejemplos de unidades ampliamente adoptadas son el watt (W) para potencia, el ampere (A) para corriente y el grado Celsius (°C) para temperatura.

La distinción entre magnitud y unidad es fundamental en cualquier sistema de representación técnica. Sin unidades no sería posible expresar cuantitativamente

⁵¹ Huffman: algoritmo de compresión sin pérdida que asigna códigos de longitud variable según la frecuencia de los símbolos, reduciendo la longitud total del mensaje (Huffman, 1952).

⁵² LZ77: método de compresión que sustituye repeticiones en el flujo de datos por referencias a ocurrencias anteriores, logrando reducción sin pérdida (Lempel & Ziv, 1977).

⁵³ DEFLATE: formato de compresión que combina el reemplazo de secuencias repetidas de LZ77 con la codificación de Huffman para mayor eficiencia (Deutsch, 1996).

⁵⁴ Ganancia de compresión (*compression gain* / *compression ratio*): Medida que cuantifica la reducción del tamaño de un conjunto de datos después de aplicar un algoritmo de compresión. Se expresa como la relación entre el tamaño original y el tamaño comprimido, indicando cuántas veces se ha reducido la información. Valores mayores representan un mayor ahorro en almacenamiento o ancho de banda, y dependen tanto del tipo de datos como del método de compresión empleado (Stallings, 2016).

propiedades físicas; sin magnitudes, no existirían atributos medibles a los cuales aplicar dichas unidades.

Con el fin de analizar esquemas existentes de representación estructurada de magnitudes y unidades, se realizó una revisión documental de normas técnicas y catálogos utilizados en ámbitos científicos, industriales y de intercambio de datos. El análisis consideró estándares de amplia adopción internacional, entre ellos:

- ISO y ANSI/IEEE: proporcionan el marco del Sistema Internacional de Unidades (SI) y normas técnicas sectoriales, pero ninguno ofrece un repertorio transversal de magnitudes que pueda emplearse.
- IEC (International Electrotechnical Commission): mantiene el Vocabulario Electrotécnico Internacional (IEC 60050), útil como referencia terminológica, pero sin codificación y por lo tanto no aplicable.
- IARU y entornos radioaficionados: se concentran en la asignación de frecuencias, modos y bandas, sin ofrecer catálogos de magnitudes ambientales, eléctricas o meteorológicas.

Asimismo, dentro del análisis bibliográfico realizado, se consideraron catálogos sectoriales que incluyen codificaciones específicas de magnitudes y unidades, entre ellos:

- WQX (*Water Quality eXchange*): utilizado por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. para codificar parámetros de calidad de agua.
- WMO (*World Meteorological Organization*): esquema internacional adoptado para reportes meteorológicos y climatológicos.
- UN/CEFACT: nomenclatura mantenida por Naciones Unidas para el intercambio electrónico de datos comerciales y técnicos.
- UCUM (*Unified Code for Units of Measure*): iniciativa independiente que provee códigos unificados de unidades, asegurando interoperabilidad en contextos médicos, científicos e industriales.

Del análisis conceptual de estos sistemas surge que, aunque cada uno resulta adecuado en su ámbito particular, ninguno ofrece un catálogo transversal directamente adaptable a entornos con restricciones severas de longitud de mensaje.

En este contexto, la problemática no radica únicamente en la identificación de magnitudes y unidades, sino en su representación eficiente dentro de sistemas con restricciones operativas. En particular, los entornos de telemetría de baja tasa de datos requieren minimizar la longitud de los mensajes sin perder precisión ni capacidad de interpretación. Esto implica reducir la redundancia inherente a las representaciones

textuales y adoptar esquemas de codificación que prioricen la compacidad, manteniendo al mismo tiempo la consistencia semántica de los datos transmitidos.

En consecuencia, resulta necesario definir un modelo de representación que permita asociar cada magnitud a un identificador numérico reducido y que contemple mecanismos para expresar su valor y unidad de forma implícita o normalizada. Este enfoque posibilita optimizar el uso del canal de transmisión, facilitando la integración de múltiples variables dentro de estructuras de datos altamente limitadas, como las empleadas en protocolos de transmisión de muy baja velocidad.

1.5 – SÍNTESIS CONCEPTUAL Y VINCULACIÓN CON EL PROBLEMA

Los conceptos desarrollados en el presente capítulo –propagación en HF, modulación digital robusta, comportamiento frente a fading y principios de telemetría remota– constituyen el sustento teórico que permite analizar críticamente el protocolo WSPR en el capítulo siguiente.

En particular, la necesidad de operar con bajo consumo energético, alta robustez ante SNR negativas y capacidad de propagación ionosférica intercontinental configura el marco dentro del cual se evaluará la viabilidad de reutilizar WSPR como canal de telemetría de muy baja tasa de bit.

CAPÍTULO 2 – ANÁLISIS DEL PROTOCOLO WSPR

El presente capítulo desarrolla el marco técnico de referencia sobre el protocolo Weak Signal Propagation Reporter (WSPR), con el propósito de comprender en detalle su diseño, funcionamiento y características fundamentales. Mientras que el capítulo anterior abordó los conceptos generales de radiocomunicación en alta frecuencia (HF) y los distintos modos de propagación, el presente se centra en un protocolo digital específico que ha transformado la manera en que la comunidad radioaficionada y científica estudia las condiciones de propagación ionosférica.

Aunque existen otros modos de la familia WSJT-X que también logran comunicaciones robustas –como JT9, JT65, FT8 o QRA64– WSPR resulta el modo óptimo cuando el objetivo es maximizar la detectabilidad con potencias ínfimas, minimizar el uso del espectro y obtener mediciones consistentes sobre la propagación ionosférica. Su equilibrio entre SNR, ancho de banda estrecho y codificación eficiente lo convierte en el protocolo más adecuado para aplicaciones de telemetría de señal débil en HF (Taylor, Franke & Somerville, 2017).

El análisis de WSPR en este capítulo es de carácter conceptual y descriptivo. Se revisan sus principios de diseño, la estructura del mensaje y los requisitos técnicos de hardware y sincronización que permiten su funcionamiento, así como las ventajas y limitaciones que lo distinguen frente a otros modos digitales. Se describen sus principios de diseño, la arquitectura del mensaje y los requisitos técnicos que posibilitan su funcionamiento, con el fin de proporcionar la base conceptual necesaria para el análisis de desempeño del protocolo.

2.1 – EL PROTOCOLO WEAK SIGNAL PROPAGATION REPORTER

Dentro de los modos digitales desarrollados para comunicaciones de señal débil en alta frecuencia, el protocolo Weak Signal Propagation Reporter (WSPR) ocupa un lugar particular debido a su orientación específica hacia el estudio sistemático de la propagación ionosférica mediante transmisiones de muy baja potencia.

WSPR fue desarrollado en 2008 por el Dr. Joseph H. Taylor (Premio Nobel de Física y radioaficionado con indicativo K1JT) como parte del ecosistema de herramientas digitales destinadas a la experimentación en HF. Inicialmente distribuido como aplicación independiente y posteriormente integrado al entorno WSJT-X, el protocolo fue concebido como un sistema de balizas digitales de potencia ultrabaja orientado a registrar y analizar condiciones de propagación a escala global.

La comunidad radioaficionada lo adoptó rápidamente como herramienta de experimentación técnica, y con el tiempo su uso se extendió a ámbitos académicos y de

investigación ionosférica, donde comenzó a emplearse como una red distribuida de observación de propagación (Taylor & Walker, 2010; Taylor, 2017).

WSPR emplea un paradigma unidireccional: una estación transmite, múltiples receptores distribuidos globalmente escuchan la señal y reportan los resultados al servidor público WSPRnet. El resultado es una base de datos mundial con millones de registros diarios, que incluyen señal distintiva, posición aproximada (grid locator), hora, frecuencia, relación señal–ruido (SNR) y potencia declarada.

Esta infraestructura colaborativa constituye una fuente de datos ampliamente utilizada para el análisis empírico del comportamiento del protocolo. Asimismo, diversos estudios han empleado esta base para correlacionar la densidad de decodificaciones con parámetros solares (Índice planetario (Kp)⁵⁵, Índice de flujo solar (Solar Flux Index, SFI / F10.7)⁵⁶) y modelar en tiempo real la apertura de bandas.

2.2 – PRINCIPIOS DE DISEÑO

Este protocolo fue diseñado bajo criterios específicos orientados a garantizar la comunicación en condiciones de señal débil (Taylor & Walker, 2010; Taylor, 2017). Entre ellos se destacan:

- Señal extremadamente estrecha: ocupa ~6 Hz, lo que posibilita que decenas de WSPR estén activos en solo 200 Hz de espectro.
- Frame largo y sincronizado: 110,6 s alineados a minutos pares según Tiempo Universal Coordinado (Coordinated Universal Time, UTC)⁵⁷; así se maximiza la ganancia de proceso y se evita solapamiento.
- Codificación robusta: combinación de compresión, FEC de tipo código convolucional (convolutional code)⁵⁸, interleaving y vector de sincronía, que confiere tolerancia a $SNR \approx -30$ dB en 2,5 kHz de referencia y desviaciones máximas de $\pm 1,5$ s.
- Infraestructura abierta: software y protocolo publicados con licencia libre; la base WSPRnet admite consultas API y descarga de datos para análisis académico.

⁵⁵ Índice planetario (Kp): indicador global del nivel de perturbación geomagnética de la Tierra, expresado en una escala de 0 (quieto) a 9 (severamente perturbado), utilizado para estimar la estabilidad del canal ionosférico en comunicaciones HF (American Radio Relay League, 2019).

⁵⁶ Índice de flujo solar (Solar Flux Index, SFI / F10.7): medida estándar de la actividad solar basada en la radiación emitida por el Sol a 2800 MHz –longitud de onda 10,7 cm–, donde valores elevados indican mayor ionización ionosférica y, usualmente, mejores condiciones de propagación en HF (American Radio Relay League, 2019).

⁵⁷ Tiempo Universal Coordinado (Coordinated Universal Time, UTC): escala de tiempo basada en el tiempo atómico internacional y ajustada mediante segundos intercalares para mantener su diferencia dentro de $\pm 0,9$ s (International Electrotechnical Commission, s.f., IEC 713–05–20).

⁵⁸ Código convolucional (convolutional code): esquema de codificación de canal donde cada bit de salida depende no solo del bit de entrada actual sino también de un conjunto de bits anteriores, proporcionando redundancia distribuida en el tiempo que mejora la capacidad de corrección de errores en enlaces ruidosos (Stallings, 2016).

- Autonomía operativa: sin proceso de negociación inicial (*handshaking*)⁵⁹ ni confirmación de recepción (ACK, acknowledgment)⁶⁰; perfecta para enlaces unidireccionales, enlaces diferidos o plataformas de energía limitada.

2.2.1 – DETALLE DE LA TRAMA DEL MENSAJE

- Cabecera (vector de 162 bits de Secuencia pseudoaleatoria (pseudorandom sequence)⁶¹): Proporciona autocorrelación marcada; facilita la búsqueda por transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT)⁶² incluso cuando la señal está oculta en el ruido.
- Bloque de datos comprimidos (50 bits):
 - Indicativo: 28 bits (alfabeto 36 símbolos + “/”).
 - Grid Maidenhead⁶³ (4 car.): 15 bits (12 × 12 km).
 - Potencia en dBm⁶⁴: 7 bits (1 dB por paso, 0–60 dBm).
- Codificador convolucional: aplica tasa 1/2 y duplica los bits de 50 a 100, proporcionando cerca de 7 dB de ganancia con algoritmo de Viterbi.
- Interleaver: Permuta la secuencia para transformar errores en ráfaga en errores aleatorios más fáciles de corregir.
- Mapeo 4-FSK: cada par de bits se representa mediante uno de cuatro tonos distintos, espaciados 1,4648 Hz entre sí, de modo que la secuencia se convierte en una señal compuesta por saltos de frecuencia estrechamente separados.
- Duración de 110,6 s: Se emiten 324 símbolos; la baja tasa de símbolos concentra energía en el ancho de 6 Hz.
- Decodificación: El receptor usa ventanas FFT de 1,46 s, localiza el vector de sincronía, corre Viterbi y recupera los 50 bits.

⁵⁹ Proceso de negociación inicial (*handshaking*): procedimiento mediante el cual dos sistemas intercambian mensajes de coordinación para acordar los parámetros de la comunicación antes de transferir datos (Tanenbaum & Wetherall, 2011).

⁶⁰ Confirmación de recepción (ACK, acknowledgment): mensaje enviado por el receptor para indicar que un paquete o trama fue recibido correctamente, permitiendo control de flujo y recuperación frente a pérdidas (Tanenbaum & Wetherall, 2011).

⁶¹ Secuencia pseudoaleatoria (pseudorandom sequence): serie de bits generada mediante un algoritmo determinístico que aparenta ser aleatoria, utilizada en comunicaciones digitales para dispersión, sincronización y control de errores (Stallings, 2016).

⁶² Transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT): algoritmo eficiente para calcular la transformada discreta de Fourier, permitiendo descomponer una señal en sus componentes frecuenciales con un costo computacional mucho menor que los métodos directos (Stallings, 2016).

⁶³ Locator Maidenhead (Maidenhead Grid Locator): sistema geográfico de codificación alfanumérica utilizado por radioaficionados para expresar posiciones en la superficie terrestre con distintos niveles de precisión, basado en divisiones sucesivas del globo en campos, cuadrados y subcuadrados (American Radio Relay League, 2021).

⁶⁴ dBm (decibel–milliwatt, decibel relative to one milliwatt): Unidad logarítmica de potencia expresada en decibelios referidos a un nivel de referencia de 1 milivatio (1 mW), definida como diez veces el logaritmo decimal del cociente entre la potencia considerada y 1 mW (International Electrotechnical Commission, s.f., IEV 702–07–02).

2.2.2 – REQUISITOS DE HARDWARE Y SINCRONIZACIÓN

- Reloj: ajustado por GPS⁶⁵, NTP⁶⁶ o PTP⁶⁷; ya que un desvío de más de un segundo provoca alineación fallida de símbolos.
- Estabilidad de frecuencia: $\pm 0,1$ ppm mediante un oscilador compensado en temperatura (Temperature–Compensated Crystal Oscillator, TCXO)⁶⁸. Esta precisión implica que en una señal de 10 MHz la desviación máxima aceptable es de apenas ± 1 Hz. Una deriva mayor desplaza los tonos de 4–FSK fuera de la ventana del decodificador basado en procesamiento digital de señales (DSP)⁶⁹, impidiendo su correcta detección.
- Ancho de banda del receptor: ≥ 200 Hz para monitorizar múltiples mensajes WSPR simultáneos.
- Potencia típica: de 50 mW a 1 W; se han logrado enlaces de 18.000 km con 50 mW en banda de 20 m y antena dipolo⁷⁰.

2.3 – ANÁLISIS DEL CÓDIGO FUENTE DEL PROTOCOLO

A partir del análisis estructural del mensaje WSPR y de las etapas internas de codificación presentadas en las secciones anteriores, la factibilidad de reutilizar el protocolo como canal de telemetría depende de identificar con precisión en qué punto del flujo se construye la carga útil de 50 bits y cómo se propaga esa información a través de los bloques de codificación y modulación. En consecuencia, el estudio se extiende desde la descripción conceptual del protocolo hacia la revisión del código fuente de referencia, con el objetivo de localizar el punto exacto donde resulta técnicamente viable redefinir la carga útil sin alterar el resto de la cadena de transmisión.

El protocolo Weak Signal Propagation Reporter (WSPR) se encuentra implementado dentro del entorno de software WSJT–X, desarrollado por J. H. Taylor (K1JT) y

⁶⁵ Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System, GPS): sistema satelital que proporciona posicionamiento, navegación y sincronización de tiempo con precisión mediante señales emitidas por una constelación de satélites en órbita (Stallings, 2016).

⁶⁶ Protocolo de Tiempo en Red (Network Time Protocol, NTP): protocolo diseñado para sincronizar relojes de sistemas conectados en una red mediante intercambios jerárquicos y recursivos de marcas temporales (Stallings, 2016).

⁶⁷ Protocolo de Tiempo de Precisión (Precision Time Protocol, PTP): protocolo para sincronización de alta precisión en redes Ethernet que utiliza marcas temporales hardware y compensación de retardos para alcanzar exactitud de microsegundos (Stallings, 2016).

⁶⁸ Oscilador compensado en temperatura (Temperature–Compensated Crystal Oscillator, TCXO): oscilador de cristal cuyo circuito incorpora una red de compensación que corrige las variaciones de frecuencia producidas por cambios de temperatura (Stallings, 2016).

⁶⁹ Procesamiento digital de señales (Digital Signal Processing, DSP): conjunto de técnicas y algoritmos que operan sobre señales digitalizadas para filtrarlas, analizarlas, transformarlas o mejorar su calidad mediante procesamiento computacional eficiente (Stallings, 2016).

⁷⁰ Antena dipolo (dipole antenna): antena simétrica compuesta por dos conductores usualmente rectilíneos alimentados por una línea balanceada (International Electrotechnical Commission, s.f., IECV 712–04–23).

colaboradores. La distribución oficial del programa incluye el código fuente, principalmente escrito en Fortran 90 con componentes auxiliares en lenguaje C, lo que permite examinar en detalle el flujo interno de codificación y modulación (Taylor, 2017; Taylor & Walker, 2010).

La revisión técnica de este código resulta fundamental para evaluar la factibilidad de introducir modificaciones orientadas a la transmisión de variables de telemetría, dado que en él se definen explícitamente las etapas que transforman los datos de entrada en una secuencia modulada apta para transmisión en radiofrecuencia.

El código de referencia se encuentra organizado en diversos módulos. Para el propósito específico de este trabajo –orientado a modificar la estructura del bloque de 50 bits– se identificaron como relevantes los siguientes archivos:

- `wsprcode.f90`: archivo principal en Fortran 90 que contiene las rutinas de codificación del mensaje WSPR, desde el empaquetado de los 50 bits de información útil hasta la aplicación de la codificación convolucional, interleaving y mapeo a 4-FSK presentados en la sección 1.2.2.
- `nhash.c`: archivo en lenguaje C que provee funciones auxiliares para convertir el indicativo de llamada en un valor numérico, de manera que pueda representarse dentro de los 28 bits asignados específicamente a ese campo en la estructura de 50 bits.

La arquitectura de WSJT-X contempla, además de los módulos de codificación, un subsistema encargado de transformar la secuencia de símbolos generados por el codificador en una señal de audio modulada, apta para ser enviada a la tarjeta de sonido del sistema y posteriormente al transmisor de radio (Taylor, 2017).

No obstante, dado que el objetivo del presente trabajo consiste en redefinir exclusivamente el contenido del bloque de 50 bits de información útil, el análisis se circunscribe a las etapas previas a la generación de audio. En consecuencia, las fases posteriores de codificación convolucional, interleaving, mapeo 4-FSK y síntesis de señal se mantienen inalteradas, de acuerdo con la documentación técnica del protocolo, dichas etapas operan independientemente del contenido semántico de la carga útil.

2.3.1 – EL CÓDIGO FUENTE DE NHASH.C

De acuerdo con la distribución oficial del código fuente de WSJT-X (Taylor, 2017), la conversión del indicativo de llamada en una representación binaria eficiente se implementa mediante el módulo `nhash.c`. Este archivo contiene la función hash encargada de transformar la cadena alfanumérica del indicativo en un valor entero dentro de un rango predefinido, el cual es posteriormente empaquetado en los 28 bits asignados al campo correspondiente dentro de la trama de 50 bits del protocolo.

El uso de una función hash garantiza dos propiedades importantes:

- Compacidad, al permitir que un conjunto de símbolos relativamente amplio se represente con un número fijo de bits.
- Determinismo, dado que la misma entrada siempre produce la misma salida, condición esencial para que la decodificación sea posible en el extremo receptor.

La comprensión de este mecanismo es crítica, porque abre la posibilidad de reemplazar el campo de indicativo por cualquier otra variable que pueda representarse numéricamente dentro del mismo rango. Desde una perspectiva funcional, el campo originalmente destinado al indicativo representa un contenedor binario de 28 bits. Por lo tanto, su contenido puede redefinirse para codificar identificadores de sensores, parámetros físicos o códigos numéricos específicos, respetando la estructura y limitaciones formales del protocolo.

2.3.2 – EL CÓDIGO FUENTE DE WSPRCODE.F90

Según la estructura del código fuente oficial de WSJT-X (Taylor, 2017), el archivo `wsprcode.f90` constituye el núcleo de la implementación del protocolo WSPR. Desarrollado en Fortran 90, este módulo organiza el flujo completo de codificación del mensaje y puede resumirse en las siguientes etapas:

- Lectura y validación de entradas: se reciben el indicativo, el grid locator y la potencia.
- Codificación en 50 bits:
 - El indicativo se convierte en un entero de 28 bits mediante `nhash`.
 - El grid locator se traduce a 15 bits según una fórmula de indexación.
 - La potencia se codifica en 7 bits con pasos de 1 dB.
- Codificación convolucional: se aplica un esquema con tasa 1/2, duplicando los 50 bits a 100 bits y proporcionando aproximadamente 7 dB de ganancia de proceso con el decodificador de Viterbi.
- Interleaving: los bits resultantes se permutan siguiendo un patrón predefinido, lo que convierte errores en ráfaga en errores distribuidos, más fáciles de corregir.
- Mapeo a símbolos 4-FSK: cada par de bits se asigna a uno de cuatro tonos espaciados 1,4648 Hz, lo que genera un total de 162 símbolos que se transmitirán durante 110,6 segundos.
- Preparación para el generador de audio: la secuencia de símbolos se entrega al bloque encargado de sintetizar la señal en banda base, que posteriormente será modulada en radiofrecuencia.

2.4 – VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL PROTOCOLO WSPR

El análisis estructural y funcional desarrollado en las secciones anteriores permite identificar un conjunto de características técnicas que definen el posicionamiento del protocolo WSPR dentro de los modos digitales de señal débil. Estas características pueden agruparse en ventajas operativas y limitaciones inherentes a su diseño original.

Desde el punto de vista técnico, WSPR concentra aproximadamente 110 segundos de transmisión dentro de un ancho de banda cercano a 6 Hz. Esta configuración implica una densidad espectral significativamente superior a la de una señal de voz distribuida en un canal típico de 3 kHz. La combinación de estrechez espectral, duración prolongada y codificación con corrección de errores (FEC) permite alcanzar niveles de sensibilidad cercanos a -28 dB referidos a 2,5 kHz (Taylor & Walker, 2010), lo que explica su capacidad de decodificación en condiciones extremas de señal débil.

En términos prácticos, esta eficiencia energética posibilita comunicaciones intercontinentales con potencias del orden de 1 W ERP⁷¹ e incluso transmisiones de pocos milivatios capaces de cubrir miles de kilómetros bajo condiciones ionosféricas favorables. Este comportamiento, ampliamente documentado en la red colaborativa WSPRnet, constituye una de las razones principales por las cuales el protocolo resulta atractivo para aplicaciones de bajo consumo.

2.4.1 – VENTAJAS ESTRATÉGICAS

- Uso espectral mínimo: un ancho de banda del orden de 6 Hz representa aproximadamente el 0,2 % de un canal SSB convencional de 3 kHz, lo que reduce significativamente la ocupación del espectro.
- Alta eficiencia energética: la posibilidad de operar con potencias inferiores a 2 W facilita la implementación de balizas alimentadas por pequeños paneles solares.
- Infraestructura global distribuida: la existencia de miles de receptores activos conectados a WSPRnet permite disponer de una red mundial de monitoreo sin necesidad de desplegar infraestructura propia.

2.4.2 – LIMITACIONES INHERENTES

- Unidireccionalidad: el protocolo no contempla confirmación de recepción ni canal de retorno, lo que lo excluye de aplicaciones de comando y control bidireccional.
- Carga útil rígida: la estructura fija de 50 bits limita severamente la cantidad y complejidad de datos transportables.

⁷¹ Potencia radiada efectiva (Effective Radiated Power, ERP): producto de la potencia suministrada por el transmisor a la antena y la ganancia de la antena con respecto a un dipolo de media onda en la dirección considerada (International Electrotechnical Commission, s.f., IEC 712-02-52).

- Dependencia temporal estricta: la sincronización precisa resulta crítica para la decodificación correcta.
- Latencia estructural: la duración del ciclo de transmisión introduce intervalos mínimos del orden de dos minutos entre mensajes consecutivos.

2.5 – EVALUACIÓN TÉCNICA DEL USO DE WSPR EN TELEMETRÍA

En función del análisis estructural del protocolo previamente desarrollado, puede sostenerse que WSPR resulta técnicamente adecuado para aplicaciones de telemetría de muy baja tasa de bit. Esta afirmación se fundamenta en tres elementos previamente examinados:

- su elevada eficiencia espectral, derivada del uso de 4-FSK con separación de tonos de aproximadamente 1,46 Hz y una tasa de símbolos cercana a 1,46 baud;
- su robustez frente a relaciones señal–ruido negativas, producto de la combinación entre transmisión prolongada (~110,6 s) y codificación con corrección de errores; y
- su arquitectura temporal sincronizada, que permite decodificación coherente aun con potencias reducidas del orden de 50 mW a 1 W, manteniendo alcances intercontinentales en condiciones favorables (Taylor & Walker, 2010; Taylor, 2017; ARRL, 2021).

Estas características, corroboradas en el análisis estadístico de distancias y SNR presentado anteriormente, constituyen el sustento técnico que habilita la exploración de WSPR como canal experimental de telemetría.

2.5.1 – CONSUMO ENERGÉTICO ESTIMADO POR TRANSMISIÓN

Para dimensionar la factibilidad de utilizar WSPR en contextos de telemetría de largo alcance, se estimó el consumo energético requerido por cada transmisión individual y se extrapoló este valor a un día completo de operación continua. Este cálculo se realizó considerando distintos niveles de potencia, con el objetivo de obtener referencias prácticas sobre la demanda energética asociada.

La Tabla 03 sintetiza estos ejemplos orientativos, incluyendo la energía requerida tanto por transmisión como en un día de actividad continua. Esta información permite apreciar las diferencias de consumo entre configuraciones de potencia y constituye un insumo clave para evaluar la viabilidad de integrar WSPR en nodos alimentados mediante baterías o paneles solares.

La autonomía resulta de integrar tres estados: transmisión de datos, sincronización (fijación GPS/NTP) e inactividad (sleep profundo). Para esto consideró:

- Secuencia: despertar → sincronizar → codificar → transmitir → sleep.
- Ciclo (Duty cycle) conservador, con un mensaje cada 20 a 60 min para minimizar.
- Regulación DC–DC de alta eficiencia y curva térmica del TCXO caracterizada.

Tabla 03

Estimación de consumo energético por transmisión y por jornada operativa

Potencia RF	Potencia DC (eficiencia de 0.6)	Energía por mensaje (110.6 s)	Energía por día	
			Tx 20 minutos	Tx 60 minutos
0.050 W RF	0.183 W	0.0056 Wh	0.41 Wh/día	0.14 Wh/día
0.200 W RF	0.433 W	0.0133 Wh	0.96 Wh/día	0.32 Wh/día
1.000 W RF	1.767 W	0.0543 Wh	2.61 Wh/día	1.30 Wh/día

Considerando la sincronización mediante GPS/NTP y las pérdidas asociadas a la conversión, un panel fotovoltaico de 5–10 W (aproximadamente 15–30 Wh/día) junto con una batería Li-ion de 2200 mAh resulta suficiente para cubrir el consumo energético de ciclos de transmisión de 20–60 minutos con potencias de 50–200 mW RF, permitiendo una operación sostenida durante varios meses sin que se produzcan desbalances energéticos diarios significativos.

Asimismo, para una potencia de transmisión de 0.200 W RF, partiendo de una batería de 2200 mAh completamente cargada y sin recarga posterior, y manteniendo el mismo ciclo de transmisión, se estima una autonomía aproximada de 12 días.

Esta estimación se fundamenta en la energía almacenada en la batería (aproximadamente 8 Wh para 2200 mAh a 3,7 V) y en el consumo promedio asociado a la potencia de transmisión y al ciclo de trabajo considerado.

2.5.2 – HARDWARE DISPONIBLE EN EL MERCADO COMPATIBLE

La viabilidad de la adaptación propuesta no depende únicamente de la estructura lógica del protocolo, sino también de la disponibilidad de hardware capaz de cumplir los requisitos técnicos de sincronización temporal, estabilidad de frecuencia y pureza espectral exigidos por WSPR.

La existencia de transmisores comerciales que integran receptores GPS y osciladores de alta estabilidad demuestra que estas condiciones pueden satisfacerse sin desarrollos electrónicos complejos. Asimismo, transceptores QRP⁷² diseñados para modos

⁷² QRP: modalidad de operación en el servicio de radioaficionados que implica la utilización de potencias de transmisión reducidas, típicamente iguales o inferiores a 5 W en HF, con el objetivo de

débiles incorporan arquitecturas adecuadas para mantener linealidad y minimizar emisiones espurias, aspectos esenciales en transmisiones de ancho de banda extremadamente reducido (~6 Hz).

Adicionalmente, existen plataformas de bajo costo y alta integración, como microcontroladores y sistemas embebidos (por ejemplo, Raspberry Pi y ESP32), que permiten automatizar la generación y transmisión de datos de telemetría con un consumo energético reducido. Estas soluciones pueden integrarse con módulos de radio compatibles o equipos dedicados, facilitando la implementación de nodos autónomos capaces de operar en entornos remotos. De este modo, no solo se garantiza la disponibilidad de hardware adecuado, sino también la accesibilidad económica y la escalabilidad del sistema propuesto.

En consecuencia, la disponibilidad de equipamiento específico para WSPR en el mercado radioaficionado confirma que la implementación práctica del esquema de telemetría propuesto no requiere hardware experimental ni desarrollos propietarios, sino que puede apoyarse en plataformas existentes y ampliamente utilizadas.

2.5.3 – RANGOS DE POTENCIA Y DESEMPEÑO ESPERADO

En telemetría WSPR, la práctica converge en 50 mW a 1 W de potencia RF. Incrementar potencia por encima de ~200 mW ofrece beneficios marginales si no se mejora conjuntamente la antena (ajuste y pérdidas), la estabilidad de frecuencia (TCXO/GPS–DO) y la pureza espectral (filtros pasabanda y de salida). Se debe privilegiar una señal FSK “limpia” (señal única, sin productos de modulación lateral), lo que mejora la probabilidad de decodificación en receptores comunitarios frente a señales con componentes no deseados. En el extremo de bajo consumo, las balizas con GPS mantienen la deriva acotada y sostienen el ancho efectivo mínimo que exige WSPR, maximizando la SNR pos–demodulación.

El ajuste temporal y la estabilidad de frecuencia son las restricciones técnicas más determinantes del éxito en WSPR: los slots inician en minuto par, con tolerancias $\approx \pm 1$ –1,5 segundo, y la deriva durante 110,6 segundo debe ser mínima para no desalinear los tonos 4–FSK. Las balizas stand–alone con GPS resuelven la sincronización. En kits/transceptores sin GPS, un TCXO de calidad puede ser suficiente; para despliegues autónomos prolongados, es recomendable un GPS. Para despliegues autónomos prolongados, es recomendable utilizar un receptor GPS configurado con activación periódica, a fin de limitar el consumo energético asociado a la adquisición de señal.

maximizar la eficiencia energética y explorar la propagación en condiciones de señal débil (American Radio Relay League, 2021).

El rendimiento de WSPR es altamente sensible al ajuste de antena y a las pérdidas de la línea de RF. En general, un dipolo o vertical monobanda resonante, con ROE baja y cableado corto/adecuado, aporta más a la cobertura que un aumento de potencia.

2.6 – SÍNTESIS ESTRUCTURAL E IMPLICANCIAS PARA TELEMETRÍA

El análisis estructural del protocolo WSPR realizado en este capítulo permite identificar con precisión tanto sus fortalezas –robustez ante SNR negativas, eficiencia espectral extrema y alcance intercontinental sin infraestructura intermedia– como sus limitaciones –rigidez del formato de mensaje y ausencia de canal de retorno.

Estas características, examinadas desde la perspectiva de los requerimientos de telemetría definidos en el Capítulo 1, habilitan la hipótesis central de este trabajo: la posibilidad de reutilizar el bloque de 50 bits de carga útil como contenedor de información de sensores.

La verificación empírica de que dichas condiciones de robustez y alcance se mantienen en escenarios reales se desarrollará en el Capítulo 3.

CAPÍTULO 3 – ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DEL PROTOCOLO WSPR

El análisis presentado en este capítulo fue realizado íntegramente por el autor durante el desarrollo de la presente tesis. Se trabajó sobre un conjunto de reportes WSPR correspondientes a transmisiones emitidas desde Argentina con potencia declarada ≤ 30 dBm, lo cual permite evaluar el desempeño en escenarios reales de baja potencia, compatibles con aplicaciones de telemetría de largo alcance. A partir de estos datos se consolidaron registros por año y banda, aplicando depuración de coordenadas inválidas, potencias inconsistentes y distancias no compatibles con propagación ionosférica. Sobre el dataset resultante se calcularon métricas de alcance (mínimo, mediana, máximo y percentiles) por banda y por potencia, así como su relación con el SNR. Los resultados se presentan mediante tablas y gráficos comparativos que permiten observar variaciones por banda, potencia y ventanas temporales.

Los datos utilizados provienen de la red colaborativa WSPRnet, un sistema mundial que recopila millones de reportes enviados por estaciones de todo el mundo. Cada registro incluye información sobre el indicativo emisor y receptor, los “grid locators”, la banda utilizada, la potencia declarada, la distancia estimada, el nivel de SNR, y la fecha y hora en UTC. Se accedió a la base de datos pública <https://db1.wspr.live> la cual permite consultas SQL vía URL y devuelve los resultados en formato CSV, facilitando la descarga masiva y segmentada de información histórica.

Se descargaron registros históricos de las bandas de HF, con especial énfasis en transmisiones de baja potencia (≤ 1 W). Dado que el espectro HF presenta condiciones de propagación muy diversas, y considerando los objetivos específicos del estudio, se seleccionaron cuatro bandas representativas: 80 m, 40 m, 20 m y 10 m. Estas bandas poseen una presencia significativa en los registros de WSPRnet y representan un rango amplio de escenarios de propagación, desde enlaces predominantemente regionales hasta trayectos intercontinentales, lo que permite evaluar el desempeño del protocolo en condiciones contrastantes.

Se analizó el desempeño principalmente en términos de distancia alcanzada y relación señal/ruido (SNR), indicadores clave dadas las características del protocolo y su aplicación potencial en telemetría de largo alcance.

3.1 – OBTENCIÓN Y DEPURACIÓN DE LOS DATOS

Para el presente trabajo se emplearon datos provenientes del sitio web WSPRnet, extraídos mediante consultas SQL automatizadas sobre la base pública

<https://db1.wspr.live>. Estas consultas fueron ejecutadas mediante tres script⁷³ desarrollados por el autor en Bash que se exponen en el ANEXO I, uno de los intérpretes de comandos más utilizados en sistemas basados en Linux. Los script permiten obtener de forma segmentada los registros correspondientes a estaciones transmisoras con prefijos LU o LW (Argentina), siempre que la potencia declarada fuera ≤ 30 dBm.

Debido a que las consultas sobre grandes volúmenes de datos suelen generar errores por tiempo excedido, el script parametriza el año y divide la descarga en consultas mensuales, consolidando luego los resultados en un único archivo anual. Posteriormente, todos los archivos anuales fueron unificados en un único dataset en formato CSV, eliminando encabezados intermedios. El conjunto final contiene más de 4,3 millones de registros que abarcan desde 2008 hasta la actualidad.

Con el objetivo de asegurar la calidad y validez del dataset, se aplicaron los siguientes filtros y normalizaciones para su análisis estadístico y gráfico posterior:

- Eliminación de registros con potencias no válidas o nulos: Se descartaron los casos en los que la variable *power* era igual a 0, ya que no representan transmisiones útiles desde el punto de vista técnico.
- Conversión de potencia de dBm a watts: Se incorporó una columna adicional con la conversión correspondiente, con el fin de facilitar la interpretación y comparación de valores de potencia.
- Filtrado por distancia mínima: Se descartaron los registros con distancias inferiores a 50 km, dado que estos trayectos podrían corresponder a propagación por línea de vista, difracción local o efectos troposféricos, y no a propagación ionosférica, que es el objeto de este análisis.
- Control de coordenadas geográficas: Se eliminaron los registros con valores de latitud superiores a $\pm 90^\circ$ o de longitud fuera del rango $\pm 180^\circ$, dado que dichas combinaciones no corresponden a ninguna ubicación posible sobre la superficie terrestre y, por lo tanto, constituyen errores de registro.

Luego del proceso de depuración, se obtuvo un conjunto de datos de alta calidad, que permitió realizar los análisis estadísticos correspondientes a la propagación de señales WSPR en diferentes bandas y potencias de transmisión.

El rango temporal analizado abarca desde 2009 hasta el 28 de julio de 2025. Si bien la base de datos contiene algunos registros correspondientes al año 2008, estos suman solo seis casos, por lo que se consideraron insuficientes y fueron omitidos en el análisis.

⁷³ Script: programa interpretado que ejecuta una secuencia de instrucciones en un entorno de comandos, utilizado para automatizar tareas repetitivas o encadenar operaciones dentro de un sistema (Tanenbaum & Wetherall, 2011).

La distancia entre transmisor (TX) y receptor (RX) se determinó como la trayectoria geodésica mínima sobre la superficie terrestre entre las coordenadas geográficas de ambos puntos. Para ello se empleó la fórmula de Haversine, ampliamente utilizada para el cálculo de distancias angulares sobre una esfera a partir de latitud y longitud (Sinnott, 1984):

$$d = 2r \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right)$$

donde:

- d = distancia calculada,
- r = radio medio de la Tierra,
- ϕ_1, ϕ_2 = latitudes de los puntos,
- λ_1, λ_2 = longitudes de los puntos.

La elección de este método se fundamenta en que los enlaces analizados corresponden, en numerosos casos, a trayectorias continentales o intercontinentales, donde la curvatura terrestre introduce diferencias apreciables respecto de modelos planos. En este sentido, la no utilización de la fórmula de Haversine podría generar errores crecientes a medida que aumenta la separación geográfica, comprometiendo la precisión de los resultados.

Si bien el modelo empleado en la fórmula de Haversine asume una Tierra esférica –y no elipsoidal– (Sinnott, 1984), su error relativo resulta despreciable frente a la escala de análisis considerada, por lo que constituye un cálculo adecuado entre precisión geométrica y simplicidad computacional.

Para evitar múltiple conteo de un mismo evento, cuando se detectaron spots duplicados, se retuvo un único registro. Se excluyeron registros con coordenadas fuera de rango geodésico, potencias fuera del dominio WSPR y distancias inferiores al umbral mínimo. Los cálculos estadísticos se realizaron por banda y potencia, y, cuando correspondió, se agruparon por año y franja horaria en UTC.

El umbral de 50 km se adoptó para minimizar la inclusión de trayectos no ionosféricos (línea de vista, difracción cercana, o saltos troposféricos cortos) que no representan el régimen de propagación objetivo para WSPR en HF. Para verificar robustez, se replicó el análisis con umbrales alternativos (30 km y 80 km); las conclusiones cualitativas por banda y potencia se mantuvieron invariantes, con variaciones cuantitativas menores en los percentiles bajos de distancia. En consecuencia, el criterio de 50 km se considera adecuado para el propósito del estudio sin alterar los hallazgos principales.

En complemento a este proceso, en el ANEXO II se incluyen los scripts desarrollados por el autor en lenguaje Python, utilizados para realizar el procesamiento

estadístico y la generación de las visualizaciones presentadas en los apartados posteriores de este capítulo. Estos programas (scripts) emplean bibliotecas especializadas como pandas, numpy y matplotlib, lo que permitió automatizar tareas de carga, filtrado, agrupamiento, cálculo de métricas y elaboración de gráficos comparativos. Su incorporación en el anexo garantiza transparencia metodológica y facilita la reproducibilidad del análisis realizado sobre el conjunto depurado de datos WSPR.

3.2 – ALCANCE GEOGRÁFICO DEL PROTOCOLO WSPR

Para determinar el alcance geográfico, se calcularon la distancia media y la distancia máxima de las transmisiones WSPR, analizadas en función de la banda de frecuencia (en MHz), la potencia emitida y la combinación de ambas variables.

3.2.1 – DISTANCIA MEDIA POR BANDA

Con el fin de caracterizar de manera inicial el comportamiento del sistema de transmisión analizado en las distintas bandas del espectro HF, los registros fueron agrupados por banda y se calcularon dos estadísticas descriptivas: la distancia media y la distancia máxima alcanzada.

La Tabla 04 sintetiza los resultados obtenidos.

Tabla 04

Distancias medias y máximas de propagación por banda HF

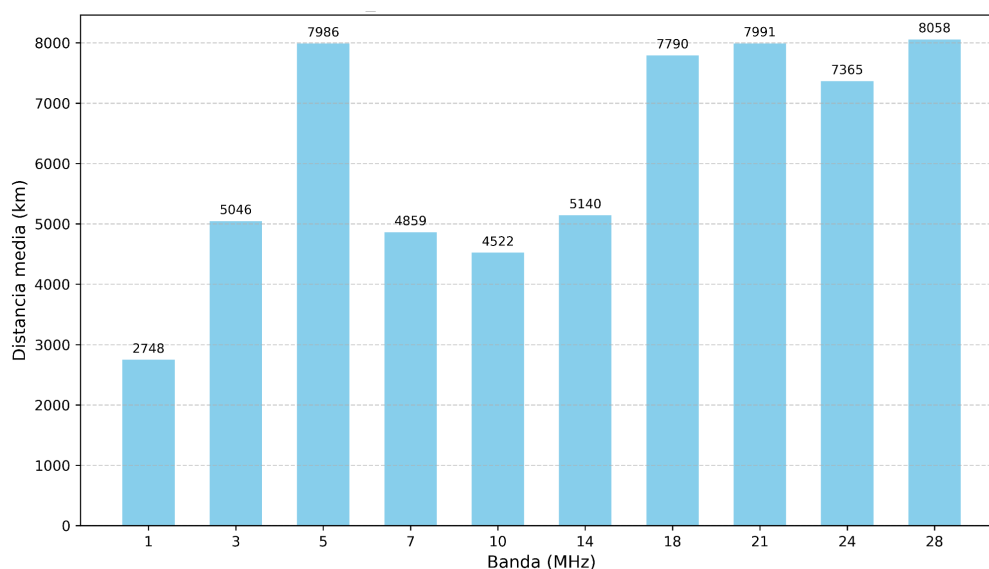
BANDA	DISTANCIA MEDIA (Km)	DISTANCIA MÁXIMA (Km)
1	2.748	18.636
3	5.045	19.464
5	7.986	18.900
7	4.859	19.946
10	4.521	19.585
14	5.140	19.958
18	7.790	19.718
21	7.990	19.630
24	7.364	19.489
28	8.058	19.663

Estas medidas permiten obtener una primera aproximación cuantitativa al alcance efectivo observado en cada banda, estableciendo así una base comparativa para los análisis gráficos desarrollados en los apartados siguientes.

La figura 03 presenta de forma visual la distancia promedio alcanzada en cada banda de frecuencia. La representación gráfica permite comparar cuantitativamente el alcance promedio entre bandas, evidenciando variaciones asociadas a las condiciones de propagación propias de cada segmento del espectro HF. Este análisis aporta elementos para estimar el comportamiento del sistema tanto en comunicaciones regionales como intercontinentales.

Figura 03

Distancia media de enlaces WSPR según banda de frecuencia



A partir de esta visualización se puede establecer un panorama general sobre el alcance medio que puede esperarse para cada banda, lo cual resulta fundamental para evaluar la viabilidad del uso del protocolo en distintos contextos de transmisión, especialmente en aplicaciones de telemetría de largo alcance.

3.2.2 – DISTANCIA MEDIA, MÁXIMA POR POTENCIA

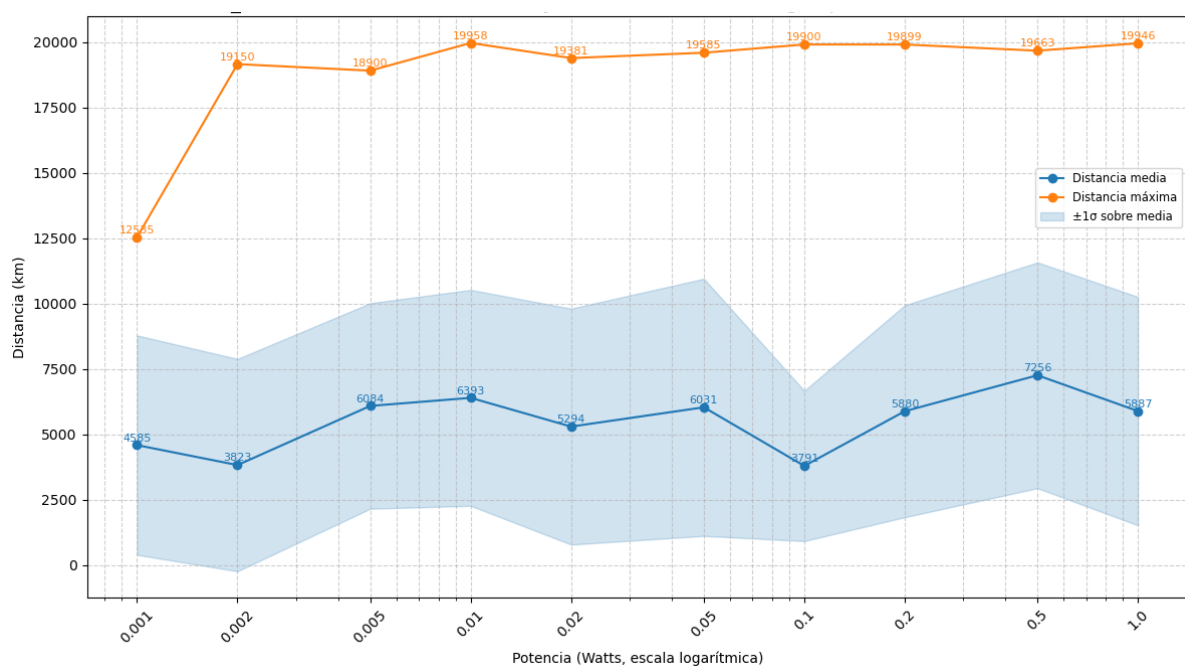
Con el fin de examinar la influencia de la potencia de transmisión sobre el alcance del protocolo WSPR, se realizó un análisis estadístico agrupando los registros según la potencia emitida en watts. Para cada nivel de potencia, se calcularon tres métricas clave: distancia media, distancia máxima y desviación estándar de la distancia.

La figura 04 sintetiza estos resultados en forma gráfica, mostrando cómo la distancia media y máxima alcanzada varían en función de la potencia de transmisión. La incorporación de la desviación estándar como sombreado permite además dimensionar la dispersión de los valores, lo que brinda una visión más completa sobre la relación entre potencia aplicada y alcance obtenido.

Los resultados obtenidos permiten establecer tendencias claras en la relación entre potencia y propagación. La representación gráfica combina curvas de distancia media y máxima en función de la potencia, utilizando una escala logarítmica en el eje horizontal para una mejor interpretación de los rangos de baja potencia. Se incluye, además, un sombreado representando el intervalo de una desviación estándar sobre la media, lo que permite visualizar la dispersión de los valores y su variabilidad.

Figura 04

Distancia de enlace en función de la potencia: media, máxima y dispersión



Este análisis resulta particularmente útil para evaluar la eficiencia del protocolo en contextos de baja potencia, una característica intrínseca a las transmisiones WSPR, y su aplicabilidad en escenarios de telemetría de largo alcance, donde la relación entre potencia utilizada y distancia obtenida es un factor crítico de diseño.

3.2.3 – DISTANCIA MEDIA POR POTENCIA Y BANDA

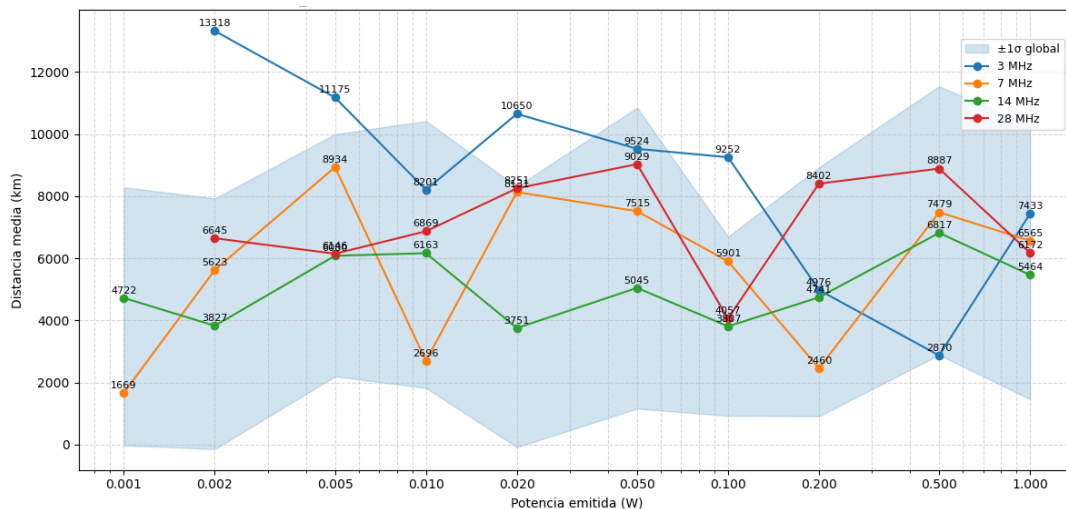
Para lograr una caracterización más detallada del desempeño del protocolo WSPR, se realizó un análisis conjunto de dos variables técnicas fundamentales: la potencia emitida y la banda de frecuencia. Esta combinación permite evaluar cómo varía la distancia media alcanzada según las condiciones técnicas de transmisión, y detectar posibles sinergias o limitaciones entre ambos factores.

La figura 05 representa gráficamente esta relación cruzada, mostrando las curvas de distancia media según los niveles de potencia en distintas bandas de frecuencia. El sombreado correspondiente a una desviación estándar global aporta un marco de referencia adicional para comparar el comportamiento de cada banda, permitiendo identificar configuraciones más eficientes en términos de alcance.

Esta visualización permite identificar con claridad qué combinaciones de potencia y banda resultan más efectivas para alcanzar mayores distancias, aspecto crucial para determinar configuraciones óptimas en aplicaciones de telemetría de largo alcance.

Figura 05

Distancia de enlace según potencia y banda: media y dispersión



El análisis se focalizó en las bandas más representativas del espectro HF utilizadas en WSPR: 3 MHz, 7 MHz, 14 MHz y 28 MHz. Para cada una de ellas, se calcularon los promedios de distancia alcanzados por potencia emitida (en watts), considerando además una zona de referencia basada en la desviación estándar global por potencia, calculada sobre el conjunto total de datos. La definición matemática y el procedimiento adoptado para su obtención se presentan en el punto 3.1.

3.2.4 – DISTANCIA MÁXIMA POR POTENCIA Y BANDA

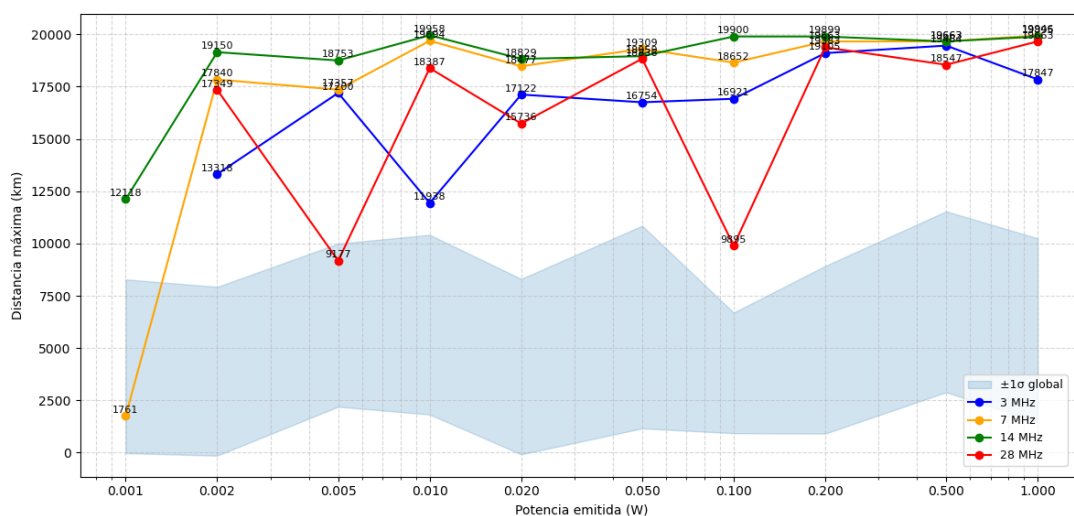
Con el objetivo de caracterizar el potencial máximo de propagación del sistema analizado, se determinaron los valores máximos de distancia registrados para cada nivel de potencia de transmisión, agrupando previamente los datos por banda de frecuencia. El cálculo se realizó sobre el conjunto depurado definido en el punto 3.1, seleccionando para cada combinación banda–potencia el mayor valor observado de la variable distancia.

Se seleccionaron cuatro bandas representativas (3, 7, 14 y 28 MHz) para realizar el análisis, debido a su relevancia en aplicaciones de comunicación de largo alcance.

La figura 06 presenta de manera integrada estos resultados, mostrando los valores máximos alcanzados para cada combinación de potencia y banda, junto con un sombreado que indica la dispersión alrededor de la media global. Este recurso permite dimensionar no solo el límite superior posible en términos de propagación, sino también la variabilidad asociada a las condiciones de cada banda, lo cual resulta fundamental para evaluar escenarios de telemetría en los que se busca exprimir al máximo la eficiencia del enlace.

Figura 06

Distancia de enlace según potencia en bandas seleccionadas: capacidad máxima de propagación



El gráfico generado combina dos elementos analíticos:

- Por un lado, se representa la distancia máxima registrada para cada combinación de banda y potencia, utilizando una escala logarítmica en el eje de potencias, lo que permite una mejor visualización del amplio rango de valores. Se identifican los valores máximos alcanzados por cada banda mediante puntos y etiquetas numéricas.

- Por otro lado, se incorporó un sombreado que representa el rango de una desviación estándar ($\pm 1\sigma$) alrededor de la media global de distancias por potencia, considerando el total de bandas. Esta visualización complementaria permite contrastar el comportamiento particular de cada banda con la tendencia general del protocolo.

Este análisis resulta especialmente relevante para evaluar el desempeño extremo del protocolo WSPR, brindando información sobre los límites superiores del alcance posible bajo diferentes niveles de potencia. La comparación entre bandas y la inclusión de la dispersión estándar permiten visualizar tanto el rendimiento más favorable como la variabilidad inherente al medio de propagación y las condiciones experimentales.

3.3 – RELACIÓN ENTRE LA DISTANCIA Y LA CALIDAD DE SEÑAL (SNR)

Esta sección examina la relación entre la distancia alcanzada por las transmisiones WSPR y la calidad de la señal recibida, expresada en términos de relación señal/ruido (SNR), métrica cuya fundamentación teórica se desarrolla en el punto 1.2.3.

A partir del conjunto de datos depurado descrito en el punto 3.1, se realizó un análisis gráfico con el objetivo de identificar patrones de comportamiento y evaluar cómo varía la calidad de recepción en función del trayecto recorrido por la señal en escenarios de propagación ionosférica en HF.

3.3.1 – DISPERSIÓN DEL SNR EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA

Para analizar la relación entre la calidad de la señal y la distancia alcanzada, se construyó un gráfico de dispersión utilizando registros individuales provenientes del conjunto de datos descrito en el punto 3.1. Cada punto representa una transmisión correctamente decodificada.

En la representación gráfica, la distancia (en kilómetros) se ubica en el eje X y el SNR (en dB) en el eje Y. Se aplicó además una codificación de color para visualizar la magnitud relativa del SNR. La Figura 07 muestra el resultado obtenido.

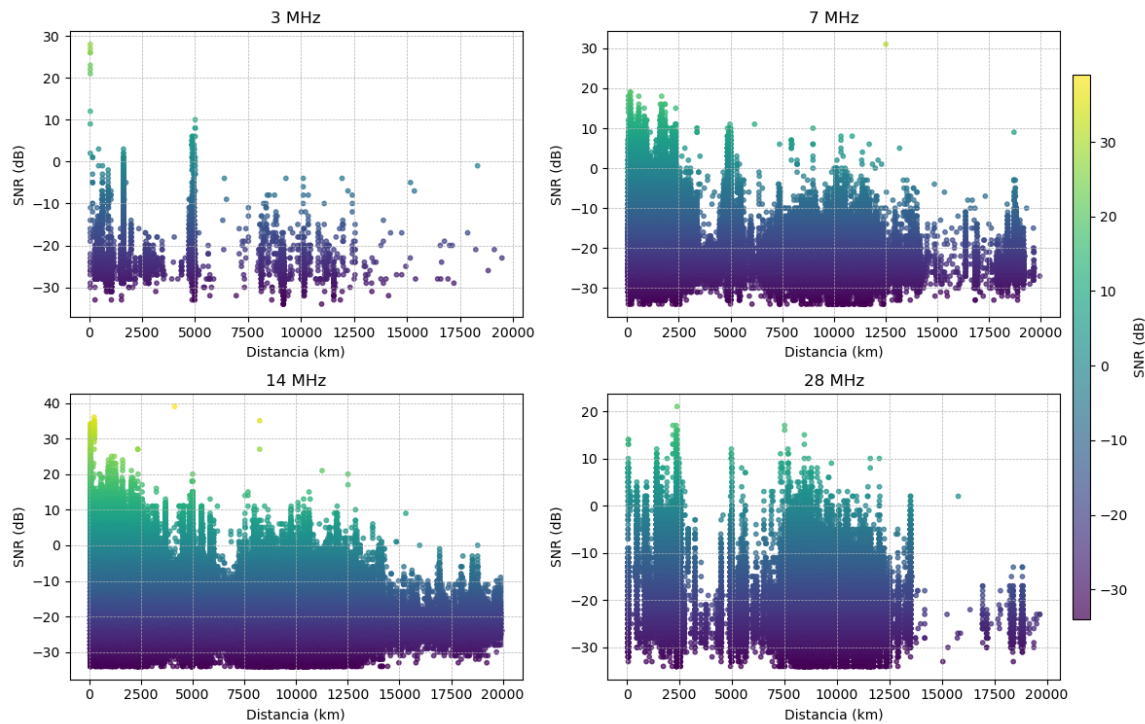
El análisis se segmentó por banda de frecuencia, seleccionando aquellas de mayor relevancia y uso dentro del espectro HF: 3 MHz, 7 MHz, 14 MHz y 28 MHz. Para cada una de estas bandas se generó un subgráfico que permite observar la distribución particular del SNR en función de la distancia.

La visualización permite advertir una tendencia general decreciente del SNR a medida que aumenta la distancia, lo que evidencia la pérdida de calidad de la señal conforme el trayecto de propagación se extiende. No obstante, esta tendencia no es lineal ni

uniforme, ya que intervienen factores ionosféricos, variaciones en la potencia emitida, condiciones atmosféricas y geográficas, entre otros.

Figura 07

Relación entre SNR y distancia por banda



Este análisis resulta especialmente relevante en el contexto de aplicaciones de telemetría de largo alcance, ya que demuestra cómo, aún en escenarios de propagación extendida, el protocolo WSPR conserva valores aceptables de SNR que permiten la decodificación exitosa del mensaje, reforzando así su potencial para la transmisión de datos con muy baja potencia.

3.3.2 – DISTRIBUCIÓN DE SNR PROMEDIO POR BANDA Y POTENCIA

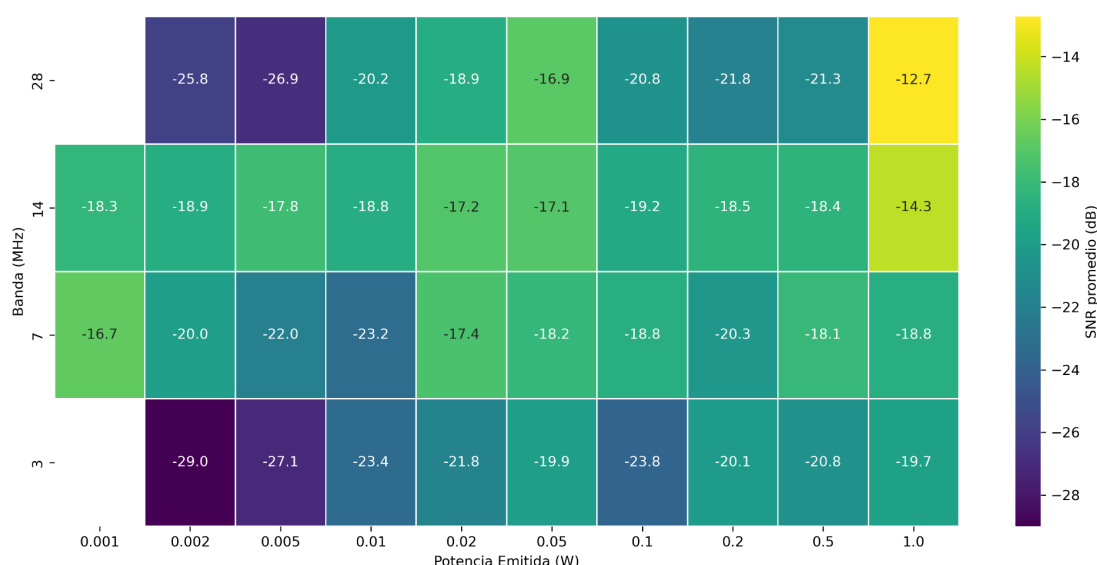
Con el objetivo de identificar las combinaciones técnicas que optimizan la calidad de las transmisiones WSPR, se elaboró un mapa de calor representando el valor promedio de la Relación Señal–Ruido (SNR) en función de la banda de frecuencia y la potencia de emisión.

La Figura 08 presenta este resultado mediante un mapa de calor (heatmap), técnica de visualización que representa valores numéricos a través de una escala cromática, permitiendo identificar patrones, concentraciones o contrastes de magnitud en matrices bidimensionales.

En este caso, los colores reflejan la intensidad del SNR promedio para cada combinación de banda y potencia, y cada celda incluye el valor numérico correspondiente. Esta representación facilita la comparación entre configuraciones operativas, permitiendo identificar qué combinaciones tienden a presentar mayor desempeño relativo en términos de SNR promedio.

Figura 08

SNR promedio según banda y potencia emitida



Esta representación gráfica constituye una herramienta práctica para ajustar las condiciones de transmisión en aplicaciones de telemetría, ya que facilita la comparación directa entre configuraciones alternativas y aporta precisión adicional gracias a la inclusión de valores exactos dentro del gráfico.

3.4 – INFLUENCIA DEL CICLO SOLAR EN EL DESEMPEÑO

Dado que la propagación ionosférica en HF se encuentra fuertemente condicionada por la actividad solar –tal como se expuso en el punto 1.2.3–, se analizó la evolución temporal de las métricas obtenidas con el fin de evaluar la posible influencia del ciclo solar en el desempeño del sistema estudiado.

Para ello, se representó la evolución anual de la distancia media alcanzada y del SNR promedio, segmentadas por banda de frecuencia. Estas visualizaciones –presentadas en las Figuras 09 y 10– permiten examinar las variaciones interanuales de ambas métricas y su correspondencia con diferentes fases del ciclo solar.

A partir del análisis realizado, WSPR presenta un comportamiento robusto frente a las variaciones del ciclo solar, dado que no se observan cambios significativos en las

métricas de distancia media y máxima previamente analizadas. Aunque la actividad solar modifica de forma directa la propagación ionosférica, especialmente en las bandas más altas, este comportamiento evidencia que el sistema mantiene un desempeño consistente tanto en períodos de máximo como de mínimo solar.

Esta estabilidad se explica por el uso de señales extremadamente estrechas, el empleo de codificación robusta con corrección de errores (FEC) y la estricta sincronización temporal, que permiten detectar señales aun con SNR fuertemente negativos. De este modo, las fluctuaciones del ciclo solar no constituyen una limitación relevante para el protocolo, sino que refuerzan su viabilidad como solución para telemetría de bajo consumo y largo alcance en cualquier fase del ciclo solar.

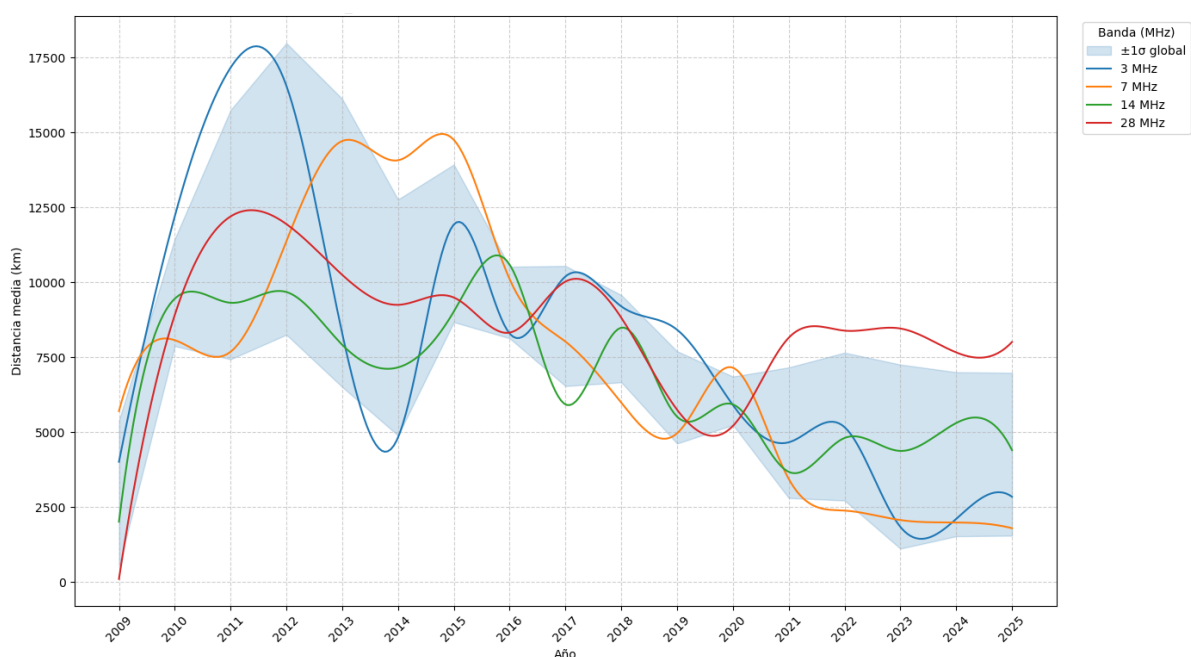
3.4.1 – VARIACIÓN DE LA DISTANCIA MEDIA POR BANDA Y AÑO

Con el propósito de analizar la posible incidencia del ciclo solar en el rendimiento del protocolo WSPR, se elaboró una visualización de la distancia media anual alcanzada por las transmisiones, segmentada según las cuatro bandas de frecuencia características. Para cada año, se calculó también el intervalo de ± 1 desviación estándar global, con el objetivo de detectar variaciones significativas o comportamientos atípicos.

La figura 09 presenta estos resultados de manera comparativa, mostrando la evolución de la distancia media en función de los años para distintas bandas de frecuencia, lo que permite observar la influencia de la actividad solar sobre la propagación.

Figura 09

Distancia de propagación por banda y año: relación con el ciclo solar



El gráfico evidencia un comportamiento oscilante en la distancia media alcanzada, con diferencias notables entre bandas. Las bandas de mayor frecuencia (especialmente 28 MHz) muestran picos pronunciados en los años 2010–2013, seguidos por una disminución paulatina. Este comportamiento es coherente con la influencia del ciclo solar sobre la propagación ionosférica, ya que las bandas más altas dependen en mayor medida de la ionización generada por la radiación solar.

En cambio, las bandas de frecuencia más baja, como 3 MHz y 7 MHz, presentan una evolución más estable, aunque con ciertas fluctuaciones, lo que sugiere una menor sensibilidad a los picos y valles del ciclo solar. Estas características las convierten en candidatas más confiables para aplicaciones continuas de telemetría.

La curva de distancia media global, junto a su desviación estándar, ofrece un marco de referencia general, permitiendo visualizar cómo las distintas bandas se alinean o se desvían del comportamiento promedio. Esta perspectiva aporta una base sólida para evaluar la consistencia y alcance de cada banda a lo largo del tiempo, información clave en el análisis de la viabilidad del protocolo para aplicaciones de transmisión de datos en diferentes condiciones de propagación.

La presencia de distancias superiores a 10.000 km en múltiples bandas a lo largo de los años, incluyendo los períodos de menor actividad solar, evidencia la capacidad del protocolo WSPR para mantener enlaces de largo alcance aun en condiciones ionosféricas menos favorables. Este comportamiento sostenido en el tiempo lo posiciona como una alternativa confiable para transmisiones de telemetría de bajo ancho de banda a nivel global.

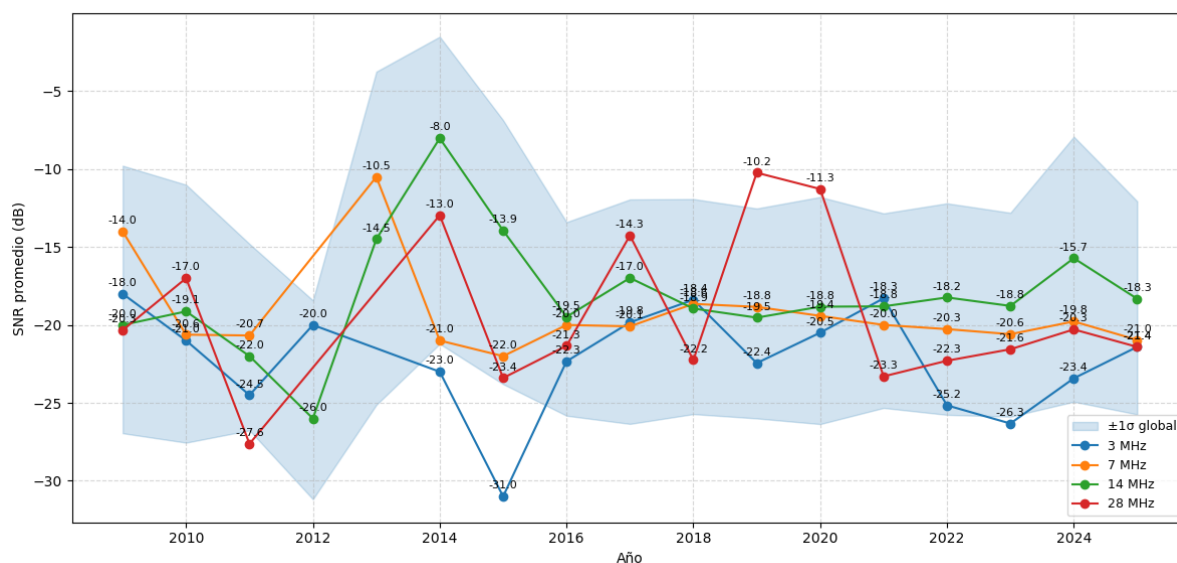
3.4.2 – VARIACIÓN DEL SNR PROMEDIO POR BANDA Y AÑO

Para analizar la influencia del ciclo solar en el desempeño del protocolo WSPR, el autor calculó el SNR promedio anual para cada banda de frecuencia utilizando el dataset depurado descrito en la Sección 3.1. Estos cálculos fueron realizados mediante los scripts de procesamiento desarrollados por el autor en Python, que forman parte del conjunto de herramientas empleadas para generar las visualizaciones del capítulo. Además, se incorporó el intervalo de ± 1 desviación estándar global con el fin de dimensionar la variabilidad interanual de las mediciones.

Tal como se observa en la figura 10, la representación gráfica del SNR promedio y su desviación estándar por banda y año permite visualizar de manera comparativa las fluctuaciones asociadas al ciclo solar. Este recurso no solo facilita la identificación de tendencias generales de propagación en cada banda, sino que también resalta los períodos de mayor variabilidad respecto de la media global, aportando evidencia empírica que complementa el análisis numérico desarrollado en esta sección.

Figura 10

SNR promedio por banda y año: relación con el ciclo solar



La región sombreada que representa ± 1 desviación estándar global destaca años de mayor variabilidad, como 2011–2015, contrastando con períodos más estables como 2018–2022. Esta zona permite identificar en qué medida los valores de SNR por banda se alejan o alinean con la media general del sistema observado.

La banda de 28 MHz, por ejemplo, muestra picos de buen desempeño en torno a 2019–2020, seguidos por una disminución del SNR hacia 2023–2025. A su vez, la banda de 3 MHz, generalmente menos favorecida en cuanto a propagación, mantiene valores de SNR más bajos y consistentes, cercanos a -25 dB, aunque con algunos picos esporádicos que reflejan condiciones puntualmente favorables.

El hecho de que con potencias de apenas 0.2 W se alcancen distancias de hasta 19.000 km en bandas como 20m o 30m, lo que demuestra la eficiencia del protocolo. Esto permite implementar soluciones de bajo consumo energético, ideal para nodos remotos o estaciones autónomas alimentadas por energías renovables.

3.5 – ROBUSTEZ FRENTE A VARIACIONES DIARIAS DE LA IONOSFERA

El análisis presentado en esta sección fue elaborado por el autor a partir del conjunto depurado de reportes WSPR descrito en los apartados anteriores. Para evaluar la influencia del ciclo diario de la ionosfera sobre el desempeño del protocolo, se procesaron los registros históricos segmentándolos por hora UTC y por banda de frecuencia, generando visualizaciones estadísticas que permiten identificar patrones horarios tanto en la calidad de señal (SNR) como en la distancia de propagación alcanzada.

Los resultados muestran que, aunque la propagación ionosférica en HF presenta variaciones pronunciadas entre el día y la noche –especialmente por la absorción de la capa D durante el día y la mayor eficiencia de la reflexión F1/F2 por la noche–, el protocolo WSPR mantiene niveles estables de decodificación y alcances operativos apreciables en todas las franjas horarias. Esta estabilidad se explica por el conjunto de técnicas empleadas por el protocolo: modulación 4–FSK extremadamente estrecha, codificación convolucional con interleaving y estricta sincronización temporal, lo que permite detectar señales con SNR muy negativos y compensar parcialmente las variaciones del canal.

En conjunto, los resultados indican que las fluctuaciones diarias de la ionosfera no representan una restricción operativa significativa para aplicaciones de telemetría de bajo ancho de banda. Por el contrario, confirman la capacidad de WSPR para garantizar disponibilidad continua y desempeño predecible aun bajo condiciones de propagación cambiantes a lo largo del día.

3.5.1 – DISTRIBUCIÓN DEL SNR SEGÚN LA HORA DEL DÍA

Para analizar cómo varía la calidad de recepción en función del horario, se calcularon los valores de SNR reportados en WSPR agrupados en bloques de tres horas y diferenciados por banda de frecuencia.

La figura 11 presenta un conjunto de diagramas de caja (boxplots) complementados por una curva suavizada que representa la evolución de la mediana del SNR a lo largo del día.

En todas las bandas se observa una dispersión amplia del SNR, lo cual es consistente con la naturaleza fluctuante del canal ionosférico. Sin embargo, el análisis de la mediana suavizada permite identificar patrones horarios característicos.

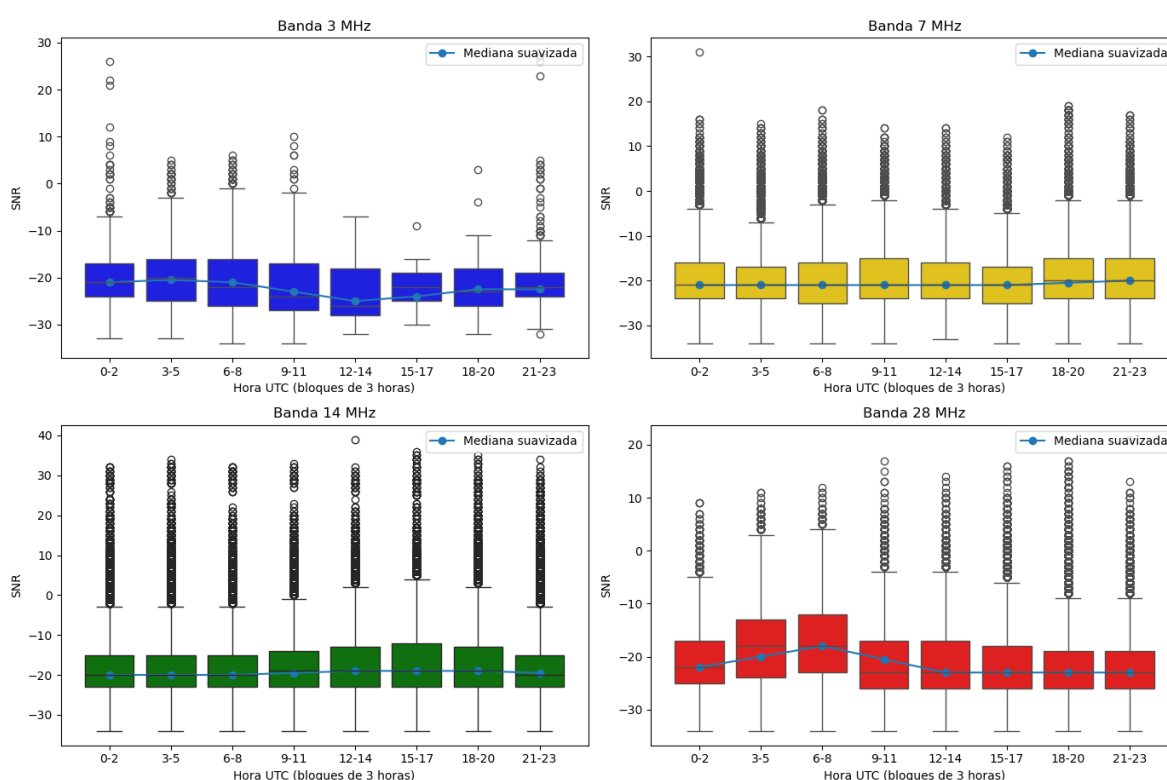
- Banda de 3 MHz: Presenta valores de SNR consistentemente bajos (medianas por debajo de -20 dB) durante toda la jornada. Sin embargo, se observa un leve repunte en los bloques horarios cercanos a la noche UTC (18–20 y 21–23), posiblemente asociado a una mejora en las condiciones de propagación por ionización de la capa D.
- Banda de 7 MHz: Muestra una mediana relativamente constante en torno a los -20 dB a lo largo de todo el día. La baja variabilidad sugiere una mayor estabilidad de propagación en esta banda, lo cual coincide con su uso habitual durante horas nocturnas.
- Banda de 14 MHz: Se aprecia una ligera mejora del SNR en horas centrales (12–17 UTC), lo cual puede explicarse por una mayor ionización en las capas F que favorece la propagación a media distancia en esa franja horaria. No obstante, las

medianas se mantienen en torno a los -20 dB, sin alcanzar valores significativamente altos.

- Banda de 28 MHz: Esta banda evidencia una marcada tendencia horaria. Los valores de SNR son ligeramente mejores entre las 6 y 14 UTC, coincidiendo con el ciclo diurno de mayor radiación solar. Fuera de ese intervalo, la mediana desciende considerablemente, lo cual es consistente con el comportamiento esperado para bandas altas, cuya propagación depende fuertemente de la ionización diurna.

Figura 11

Variación horaria del SNR



Estos resultados reflejan la influencia directa de la ionosfera sobre la calidad de señal en HF, al tiempo que muestran que el protocolo WSPR logra decodificaciones estables incluso en las bandas y horarios más desfavorables.

3.5.2 – DISTRIBUCIÓN DE LA DISTANCIA ALCANZADA SEGÚN LA HORA

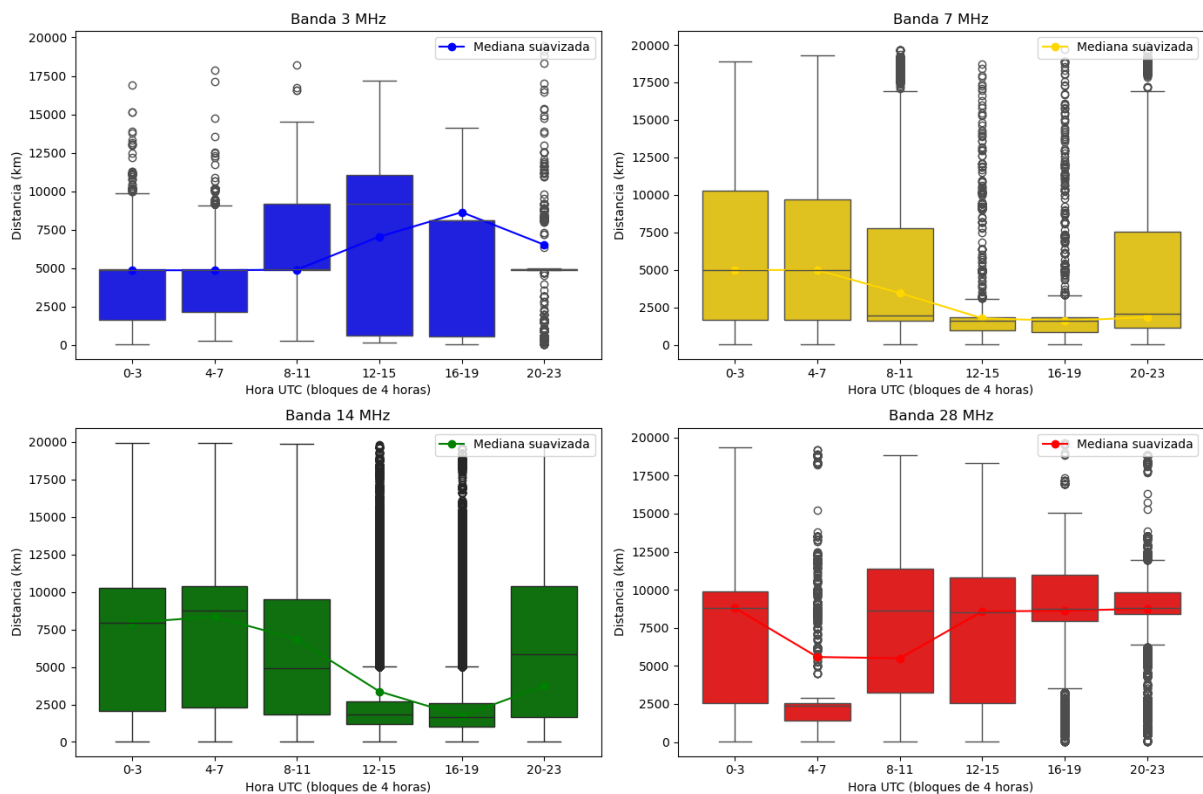
Para evaluar la relación entre el horario y el alcance de las transmisiones, se analizaron las distancias obtenidas a partir de la conversión de los grid locators a

coordenadas geográficas y el posterior cálculo mediante la fórmula de Haversine, según el procedimiento descrito en el punto 3.1.

Las distancias resultantes se agrupan por bloques de cuatro horas en UTC. La Figura 12 presenta los resultados mediante diagramas de caja (boxplots) junto con una curva suavizada de la mediana, permitiendo visualizar tendencias generales por banda.

Figura 12

Variación de la distancia de enlace según la hora del día



Los resultados evidencian que:

- En 3 MHz, las distancias más extensas se concentran en horarios nocturnos (0–7 UTC), alcanzando medianas cercanas a los 10.000 km.
- En 7 MHz, las mayores distancias también se observan durante la madrugada, mientras que en horas diurnas la propagación se acorta de manera notable.
- En 14 MHz, se observa el comportamiento inverso: la banda opera de manera eficiente durante las horas centrales, con amplio rango de variabilidad y presencia frecuente de propagación de largo alcance.
- En 28 MHz, la apertura de la banda está claramente concentrada en horas diurnas y vespertinas, especialmente entre 16 y 23 UTC, donde se registran medianas elevadas y numerosos valores extremos propios de propagación F2.

Estos resultados confirman que el rendimiento horario está fuertemente condicionado por la combinación entre frecuencia y nivel de ionización disponible en cada tramo del día. Sin embargo, aun con potencias inferiores a 1 W, el análisis evidencia que más del 60 % de las transmisiones superan los 5.000 km y cerca del 20 % exceden los 10.000 km, lo que destaca la eficiencia del protocolo en escenarios de bajo consumo energético.

3.6 – SÍNTESIS EMPÍRICA Y FUNDAMENTACIÓN DEL DISEÑO

Los resultados obtenidos a lo largo del presente capítulo, a partir del análisis de las métricas de distancia, SNR y su comportamiento en función de la banda y la potencia, confirman que el protocolo WSPR mantiene un comportamiento consistente en condiciones de señal débil, alcanzando distancias intercontinentales con relaciones señal–ruido negativas y potencias reducidas. Desde la perspectiva de la telemetría remota, estos hallazgos validan empíricamente la premisa de que el canal físico provisto por WSPR es técnicamente apto para transportar información de sensores en entornos de baja disponibilidad energética y ausencia de infraestructura intermedia.

En consecuencia, el capítulo siguiente aborda el rediseño del bloque de 50 bits del mensaje WSPR con el objetivo de adaptar su carga útil a un esquema formal de codificación de datos de telemetría.

CAPÍTULO 4 – DISEÑO DEL ESQUEMA DE CODIFICACIÓN

El análisis estructural del protocolo WSPR, junto con la evaluación empírica de su desempeño, permiten establecer que dicho protocolo reúne una combinación singular de atributos aptos para aplicaciones de telemetría de muy baja tasa de bit. En particular, en los apartados dedicados a la modulación y estructura de señal se ha caracterizado el uso de 4-FSK con un ancho de banda efectivo aproximado de 6 Hz, así como su esquema de codificación convolucional con FEC, el interleaving temporal y su transmisión en tramas de aproximadamente 110,6 segundos sincronizadas temporalmente. Complementariamente, el análisis empírico realizado evidenció su capacidad de decodificación en condiciones de relación señal–ruido negativa y su alcance intercontinental con potencias inferiores a 1 W bajo condiciones favorables.

Sobre esta base, la propuesta desarrollada en este capítulo no modifica los parámetros físicos del protocolo –modulación, tasa de símbolos, ancho de banda ni esquema de codificación– previamente caracterizados, sino que se orienta exclusivamente a la adaptación de la estructura lógica del bloque de 50 bits de carga útil, preservando la compatibilidad con la infraestructura global existente de recepción WSPR.

Estos elementos permiten concluir que, desde el punto de vista físico y operacional, WSPR constituye un canal robusto y energéticamente eficiente para la transmisión de información en entornos de señal débil.

No obstante, también se han identificado limitaciones estructurales relevantes: rigidez en el formato del mensaje, espacio total de carga útil restringido a 50 bits y ausencia de mecanismos de retorno o confirmación. Estas restricciones no invalidan su posible reutilización, sino que plantean la necesidad de diseñar un esquema de codificación alternativo que opere dentro de los límites formales del protocolo sin alterar su capa física.

En este marco, el presente capítulo desarrolla la adaptación del bloque de 50 bits de carga útil del protocolo WSPR, originalmente destinado a codificar indicativo, grid locator y potencia declarada, con el objetivo de transportar variables ambientales, energéticas o científicas de manera compacta y determinística.

4.1 – FUNDAMENTACIÓN DEL USO DE WSPR PARA TELEMETRÍA

Los sistemas de telemetría en entornos remotos exigen bajo consumo energético, capacidad de operación con SNR muy bajos, robustez frente al ruido y, en muchos casos, disponibilidad de una infraestructura de recepción distribuida. A la luz de los resultados obtenidos en los capítulos precedentes, el protocolo WSPR presenta tres características particularmente relevantes:

- Ancho de banda extremadamente reducido (~6 Hz).
- Capacidad de decodificación a SNR del orden de -28 dB (referencia 2,5 kHz).

- Alcances intercontinentales con potencias inferiores a 1 W, conforme se evidenció en el análisis empírico del apartado 3.2, correspondiente al alcance geográfico del protocolo WSPR.

Sin embargo, su formato de mensaje es rígido y no contempla la transmisión de valores arbitrarios. El espacio total de 50 bits no admite extensiones sin modificar el estándar. Por lo tanto, cualquier adaptación debe operar exclusivamente en la redefinición semántica de esos 50 bits, preservando la estructura física del protocolo.

Dado que el rediseño propuesto se limita a la reinterpretación del bloque de 50 bits (carga útil) y no introduce cambios en la cadena física definida por WSPR –tasa de símbolos, separación tonal, modulación 4-FSK, codificación convolucional e interleaving–, las métricas empíricas de alcance, SNR y variabilidad temporal obtenidas a partir de los análisis de alcance geográfico (apartado 3.2), relación entre distancia y calidad de señal (apartado 3.3) y variabilidad temporal (apartados 3.4 y 3.5) resultan aplicables al esquema de telemetría aquí diseñado. En otras palabras, el cambio afecta el significado de los 50 bits, pero no el mecanismo por el cual esos bits se protegen, se intercalan y se transmiten como señal.

El problema técnico se reduce entonces a la reorganización estructurada del bloque de 50 bits.

4.2 – ESQUEMA DE CODIFICACIÓN DE DATOS DE TELEMETRÍA PROPUESTO

Tal como se analizó en la Sección 2.3 (Análisis del código fuente del protocolo), la construcción del bloque de 50 bits se realiza en la etapa previa a la codificación convolucional, dentro del módulo `wsprcode.f90`. Esta etapa constituye el punto técnicamente viable para introducir la adaptación orientada a telemetría.

Se propone reemplazar el formato original por una estructura fija compuesta por tres campos:

- Identificador del Sensor (20 bits): Permite representar hasta $2^{20} = 1.048.576$ nodos distintos.
- Identificador de Magnitud (14 bits): Permite codificar hasta 16.384 categorías de magnitudes físicas.
- Valor Medido (16 bits, complemento a dos, escala $\times 10$): Rango representable: -32.768 a 32.767 .

La estructura general se expresa como:

[20 bits Identificador del Sensor] [14 bits Identificador de Magnitud] [16 bits valor]

El diseño propuesto responde a tres ejes conceptuales derivados del análisis previo, que guían la partición adoptada de 20 bits para identificación de sensor, 14 bits para magnitud y 16 bits para el valor medido:

1. Maximizar la cantidad de sensores identificables dentro del límite de 50 bits,
2. Permitir la representación normalizada de magnitudes físicas heterogéneas y
3. Preservar capacidad de representación para valores positivos y negativos con resolución decimal.

Ejemplo de Codificación

Un sensor con identificador 38 registra una temperatura de 40,0 °C.

- Identificador del Sensor = 38 en binario de 20 bits: 000000000000100110.
- Identificador de Magnitud = 101 (temperatura en °C, según catálogo) en binario de 14 bits: 000001100101.
- Valor = $40,0 \times 10 = 400$ en binario de 16 bits: 0000000110010000.

Esta redefinición se limita exclusivamente a la generación del bloque de 50 bits. Las etapas posteriores –codificación convolucional, interleaving, inserción de sincronismo y modulación 4–FSK– permanecen idénticas a la implementación original.

4.3 – MODIFICACIONES IMPLEMENTADAS Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Para evaluar la factibilidad técnica del esquema propuesto en la Sección 4.2, se trabajó sobre el código fuente abierto de WSJT–X descrito en la Sección 2.3, generando una versión experimental compilada con fines de validación.

Las modificaciones realizadas se agrupan en tres ejes:

- Desarrollo de las rutinas experimentales wqencode y wqdecode, incorporadas específicamente en este trabajo.
- Adaptación del empaquetado binario manteniendo compatibilidad con pack50 y unpack50.
- Incorporación de mecanismos de visualización binaria para validación estructural.

En primer lugar, se redefinieron los subprogramas de codificación y decodificación mediante la incorporación de las rutinas wqencode y wqdecode. Estas rutinas constituyen desarrollos propios y no forman parte de la distribución estándar de WSJT–X; su propósito es sustituir el empaquetamiento original de indicativo, grid locator y potencia por un empaquetamiento orientado a telemetría, manteniendo constante el tamaño de la carga útil (50 bits). Esta sustitución se justifica en que la lógica original fue diseñada para representar

exclusivamente los campos del mensaje WSPR, mientras que el objetivo de la investigación requiere representar, en el mismo espacio binario, un identificador de sensor, un identificador de magnitud y un valor medido, con mapeo determinístico y reversible.

En segundo lugar, se ajustaron las funciones responsables del empaquetado de bits. Para ello se mantuvo la compatibilidad con las subrutinas pack50 y unpack50, presentes en la versión original, pero se adaptó el procedimiento de reconstrucción de los 50 bits de información. En esta nueva versión, la partición en 28 y 22 bits fue seleccionada estratégicamente para garantizar una manipulación coherente dentro de registros de 64 bits. Este ajuste eliminó inconsistencias derivadas del uso previo de operadores lógicos y aseguró que los campos pudieran extraerse de manera inequívoca durante el proceso de decodificación.

En tercer lugar, se implementó un mecanismo de visualización en binario que organiza la salida en tres grupos diferenciados de 20, 14 y 16 bits. Esta modificación no responde únicamente a un criterio estético, sino que constituye una herramienta metodológica para la validación: permite identificar con claridad la distribución de cada campo dentro de la trama y verificar que el resultado de la codificación corresponde de manera precisa con los valores de entrada. De este modo, se facilita tanto la interpretación humana del proceso como la detección de posibles errores en la implementación.

Estas modificaciones responden, en conjunto, a la necesidad de disponer de un módulo experimental que no solo permita validar la factibilidad técnica de la codificación propuesta, sino que también posibilite el análisis detallado de casos particulares. Entre estos se incluyen valores positivos de uso común, los extremos superiores permitidos por la longitud de cada campo y, finalmente, valores negativos, a fin de comprobar el tratamiento correcto en el campo asignado al valor medido.

4.3.1 – VALIDACIÓN NOMINAL

Se analiza el caso de un nodo sensor con Identificador del Sensor = 38, que transmite una lectura de 40,0 °C (magnitud 101 en el catálogo).

Codificación de Identificador del Sensor

- Valor decimal: 38
- Representación binaria (20 bits): 000000000000000100110

Codificación de Identificador de Magnitud

- Magnitud: Temperatura (°C)
- Identificador en catálogo: 101
- Representación binaria (14 bits): 00000001100101

Codificación del Valor

- Valor decimal: 40,0 °C
- Escalado $\times 10$: 400
- Representación binaria en complemento a dos (16 bits): 0000000110010000

Trama final (50 bits): 00000000000000100110 00000001100101 0000000110010000

Decodificación

- El receptor interpreta los 20 primeros bits como Identificador del Sensor: 38.
- Los 14 siguientes como Identificador de Magnitud: 101 – Temperatura (°C).
- Los 16 últimos como Valor: $400 / 10 = 40,0$ °C.

La figura 13 presenta la salida generada por el módulo `wsprcode.f90`, compilado como ejecutable de prueba para validar la rutina de codificación y decodificación desarrollada en la Sección 2.3.2. En esta ejecución se utilizó como entrada la cadena “38,101,40.0”, correspondiente al identificador de sensor 38, la magnitud 101 (temperatura) y el valor medido de 40,0 °C.

Figura 13

Codificación y decodificación de temperatura en rango positivo normalizado



```
ignacio@obelix: ~/Documents/PER/UADER/TESINA/WSPR_MODIFICADO/wsprcode
ignacio@obelix:~/Documents/PER/UADER/TESINA/WSPR_MODIFICADO/wsprcode$ ./wsprcode "38,101,40.0"
Message: 38,101,40.0

Source-encoded message, 50 bits:
Hex:    00 02 60 19 40 64 00
Binary: 00000000000000100110 00000001100101 0000000110010000

Decoded message: 38 101 40.0          ntype: 0
ignacio@obelix:~/Documents/PER/UADER/TESINA/WSPR_MODIFICADO/wsprcode$
```

En la primera parte de la salida se observa la sección “Source–encoded message”, donde se presenta la trama de 50 bits resultante. Allí se listan tanto los valores en hexadecimal de los 7 bytes que contienen los 50 bits útiles como su representación en binario. La cadena binaria aparece segmentada en los tres campos definidos por el esquema de codificación: 20 bits para el Identificador del Sensor, 14 bits para el Identificador de Magnitud y 16 bits para el valor escalado en complemento a dos.

En la parte inferior de la salida se muestra la decodificación inversa de la trama. El programa recupera correctamente los valores originales, indicando: 38 101 40.0, lo que confirma que el proceso de empaquetado y desempaquetado de la información es consistente y que la lógica implementada reproduce de manera fiel el mapeo entre los datos de telemetría y la estructura de 50 bits usada en WSPR.

En consecuencia, la figura evidencia la coherencia interna del esquema de codificación implementado. Al utilizar la misma lógica del módulo `wsprcode.f90` para codificar y posteriormente decodificar el mensaje de prueba, se verifica que el empaquetado de los 50 bits y su reconstrucción posterior preservan íntegramente los valores originales.

Esta verificación confirma que la redefinición del bloque de 50 bits resulta compatible con el flujo interno del protocolo, al menos desde el punto de vista lógico y estructural, sin introducir inconsistencias en el proceso de codificación y decodificación.

4.3.2 – ESTRÉS DE LÍMITES

Con el propósito de validar los límites superiores admitidos por la estructura de codificación propuesta, se realizó una prueba en la que se asignaron a cada uno de los campos el valor máximo que puede representarse dentro de su longitud en bits. En este sentido, se estableció el identificador de sensor en su mayor valor posible (20 bits, equivalente a 1.048.575), el identificador de magnitud en el límite de 14 bits (16.383), y finalmente el valor medido se fijó en el máximo permitido para un entero con signo de 16 bits (32.767), considerando además el factor de escala $\times 10$ que se aplica en la etapa de codificación.

Este escenario resulta de particular relevancia, dado que asegura que la implementación no solo sea funcional en situaciones nominales, sino también en los extremos de su rango teórico. La verificación de que estos valores puedan ser empaquetados y decodificados correctamente sin producir desbordamientos o pérdidas de información es fundamental para garantizar la solidez del esquema en condiciones de máxima exigencia.

Codificación de Identificador del Sensor

- Valor decimal: 1.048.575
- Representación binaria (20 bits): 11111111111111111111

Codificación de Identificador de Magnitud

- Identificador en catálogo: 16.383
- Representación binaria (14 bits): 11111111111111

Codificación del Valor

- Valor decimal: 3276,7
- Representación binaria en complemento a dos (16 bits): 0111111111111111

Trama final (50 bits): 111111111111111111 1111111111111111 0111111111111111

Decodificación

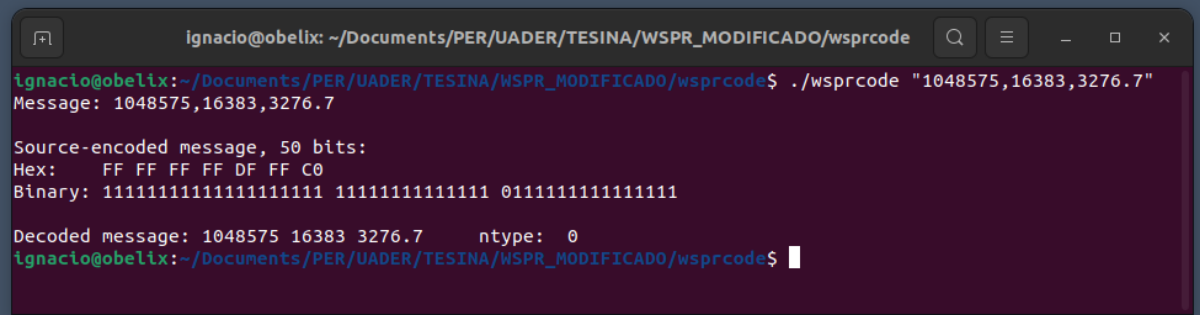
El receptor interpreta:

- Identificador del Sensor = 1.048.575
- Identificador de Magnitud = 16.383
- Valor = 3276,7

La figura 14 captura la salida del programa correspondiente a este caso. Allí se observa la representación binaria de la trama completa organizada en los tres segmentos de 20, 14 y 16 bits, junto con la decodificación que restituye los valores originales de sensor, magnitud y medición.

Figura 14

Codificación y decodificación de valores máximos: representación del límite superior del sistema



```
ignacio@obelix: ~/Documents/PER/UADER/TESINA/WSPR_MODIFICADO/wsprcode
ignacio@obelix:~/Documents/PER/UADER/TESINA/WSPR_MODIFICADO/wsprcode$ ./wsprcode "1048575,16383,3276.7"
Message: 1048575,16383,3276.7

Source-encoded message, 50 bits:
Hex:    FF FF FF FF DF FF C0
Binary: 111111111111111111 1111111111111111 0111111111111111

Decoded message: 1048575 16383 3276.7      ntype: 0
ignacio@obelix:~/Documents/PER/UADER/TESINA/WSPR_MODIFICADO/wsprcode$
```

La salida del programa confirmó que la trama de 50 bits generada se ajustó fielmente a la partición definida [20|14|16], sin introducción de bits residuales o corrimientos erróneos. Asimismo, el proceso de decodificación restituyó los mismos valores asignados, evidenciando que el módulo es capaz de manejar adecuadamente la saturación de cada uno de los campos. Este ejemplo constituye así la validación empírica de la robustez de la lógica implementada frente a la frontera superior del espacio de representación disponible.

4.3.3 – VALORES NEGATIVOS

Esta prueba se orientó a verificar el comportamiento del sistema ante la codificación y decodificación de valores negativos, aspecto indispensable en magnitudes físicas que admiten dicha posibilidad (por ejemplo, temperaturas bajo cero o diferencias de potencial de signo contrario). Para este caso, se asignaron valores arbitrarios de identificador de sensor y de magnitud dentro del rango habitual, y se seleccionó un valor medido de $-12,3$ unidades, expresado en el formato con un decimal de precisión.

El tratamiento de los valores negativos se implementa mediante la representación en complemento a dos de 16 bits, la cual constituye un estándar ampliamente adoptado en sistemas digitales. Durante la etapa de codificación, el valor decimal es multiplicado por el factor de escala ($\times 10$), convertido a entero con signo y posteriormente ajustado al formato de 16 bits, garantizando que el rango $[-32.768, 32.767]$ sea cubierto en su totalidad. En la decodificación, el valor se recupera interpretando adecuadamente el bit más significativo como indicador de signo, lo que permite reconstruir el dato original en punto flotante con un decimal de precisión.

Codificación de Identificador del Sensor

- Valor decimal: 125
- Representación binaria (20 bits): 000000000001111101

Codificación de Identificador de Magnitud

- Identificador en catálogo: 202
- Representación binaria (14 bits): 000011001010

Codificación del Valor

- Valor decimal: $-12,3^{\circ}\text{C}$
- Representación binaria en complemento a dos (16 bits): 1111111100000101

Trama final (50 bits): 000000000001111101 000011001010 1111111100000101

Decodificación

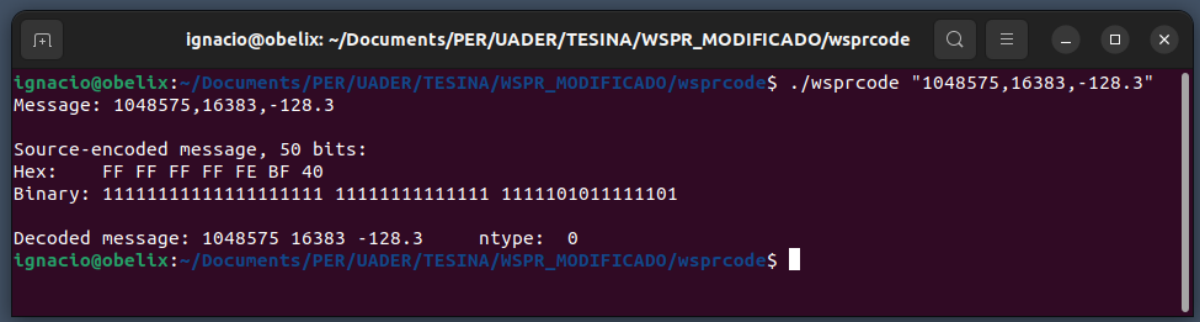
El receptor interpreta:

- Identificador del Sensor = 125
- Identificador de Magnitud = 202
- Valor = $-12,3$

La figura 15 muestra la codificación y decodificación de un valor negativo. El gráfico evidencia cómo el sistema traduce el número a su representación binaria en complemento a dos de 16 bits y lo recupera de forma precisa en la etapa de decodificación.

Figura 15

Codificación y decodificación de valores negativos



```
ignacio@obelix: ~/Documents/PER/UADER/TESINA/WSPR_MODIFICADO/wsprcode
ignacio@obelix:~/Documents/PER/UADER/TESINA/WSPR_MODIFICADO/wsprcode$ ./wsprcode "1048575,16383,-128.3"
Message: 1048575,16383,-128.3

Source-encoded message, 50 bits:
Hex:   FF FF FF FF FE BF 40
Binary: 111111111111111111 11111111111111 1111101011111101

Decoded message: 1048575 16383 -128.3      ntype: 0
ignacio@obelix:~/Documents/PER/UADER/TESINA/WSPR_MODIFICADO/wsprcode$
```

La ejecución del programa evidenció que el valor negativo fue representado correctamente en la trama binaria y recuperado sin pérdida en la decodificación, validando así la adecuación del método propuesto para el manejo de datos bidireccionales. Este ejemplo refuerza la aplicabilidad práctica del esquema en escenarios reales, donde la presencia de valores por debajo de cero resulta habitual y no debe comprometer la integridad de la información transmitida.

4.4 – CATÁLOGO DE MAGNITUDES Y UNIDADES

A partir del análisis comparativo de estándares internacionales desarrollado en la Sección 1.4, se procedió a la construcción de un catálogo propio de magnitudes y unidades como componente central de la propuesta de adaptación del protocolo WSPR a aplicaciones de telemetría.

El proceso de elaboración consistió en identificar magnitudes recurrentes en los esquemas WQX, WMO, UCUM, UN/CEFACT e IEC 60050, así como en aplicaciones típicas de monitoreo ambiental, eléctrico e industrial. Posteriormente, se realizó una depuración terminológica para unificar denominaciones equivalentes, eliminar redundancias y seleccionar únicamente aquellas magnitudes compatibles con escenarios de transmisión de baja tasa de datos y espacio de codificación restringido.

Cada magnitud seleccionada fue incorporada en una estructura tabular normalizada, asignándole un identificador numérico interno y registrando, cuando estaban disponibles, referencias cruzadas con estándares internacionales. Asimismo, se definieron restricciones operativas tales como cantidad de decimales admitidos, posibilidad de valores negativos y

rangos típicos de operación, con el fin de facilitar validación y coherencia en implementaciones futuras.

Con el objetivo de asegurar compatibilidad con la restricción estructural del mensaje WSPR (50 bits totales), se definió un identificador de 14 bits para cada magnitud. Esta longitud permite representar hasta $2^{14} = 16.384$ categorías distintas, margen considerado suficiente para cubrir aplicaciones actuales y futuras sin comprometer la eficiencia del esquema de codificación. La asignación de identificadores se realizó de manera secuencial, reservando espacio para futuras ampliaciones.

El catálogo cumple una doble función: permite una representación compacta y determinística de magnitudes dentro de las severas restricciones del mensaje WSPR y garantiza interoperabilidad, dado que cada identificador puede mapearse inequívocamente a estándares internacionales de amplia adopción.

La estructura propuesta es escalable, ya que admite la incorporación de nuevas magnitudes sin alterar la arquitectura del mensaje, y armonizable, al apoyarse en sistemas de codificación consolidados en ámbitos científicos y técnicos.

El catálogo completo se presenta en el ANEXO III.

4.5 – SÍNTESIS DEL DISEÑO Y APOORTE DE LA INVESTIGACIÓN

El aporte original de esta investigación consiste en el diseño formal, implementación y validación experimental de un esquema de codificación de datos de telemetría compatible con la estructura interna del protocolo WSPR. El diseño del esquema propuesto se desarrolla en la Sección 4.2, mientras que su implementación y validación experimental se presentan en la Sección 4.3, donde se verifica la consistencia del proceso de codificación y decodificación, así como el correcto manejo de valores nominales, extremos y negativos.

A diferencia del uso convencional del protocolo –limitado a la transmisión de indicativos, localización y potencia– la propuesta desarrollada demuestra que su bloque de 50 bits puede ser reinterpretado como contenedor estructurado de información ambiental o técnica, sin alterar las propiedades físicas que le confieren robustez y alcance global. Este rediseño abre la posibilidad de utilizar una infraestructura colaborativa ya consolidada como canal de telemetría científica de muy baja tasa de bit.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El objetivo general de esta investigación consistió en diseñar y validar un esquema de codificación que permita utilizar el protocolo WSPR como canal de transmisión de datos de telemetría en entornos de señal débil. A lo largo del trabajo se transitó desde el análisis teórico de propagación y modulación en HF, pasando por el estudio estructural del protocolo, hasta la validación empírica y el desarrollo experimental del rediseño propuesto.

El presente trabajo permitió abordar de manera integral la viabilidad del protocolo WSPR como canal para la transmisión de datos de telemetría en entornos de señal débil. A partir del análisis empírico desarrollado en el Capítulo 3, se comprobó que el protocolo exhibe un desempeño robusto en términos de alcance y relación señal–ruido, incluso bajo condiciones de muy baja potencia de transmisión. Los resultados obtenidos –incluyendo trayectos intercontinentales con potencias inferiores a 1 W y valores de SNR consistentes con la correcta decodificación– confirman que el esquema físico y de codificación original de WSPR posee características compatibles con aplicaciones de telemetría de baja tasa de bit.

Asimismo, el estudio de la variación por banda, potencia, franja horaria y ciclo solar permitió contextualizar el comportamiento del protocolo dentro del marco teórico de la propagación ionosférica expuesto en el Capítulo 1. La correspondencia observada entre fases de actividad solar y variaciones en las métricas de desempeño refuerza la coherencia entre los fundamentos físicos y los datos empíricos analizados. De este modo, el trabajo no solo evaluó el alcance técnico del protocolo, sino que lo situó dentro de un marco físico consistente.

En complemento, el análisis estructural desarrollado en el Capítulo 2 permitió comprender en detalle la arquitectura interna del protocolo WSPR, incluyendo la construcción del bloque de 50 bits de carga útil y su procesamiento a través de las etapas de codificación convolucional, interleaving y modulación 4–FSK. Asimismo, la revisión del código fuente de referencia permitió identificar el punto técnicamente viable para la redefinición de dicha carga útil, sin afectar la cadena física de transmisión.

Sobre la base de estos resultados, el Capítulo 4 presentó una propuesta concreta de adaptación del bloque de 50 bits de carga útil de WSPR para el transporte de información de telemetría. El esquema diseñado redistribuye dichos bits en tres campos estructurados –identificador de sensor, identificador de magnitud y valor medido– y fue implementado mediante la modificación controlada del software de referencia. Las pruebas experimentales desarrolladas en la Sección 4.3, incluyendo validación nominal, estrés de límites y manejo de valores negativos, confirmaron la correcta inserción y recuperación íntegra de la información dentro de la trama original, sin alterar los mecanismos de modulación ni el esquema de codificación convolucional del protocolo.

Un aporte relevante del trabajo radica en la definición de un catálogo estructurado de magnitudes y unidades, construido a partir del análisis comparativo de estándares internacionales. Este catálogo proporciona un mecanismo compacto y trazable para representar variables físicas dentro de un entorno de codificación extremadamente restringido, asegurando interoperabilidad semántica y escalabilidad futura.

En conjunto, los hallazgos obtenidos permiten afirmar que WSPR puede ser reutilizado como un canal experimental de telemetría de muy baja tasa de bit, aprovechando su infraestructura global ya consolidada y su probada capacidad de operación en condiciones de señal débil. Si bien el protocolo no fue concebido originalmente para este propósito, el rediseño controlado de su carga útil demuestra que es posible extender su funcionalidad sin comprometer su arquitectura física.

VENTAJAS DEL ENFOQUE ADOPTADO

El rediseño del bloque de 50 bits mediante la estructura propuesta ofrece varias ventajas técnicas en comparación con alternativas más invasivas:

- **Compatibilidad con el flujo interno del protocolo:** Al mantenerse inalteradas las etapas de codificación convolucional, interleaving, CRC y modulación 4-FSK, la señal transmitida continúa ajustándose a las especificaciones físicas del protocolo WSPR. Tal como se verifica en las pruebas experimentales en la Sección 4.3, las tramas generadas mediante el esquema propuesto fueron procesadas correctamente por el flujo de codificación y decodificación estándar, aun cuando el contenido semántico de los campos difiere del uso original.
- **Simplicidad de implementación:** El cambio se concentra en la subrutina `wqencode` de `wsprcode.f90`, responsable de la construcción del bloque de 50 bits. Al no modificar otros módulos, se reduce el riesgo de introducir errores y se facilita la replicación del esquema en diferentes entornos.
- **Escalabilidad:** La asignación de 20 bits para el Identificador del Sensor permite direccionar más de un millón de nodos transmisores, lo que resulta suficiente incluso para redes distribuidas de gran escala.
- **Flexibilidad en la codificación de magnitudes:** La inclusión de un campo de 14 bits para el Identificador de Magnitud habilita la definición de una tabla amplia de variables físicas, acompañadas por sus unidades. Esta tabla, desarrollada en el marco del presente trabajo, actúa como un estándar de facto que asegura consistencia en la interpretación de los datos.
- **Precisión adecuada en los valores:** El uso de 16 bits para el campo Valor, con resolución de una décima (ejemplo: 40.0 se mapea como 400), permite transmitir con fidelidad la mayoría de las variables ambientales, eléctricas o experimentales de

interés en aplicaciones de telemetría.

En conjunto, este enfoque muestra que es posible adaptar WSPR a un esquema de telemetría sin alterar su naturaleza esencial, conservando robustez frente a canales ruidosos y manteniendo la viabilidad de decodificación con las herramientas ya disponibles en la comunidad radioaficionada.

LIMITACIONES DEL USO DE WSPR EN TELEMETRÍA

Los resultados obtenidos permiten sostener la factibilidad de emplear WSPR como canal de telemetría, aunque el proceso de desarrollo también dejó en evidencia un conjunto de limitaciones técnicas y operativas que condicionan su aplicación práctica.

Una de las más relevantes es la rigidez de la trama de 50 bits, que representa una restricción difícil de evitar. La necesidad de repartir esos bits entre identificadores, magnitudes y valores obliga a diseñar esquemas muy ajustados y descartar la inclusión de elementos adicionales. Esta limitación no impidió validar el modelo experimental, pero restringe el tipo y la cantidad de información que es posible transmitir.

Otra limitación está relacionada con la naturaleza unidireccional del protocolo. WSPR fue pensado para la emisión y recepción de señales sin contemplar un canal de retorno. Esto significa que no pueden implementarse acuses de recibo, mecanismos de control de errores o estrategias de retransmisión en tiempo real. La consecuencia es que la confiabilidad depende únicamente de la robustez del protocolo y de la repetición de tramas, lo cual incrementa la latencia y restringe su uso en escenarios donde la inmediatez sea indispensable.

La exigencia de sincronización temporal y estabilidad de frecuencia constituye un tercer límite. Para que una transmisión sea decodificada, debe iniciarse en momentos muy precisos y mantenerse dentro de márgenes estrictos de deriva de oscilador. En contextos donde no se dispone de GPS o de servidores NTP, esta condición puede convertirse en un obstáculo para la operación autónoma de estaciones de telemetría.

A ello se suma la variabilidad de la propagación ionosférica, un factor que escapa al control del sistema. La investigación mostró que existen períodos de gran eficiencia seguidos de otros donde, aún transmitiendo en idénticas condiciones, las señales no logran recibirse. Este comportamiento, ligado al ciclo solar, a las estaciones del año y a fenómenos atmosféricos, introduce una incertidumbre que, aunque esperable en cualquier comunicación en HF, limita la previsibilidad del sistema.

En conjunto, estas limitaciones no invalidan los logros de la investigación, pero sí delimitan el marco en el que puede considerarse realista la aplicación de WSPR como

sistema de telemetría: proyectos donde se acepten bajas tasas de transmisión, la ausencia de interacción inmediata y la variabilidad en la disponibilidad del canal.

POSIBILIDADES DE APLICACIÓN EN ESCENARIOS REALES

Los resultados obtenidos en este trabajo trascienden la validación técnica del protocolo WSPR, evidenciando su potencial para el transporte de información de sensores en entornos donde las comunicaciones convencionales presentan limitaciones económicas, técnicas o geográficas. En este sentido, la adaptación propuesta permite proyectar aplicaciones concretas en sistemas reales de telemetría de muy baja tasa de datos.

Una primera línea de aplicación se vincula con el monitoreo ambiental en zonas de difícil acceso. En contextos donde la implementación de infraestructura de comunicación resulta inviable, el uso de WSPR posibilitaría la operación sostenida de estaciones meteorológicas o hidrológicas, tales como sensores de temperatura, humedad o caudal. El bajo consumo energético evidenciado permite considerar la utilización de fuentes autónomas, como paneles solares y baterías de baja capacidad, habilitando largos períodos de funcionamiento sin intervención.

Asimismo, se identifican aplicaciones en estaciones científicas aisladas, como proyectos astronómicos, geofísicos o biológicos en regiones remotas. En estos escenarios, la disponibilidad de un canal de transmisión independiente de infraestructuras costosas permitiría el envío de variables críticas, aprovechando la red global de receptores WSPR.

En el ámbito de la gestión de emergencias, el protocolo podría constituir un canal redundante de comunicación ante fallas de infraestructura. Su capacidad de propagación a grandes distancias con potencias reducidas permitiría transmitir información esencial para la toma de decisiones, aun en condiciones adversas.

En síntesis, las aplicaciones analizadas evidencian que el bajo caudal de información de WSPR, lejos de constituir una limitación, define su nicho de aplicación, posicionándolo como una solución adecuada para escenarios donde la prioridad radica en la confiabilidad y el alcance de la transmisión.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Los avances logrados en este trabajo dejan en claro que la adaptación de WSPR para telemetría es viable. Lo realizado aquí (modificar el programa de referencia para insertar identificadores, magnitudes y valores en la trama de 50 bits y comprobar su correcta decodificación) constituye apenas un primer paso, una prueba de concepto que abre la puerta a investigaciones más ambiciosas.

Una de las continuaciones más necesarias es la realización de pruebas en campo. Hasta ahora, las validaciones se realizaron con datos históricos y simulaciones controladas,

lo cual fue suficiente para demostrar la factibilidad teórica y técnica. Sin embargo, llevar el sistema a la práctica en entornos reales (por ejemplo, instalando nodos alimentados con energía solar en ambientes inhóspitos o en regiones rurales apartadas) permitiría observar cómo responde frente a factores difíciles de reproducir en laboratorio, como variaciones climáticas, interferencias locales o inestabilidades ionosféricas.

Otra línea de trabajo apunta al desarrollo de variantes del protocolo. En este proyecto se implementó una modificación mínima, suficiente para confirmar que la estructura rígida de WSPR admite cierto grado de adecuación. Sobre esa base, es posible pensar en evoluciones que incorporen técnicas de multiplexación de variables, bits adicionales para control de errores o esquemas de compresión a medida. El desafío será mantener el equilibrio: ampliar las capacidades sin perder la sencillez, la eficiencia y la resistencia al ruido que caracterizan al protocolo.

Una tercera línea de investigación se orienta al diseño de hardware específico para este esquema de transmisión. En la actualidad, la mayoría de las transmisiones WSPR se realizan mediante equipos de radioaficionados convencionales o implementaciones en computadoras personales. El desarrollo de dispositivos dedicados, compactos, de bajo consumo y con sincronización autónoma permitiría avanzar hacia aplicaciones más robustas y reproducibles.

Dichos dispositivos podrían integrar sensores, módulos de transmisión y sistemas de gestión energética, constituyendo plataformas experimentales adecuadas para monitoreo ambiental o investigación científica.

Finalmente, se destacan aplicaciones en entornos educativos y comunitarios, donde la radioafición y las instituciones académicas pueden emplear este esquema como herramienta para la experimentación en propagación, eficiencia energética y codificación digital.

En conjunto, estas líneas marcan un horizonte claro: lo logrado hasta aquí demuestra que WSPR puede ser adaptado para telemetría, pero el verdadero desafío está en llevar esa adaptación al terreno práctico, explorando variantes protocolarias, diseñando hardware dedicado y estableciendo las condiciones técnicas para su utilización. Lo que en este trabajo se mostró como posible, en futuras investigaciones puede convertirse en una realidad operativa.

BIBLIOGRAFÍA

- American Radio Relay League. (2021). *The ARRL Handbook for Radio Communications 2022* (99.^a ed.). American Radio Relay League.
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: Analysis and design* (4th ed.). Wiley.
- Bisquerra Alzina, R. (2009). *Metodología de la investigación educativa* (2° ed.). E. La Muralla, S.A.
- Bureau International des Poids et Mesures. (2025). *Le Système international d'unités/The International System of Units* [Brochure]. 9th edition. <https://doi.org/10.59161/AUEZ1291>
- Cerf, V., Burleigh, S., Hooke, A., Torgerson, L., Durst, R., Scott, K., Fall, K., & Weiss, H. (2007). *Delay-Tolerant Networking Architecture* (RFC 4838). Internet Engineering Task Force. Recuperado de <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4838>
- Davies, K. (1990). *Ionospheric radio*. Peter Peregrinus Ltd./IEE. <https://doi.org/10.1049/PBEW031E>
- Deutsch, P. (1996). *DEFLATE compressed data format specification version 1.3* (RFC 1951). Internet Engineering Task Force. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1951>
- Gallager, R. G. (1963). Low-density parity-check codes. *IRE Transactions on Information Theory*, 8(1), 21-28. <https://doi.org/10.1109/TIT.1962.1057683>
- Ghemosu, D. (2023, marzo). *A Comprehensive Notes on Computer Network*. ResearchGate. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/369542690_A_Comprehensive_Notes_on_Computer_Network
- Hamming, R. W. (1950). Error detecting and error correcting codes. *Bell System Technical Journal*, 29(2), 147-160. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Huffman, D. A. (1952). A method for the construction of minimum-redundancy codes. *Proceedings of the I.R.E.*, 40(9), 1098-1101. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1952.273898>

- IEEE Standards Association. (2000). *IEEE Std 100™: The authoritative dictionary of IEEE standards terms* (7th ed.). IEEE.
- International Amateur Radio Union. (2021). *IARU Region 2 band plan*. Recuperado de <https://www.iaru-r2.org>
- International Electrotechnical Commission. (2006). *IEC 60050-351:2006-International Electrotechnical Vocabulary (IEV)*. Recuperado de <https://www.electropedia.org>
- International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector [ITU-T]. (2012). *Recommendation ITU-T Y.2060: Overview of the Internet of Things*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060>
- International Telecommunication Union. (2020). *Radio Regulations (Edición 2020)*. ITU. Recuperado de <https://www.itu.int/hub/publication/r-reg-rr-2020/>
- International Telecommunication Union Radiocommunication Sector. (2019). *Recommendation ITU-R P.533-14: HF propagation prediction method*. ITU-R. Recuperado de <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.533-14-201908-l/en>
- International Telecommunication Union Radiocommunication Sector. (2021). *Recommendation ITU-R P.372-15: Radio noise*. ITU-R. Recuperado de https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-15-202109-!PDF-E.pdf
- Kraus, J. D. (1988). *Antennas* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Lempel, A., & Ziv, J. (1977). A universal algorithm for sequential data compression. *IEEE Transactions on Information Theory*, 23(3), 337-343. <https://doi.org/10.1109/TIT.1977.1055714>
- Proakis, J. G., & Salehi, M. (2008). *Digital communications* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Reed, I. S., & Solomon, G. (1960). Polynomial codes over certain finite fields. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 8(2), 300-304. <https://doi.org/10.1137/0108018>
- Sánchez, C. (2019). Normas APA – 7ma (séptima) edición. Normas APA (7ma edición). <https://normas-apa.org/>

- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Sinnott, R. W. (1984). Virtues of the haversine. *Sky & Telescope*, 68(2), 158.
- Sklar, B. (2001). *Digital communications: Fundamentals and applications* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Stallings, W. (2016). *Data and computer communications* (10th ed.). Pearson.
- Tanenbaum, A. S., & Wetherall, D. J. (2011). *Computer networks* (5th ed.). Pearson.
- Taylor, J., & Walker, W. (2010). WSPR: Weak Signal Propagation Reporter—"Whispering Around the World" [Artículo]. Recuperado de https://wsjt.sourceforge.io/WSPR_QST_Nov_2010.pdf
- Taylor, J. (2017). *WSJT-X: Weak Signal Communication by K1JT—User guide*. Recuperado de <https://wsjt.sourceforge.io/wsjsx-doc/wsjsx-main-3.0.0-rc1.html>
- Taylor, J., Franke, S. & Somerville, B. (2017, October). Work the World with WSJT-X: Part 1. QST. American Radio Relay League.
- Taylor, J., Franke, S. & Somerville, B. (2017, November). Work the World with WSJT-X: Part 2. QST. American Radio Relay League.
- Viterbi, A. J. (1967). Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm. *IEEE Transactions on Information Theory*, 13(2), 260-269. <https://doi.org/10.1109/TIT.1967.1054010>
- WSPRnet. (2025). *Daily station statistics*. Recuperado de <https://wsprnet.org/>

ANEXO I – SCRIPTS DE OBTENCIÓN DE DATOS

Para garantizar la disponibilidad del conjunto de datos utilizado en el análisis del capítulo 3, fue necesario desarrollar un procedimiento completo de descarga y consolidación que permitiera obtener desde la base pública db1.wspr.live todos los registros correspondientes a transmisiones emitidas desde Argentina con prefijo LU o LW y potencia declarada menor o igual a 30 dBm. Dado que las consultas directas sobre períodos extensos producen errores de tiempo excedido, se implementó un mecanismo de segmentación temporal que divide la descarga en intervalos mensuales y los coordina a través de un orquestador anual.

El primer script ejecutado fue un orquestador encargado de recorrer secuencialmente todos los años comprendidos entre 2008 y 2025. Su función principal consistió en invocar, para cada año, el módulo encargado de realizar las consultas mensuales, incorporando una espera intermedia que evitara sobrecargar el servidor remoto. Este componente permitió estructurar el flujo de trabajo temporal y asegurar que cada año fuera procesado de manera independiente.

BASH

```
#!/bin/bash

for year in $(seq 2008 +1 2025); do
  echo "descargando año $year..."
  ./descargar_wspr.sh "$year"
  echo "Esperando 300 segundos para respetar cooldown..."
  sleep 300
done

echo "Descarga completa de 2008 a 2025."
```

El segundo script constituyó el núcleo operativo del proceso. Recibía como parámetro el año a descargar y generaba doce consultas SQL, una por cada mes, calculando dinámicamente los límites iniciales y finales del período mensual. Las consultas incluían únicamente las columnas necesarias para el análisis y filtraban las transmisiones según los criterios definidos (prefijos LU/LW y potencia ≤ 30 dBm). En la primera consulta del año se incorporaba el encabezado del archivo CSV, mientras que las consultas subsiguientes anexaban únicamente los datos, evitando duplicidades. Cada respuesta obtenida del servidor era almacenada de forma incremental en un archivo anual, acompañado de pausas breves para respetar el tiempo de enfriamiento impuesto por el servicio.

BASH

```
#!/bin/bash

YEAR=$1
OUTPUT="wspr_LU_LW_${YEAR}.csv"
FIRST_MONTH=true

echo "Descargando datos WSPR LU/LW con potencia ≤1W para el año
$YEAR..."

for MONTH in {01..12}; do
    START="${YEAR}-${MONTH}-01 00:00:00"

    # Calcular fin de mes
    END=$(date -d "$START +1 month -1 second" +"%Y-%m-%d %H:%M:%S")

    echo "Consultando $START hasta $END..."

    # Columnas válidas según wspr.live
    COLUMNS="id, time, band, rx_sign, rx_lat, rx_lon, rx_loc, tx_sign,
tx_lat, tx_lon, tx_loc, distance, azimuth, rx_azimuth, frequency,
power, snr, drift, version, code"

    SQL="SELECT $COLUMNS FROM wspr.rx \
WHERE (tx_sign LIKE 'LU%' OR tx_sign LIKE 'LW%') \
AND power > 0 AND power <= 30 \
AND time BETWEEN '$START' AND '$END' \
ORDER BY time \
FORMAT $( $FIRST_MONTH && echo CSVWithNames || echo CSV )"

    ENCODED_SQL=$(python3 -c "import urllib.parse;
print(urllib.parse.quote(''$SQL'))")
    URL="https://db1.wspr.live/?query=${ENCODED_SQL}"

    # Acumular resultados
    if $FIRST_MONTH; then
        curl -s "$URL" > "$OUTPUT"
        FIRST_MONTH=false
    else
        curl -s "$URL" >> "$OUTPUT"
    fi
done
```

```
echo "Esperando 10 segundos para respetar cooldown..."
sleep 10 # respetar cooldown del servidor
done

echo "Archivo generado: $OUTPUT"
```

Una vez generados los archivos correspondientes a cada año, se empleó un tercer script destinado a unificar todos los resultados en un único archivo consolidado. Para ello, se tomó el encabezado del primer archivo anual y posteriormente se incorporaron, uno a uno, los datos del resto de los años, omitiendo sus encabezados internos. El resultado final fue un único archivo CSV que reúne la totalidad de los registros recopilados, apto para su utilización en los análisis posteriores del capítulo 3.

BASH

```
#!/bin/bash

# Nombre del archivo de salida
OUTPUT="wspr_LU_LW_todos.csv"

# Buscar todos los CSV de cada año (ordenados)
ARCHIVOS=$(ls wspr_LU_LW_*.csv | sort)

# Tomar el encabezado del primer archivo
echo "Escribiendo encabezado desde $(echo "$ARCHIVOS" | head -n1)..."
head -n 1 $(echo "$ARCHIVOS" | head -n1) > "$OUTPUT"

# Agregar contenido (sin encabezado) de todos los archivos
for file in $ARCHIVOS; do
    echo "Agregando datos de $file..."
    tail -n +2 "$file" >> "$OUTPUT"
done

echo "Archivos combinados en $OUTPUT"
```

Este procedimiento completo permitió obtener un conjunto integral, homogéneo y depurado de registros WSPR para más de quince años de actividad, asegurando que el análisis desarrollado se base en una fuente consistente y adecuadamente estructurada, compatible con las exigencias metodológicas del trabajo.

Como referencia ilustrativa, previo a su procesamiento estadístico y gráfico, los datos descargados presentaban una estructura tabular típica de los registros de WSPRnet. Cada fila correspondía a una única transmisión reportada y contenía, entre otros campos, la fecha y hora UTC del evento, el indicativo transmisor, el indicativo receptor, el locator Maidenhead de ambas estaciones, la banda utilizada, la potencia declarada, el SNR estimado por la estación receptora, la frecuencia exacta en hercios y la distancia de propagación calculada en kilómetros. Una muestra mínima de estos registros:

CSV															
"id"	"time"	"band"	"rx_sign"	"rx_lat"	"rx_lon"	"rx_loc"	"tx_sign"	"tx_lat"	"tx_lon"	"tx_loc"	"distance"	"azimuth"	"rx_azimuth"	"frequency"	"power"
9075725096	"2025-01-01 00:00:00"	14	"DP0POL"	-48.271	5.542	"JE21sr"	"LU8YY/Q"	-32.354	-65.208	"FF77jp"	6028	129	259	14097160	10
9075731318	"2025-01-01 00:00:00"	14	"DP0GVN/1"	-70.646	-8.292	"IB59ui"	"LU8YY/Q"	-32.354	-65.208	"FF77jp"	5434	158	290	14097174	10
9075739370	"2025-01-01 00:02:00"	14	"DP0GVN"	-70.646	-8.292	"IB59ui"	"LW6DLS"	-34.771	-58.625	"GF05qf"	4961	159	295	14097127	23
9075741465	"2025-01-01 00:02:00"	14	"WA2ZKD"	43.146	-77.625	"FN13ed"	"LW6DLS"	-34.771	-58.625	"GF05qf"	8876	346	164	14097097	23
9075741756	"2025-01-01 00:02:00"	14	"DP0GVN/1"	-70.646	-8.292	"IB59ui"	"LW6DLS"	-34.771	-58.625	"GF05qf"	4961	159	295	14097136	23
9075835425	"2025-01-01 00:02:00"	14	"KD2OM"	42.979	-77.458	"FN12gx"	"LW6DLS"	-34.771	-58.625	"GF05qf"	8854	346	164	14097093	23
9075736949	"2025-01-01 00:02:00"	18	"N2HQI"	43.021	-76.458	"FN13sa"	"LU8YY/Q"	-32.354	-65.208	"FF77jp"	8459	352	170	18106142	10

Este formato entregado por la base db1.wspr.live, fue la materia prima a partir de la cual se aplicaron las técnicas de limpieza, filtrado, cálculo y visualización utilizadas en el capítulo 3.

ANEXO II – SCRIPTS DE PROCESAMIENTO DE DATOS

La elección de Python como entorno principal para el análisis se basa no solo en su versatilidad general, sino también en la disponibilidad de bibliotecas científicas maduras que permiten abordar de manera integrada todas las etapas del procesamiento.

En particular, los scripts desarrollados en esta tesina emplean pandas para la manipulación eficiente de grandes volúmenes de datos tabulares, numpy para operaciones numéricas vectorizadas, matplotlib.pyplot para la generación de gráficos y visualizaciones reproducibles, y os para la gestión estructurada de archivos y directorios. Este conjunto de herramientas permite implementar un flujo de trabajo robusto que abarca desde la carga y depuración del dataset, pasando por el cálculo de métricas estadísticas y la segmentación temporal, hasta la producción automatizada de las figuras que componen el Capítulo 3.

La combinación de estas bibliotecas garantiza un procesamiento confiable, transparente y fácilmente extensible, adecuado para estudios de propagación y telemetría que requieren precisión analítica y manejo eficiente de millones de registros.

ANÁLISIS 1: DISTANCIA MEDIA POR BANDA (KM)

PYTHON 3

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import os

# Cargar el dataset (ajustá el path si es necesario)
df = pd.read_csv("../wspr_LU_LW_todos.csv")

# Filtrar registros con valores válidos
df = df[df['band'].notna() & df['distance'].notna()]

# Agrupar por banda y calcular estadísticas clave
grouped = df.groupby('band')['distance'].agg(['min', 'mean',
'max']).reset_index()
grouped = grouped.sort_values(by='band') # Ordenar por frecuencia

# Guardar resultados en CSV sin notación científica
grouped.to_csv("resultado.csv", index=False, float_format='%.2f')

# Gráfico de distancia media por banda
plt.figure(figsize=(10, 6))
bars = plt.bar(grouped['band'].astype(str), grouped['mean'],
width=0.6, color='skyblue')
```

```

# Etiquetas numéricas sobre las barras
for bar in bars:
    height = bar.get_height()
    plt.annotate(f'{height:.0f}', xy=(bar.get_x() + bar.get_width() /
2, height),
                xytext=(0, 5), textcoords='offset points',
ha='center', fontsize=9)

# Configuración del gráfico
plt.title("Distancia media por banda (km)", fontsize=14)
plt.xlabel("Banda (MHz)", fontsize=12)
plt.ylabel("Distancia media (km)", fontsize=12)
plt.grid(axis='y', linestyle='--', alpha=0.6)
plt.tight_layout()

# Guardar gráfico
plt.savefig(f"grafico.png", dpi=600)
plt.close()

```

ANÁLISIS 2: DISTANCIA MEDIA, MÁXIMA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR SEGÚN POTENCIA EMITIDA

PYTHON 3

```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import os

# Carpeta de salida
output_dir = "."

# Cargar archivo
df = pd.read_csv("../wspr_LU_LW_todos.csv")

# Agrupar por potencia en watts
resumen = df.groupby('power_watt')['distance'].agg(['mean', 'max',
'std']).reset_index()
resumen.columns = ['Potencia (W)', 'Distancia media (km)', 'Distancia
máxima (km)', 'Desviación estándar']

```

```

# Guardar CSV
resumen.to_csv(os.path.join(output_dir, "resultado.csv"),
index=False)

# Convertir a arrays para el gráfico
x = resumen['Potencia (W)'].to_numpy()
mean_vals = resumen['Distancia media (km)'].to_numpy()
max_vals = resumen['Distancia máxima (km)'].to_numpy()
std_vals = resumen['Desviación estándar'].to_numpy()

# Gráfico
plt.figure(figsize=(12, 7))

# Curvas
plt.plot(x, mean_vals, marker='o', label='Distancia media',
color='#1f77b4')
plt.plot(x, max_vals, marker='o', label='Distancia máxima',
color='#ff7f0e')

# Sombreado  $\pm 1\sigma$ 
plt.fill_between(x, mean_vals - std_vals, mean_vals + std_vals,
color='#1f77b4', alpha=0.2, label='±1σ sobre media')

# Etiquetas numéricas
for i in range(len(x)):
    plt.text(x[i], mean_vals[i] + 150, f"{int(mean_vals[i])}",
ha='center', fontsize=8, color='#1f77b4')
    plt.text(x[i], max_vals[i] + 150, f"{int(max_vals[i])}",
ha='center', fontsize=8, color='#ff7f0e')

# Ejes y detalles
plt.xscale('log')
plt.xticks(x, labels=[str(w) for w in x], rotation=45)
plt.xlabel("Potencia (Watts, escala logarítmica)")
plt.ylabel("Distancia (km)")
plt.title('Distancia media, máxima y desviación estándar según
potencia emitida (Watts)', fontsize=14)
plt.grid(True, which="both", linestyle='--', alpha=0.6)
plt.legend(
    loc='upper right',
    bbox_to_anchor=(1, 0.75), # 0.75 = 25% desde arriba (1.0 sería el
tope)

```

```

        frameon=True,
        fontsize='small'
    )
plt.tight_layout()

# Guardar gráfico
plt.savefig(os.path.join(output_dir, "grafico.png"))

```

ANÁLISIS 3: DISTANCIA MEDIA, MÁXIMA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR POR POTENCIA Y BANDA

PYTHON 3

```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import os

# Asegurarse de que la salida sea en el directorio actual
output_dir = "."
os.makedirs(output_dir, exist_ok=True)

# Cargar los datos
df = pd.read_csv("../wspr_LU_LW_todos.csv")

# Filtrar bandas deseadas
bandas_objetivo = [3, 7, 14, 28]
df = df[df['band'].isin(bandas_objetivo)]

# Agrupar para obtener media y desviación por banda y potencia
(watts)
grouped = df.groupby(['power_watt', 'band'])['distance'].agg(['mean',
'std']).reset_index()

# Calcular desviación estándar global (todas las bandas juntas por
potencia)
global_std = df.groupby('power_watt')['distance'].std().reset_index()
global_mean =
df.groupby('power_watt')['distance'].mean().reset_index()

# Iniciar gráfico
plt.figure(figsize=(12, 6))

```

```

# Sombreado global de la desviación estándar
x_std = global_std['power_watt'].to_numpy()
mean_vals = global_mean['distance'].to_numpy()
std_vals = global_std['distance'].to_numpy()

plt.fill_between(x_std, mean_vals - std_vals, mean_vals + std_vals,
color='#1f77b4', alpha=0.2, label='±1σ global')

# Graficar solo la distancia media de las bandas seleccionadas
for banda in bandas_objetivo:
    subset = grouped[grouped['band'] == banda]
    x_vals = subset['power_watt'].to_numpy()
    y_vals = subset['mean'].to_numpy()

    plt.plot(x_vals, y_vals, marker='o', label=f'{banda} MHz')

    for x, y in zip(x_vals, y_vals):
        plt.text(x, y + 150, f"{y:.0f}", ha='center', fontsize=8)

# Configuración del gráfico
plt.title("Distancia media, máxima y desviación estándar por potencia
y banda")
plt.xlabel("Potencia emitida (W)")
plt.ylabel("Distancia media (km)")
plt.xscale('log') # Escala logarítmica
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.5)
plt.xticks(sorted(df['power_watt'].unique()))
plt.gca().get_xaxis().set_major_formatter(plt.ScalarFormatter())

# Leyenda ajustada dentro del área del gráfico
plt.legend(loc='upper right', bbox_to_anchor=(0.995, 0.95),
fontsize=9)

# Ajuste para que la leyenda no tape los datos
plt.subplots_adjust(top=0.92)

# Guardar gráfico
plt.tight_layout()
plt.savefig(os.path.join(output_dir, "grafico.png"))
plt.close()

```

ANÁLISIS 4: DISTANCIA MÁXIMA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR POR POTENCIA

PYTHON 3

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import os
from matplotlib.ticker import ScalarFormatter

# Directorio de salida
output_dir = "."
os.makedirs(output_dir, exist_ok=True)

# Cargar datos
df = pd.read_csv("../wspr_LU_LW_todos.csv")

# Filtrar bandas deseadas
bandas_objetivo = [3, 7, 14, 28]
df = df[df['band'].isin(bandas_objetivo)]

# Agrupar para obtener máximos por potencia y banda
grouped = df.groupby(['power_watt',
                      'band'])['distance'].max().reset_index()

# Desviación estándar global (todas las bandas juntas por potencia)
global_std = df.groupby('power_watt')['distance'].std().reset_index()
global_mean =
df.groupby('power_watt')['distance'].mean().reset_index()

# Iniciar gráfico
plt.figure(figsize=(12, 6))

# Sombreado  $\pm 1\sigma$  global
x_std = global_std['power_watt'].to_numpy()
mean_vals = global_mean['distance'].to_numpy()
std_vals = global_std['distance'].to_numpy()

plt.fill_between(x_std, mean_vals - std_vals, mean_vals + std_vals,
                 color='#1f77b4', alpha=0.2, label='±1σ global')

# Graficar distancia máxima por banda
```

```

colors = {3: 'blue', 7: 'orange', 14: 'green', 28: 'red'}
for banda in bandas_objetivo:
    subset = grouped[grouped['band'] == banda]
    x_vals = subset['power_watt'].to_numpy()
    y_vals = subset['distance'].to_numpy()

    plt.plot(x_vals, y_vals, marker='o', label=f'{banda} MHz',
color=colors[banda])
    for x, y in zip(x_vals, y_vals):
        plt.text(x, y + 150, f"{int(y)}", ha='center', fontsize=8)

# Configuración del gráfico
plt.title("Distancia máxima y desviación estándar por potencia")
plt.xlabel("Potencia emitida (W)")
plt.ylabel("Distancia máxima (km)")
plt.xscale('log')
plt.xticks(sorted(df['power_watt'].unique()))
plt.gca().get_xaxis().set_major_formatter(ScalarFormatter())
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.5)

# Leyenda dentro del área del gráfico
plt.legend(loc='lower right', bbox_to_anchor=(0.99, 0.01),
fontsize=9)

plt.subplots_adjust(top=0.92)

# Guardar gráfico
plt.tight_layout()
plt.savefig(os.path.join(output_dir, "grafico.png"))
plt.close()

```

ANÁLISIS 5: DISPERSIÓN SNR VS DISTANCIA POR BANDA

PYTHON 3

```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import os
import matplotlib.ticker as ticker

```

```

# Leer archivo CSV
df = pd.read_csv('../wspr_LU_LW_todos.csv')

# Filtrar bandas deseadas
bandas_deseadas = [3, 7, 14, 28]
df = df[df['band'].isin(bandas_deseadas)]

# Crear figura y ejes
fig, axes = plt.subplots(2, 2, figsize=(12, 8), sharex=False,
sharey=False)
axes = axes.flatten()

# Definir colormap
cmap = plt.cm.viridis
snr_min, snr_max = df['snr'].min(), df['snr'].max()

# Graficar por banda
for i, banda in enumerate(bandas_deseadas):
    ax = axes[i]
    subdf = df[df['band'] == banda]

    # Guardar CSV individual
    subdf[['distance',
'snr']].to_csv(f'Dispersión_snr_distancia_{banda}MHz.csv',
                index=False,
float_format='%.2f')

    # Gráfico
    scatter = ax.scatter(subdf['distance'], subdf['snr'],
c=subdf['snr'],
                        cmap=cmap, alpha=0.7, s=10, vmin=snr_min,
vmax=snr_max)

    #ax.set_xscale('log')
    ax.set_title(f'{banda} MHz')
    ax.set_xlabel('Distancia (km)')
    ax.set_ylabel('SNR (dB)')
    ax.grid(True, linestyle='--', linewidth=0.5)
    ax.xaxis.set_major_formatter(ticker.ScalarFormatter())
    ax.ticklabel_format(axis='x', style='plain')

# Ajustar diseño y agregar colorbar a la derecha

```

```
plt.tight_layout(rect=[0, 0, 0.93, 0.95])
cbar_ax = fig.add_axes([0.92, 0.15, 0.015, 0.7]) # [left, bottom,
width, height]
cbar = fig.colorbar(scatter, cax=cbar_ax)
cbar.set_label('SNR (dB)')

# Título general y guardar
plt.suptitle('Dispersión SNR vs distancia por banda', fontsize=14)
plt.savefig('grafico.png')
plt.close()
```

ANÁLISIS 6: SNR PROMEDIO POR BANDA Y POTENCIA EMITIDA EN BANDAS SELECCIONADAS

PYTHON 3

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

# Cargar datos
df = pd.read_csv("../wspr_LU_LW_todos.csv")

# Filtrar bandas de interés
bandas_validas = [3, 7, 14, 28] # 80m, 40m, 20m, 10m
df = df[df['band'].isin(bandas_validas)]

# Agrupar por banda y potencia, y calcular SNR promedio
tabla = df.groupby(['band',
'power_watt'])['snr'].mean().reset_index()

# Pivot para heatmap
pivot = tabla.pivot(index='band', columns='power_watt',
values='snr').sort_index(ascending=False)

# Crear gráfico
plt.figure(figsize=(12, 6))
ax = sns.heatmap(pivot, annot=True, fmt=".1f", cmap="viridis",
linewidths=0.5, cbar_kws={'label': 'SNR promedio (dB)'})

# Etiquetas
plt.title("SNR promedio por banda y potencia emitida")
```

```
plt.xlabel("Potencia Emitida (W)")
plt.ylabel("Banda (MHz)")

# Guardar
plt.tight_layout()
plt.savefig("grafico.png", dpi=300)
pivot.to_csv("snr_por_banda_potencia.csv")
plt.close()
```

ANÁLISIS 7: DISTANCIA MEDIA POR BANDA Y AÑO

PYTHON 3

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from scipy.interpolate import make_interp_spline

# Leer y preparar datos
df = pd.read_csv("../wspr_LU_LW_todos.csv")
df['time'] = pd.to_datetime(df['time'], errors='coerce')
df['año'] = df['time'].dt.year

# Calcular estadísticas por año y banda
resumen = df.groupby(['año', 'band'])['distance'].agg(['min', 'mean',
'max']).reset_index()
resumen.columns = ['Año', 'Banda (MHz)', 'Distancia mínima (km)',
'Distancia media (km)', 'Distancia máxima (km)']

# Filtrar bandas deseadas
bandas_interes = [3, 7, 14, 28]
resumen_filtrado = resumen[resumen['Banda
(MHz)'].isin(bandas_interes)]

# Guardar CSV
resumen_filtrado.to_csv("resultado.csv", index=False)

# Pivot para graficar
pivot = resumen_filtrado.pivot(index='Año', columns='Banda (MHz)',
values='Distancia media (km)')

# Calcular media y desviación estándar global por año
```

```

df_stats_global = resumen_filtrado.groupby('Año')['Distancia media
(km)'].agg(['mean', 'std']).dropna()

# Crear gráfico
plt.figure(figsize=(14, 8))

# Sombreado de desviación estándar global
x_shade = df_stats_global.index
y_mean = df_stats_global['mean']
y_std = df_stats_global['std']

plt.fill_between(x_shade, y_mean - y_std, y_mean + y_std,
color='#1f77b4', alpha=0.2, label='±1σ global')

# Graficar curvas suavizadas para cada banda
for col in pivot.columns:
    x_vals = pivot.index.to_numpy()
    y_vals = pivot[col].to_numpy()
    mask = ~np.isnan(y_vals)

    x = x_vals[mask]
    y = y_vals[mask]

    if len(x) < 4:
        plt.plot(x, y, marker='o', label=f'{col} MHz')
        continue

    x_smooth = np.linspace(x.min(), x.max(), 300)
    spline = make_interp_spline(x, y, k=3)
    y_smooth = spline(x_smooth)

    plt.plot(x_smooth, y_smooth, label=f'{col} MHz')

# Salida
plt.title('Distancia media por banda y año con desviación estándar')
plt.xlabel('Año')
plt.ylabel('Distancia media (km)')
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)
plt.xticks(np.arange(pivot.index.min(), pivot.index.max() + 1, 1),
rotation=45)
plt.legend(title='Banda (MHz)', bbox_to_anchor=(1.02, 1), loc='upper
left')

```

```
plt.tight_layout()
plt.savefig("grafico.png")
plt.close()
```

ANÁLISIS 8: SNR PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR POR BANDA Y AÑO

PYTHON 3

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import os

# Configuración
output_dir = "."
os.makedirs(output_dir, exist_ok=True)

# Cargar datos
df = pd.read_csv("../wspr_LU_LW_todos.csv")

# Procesamiento
df['power_watt'] = pd.to_numeric(df['power_watt'], errors='coerce')
df['band'] = pd.to_numeric(df['band'], errors='coerce')
df['snr'] = pd.to_numeric(df['snr'], errors='coerce')
df['time'] = pd.to_datetime(df['time'], errors='coerce')
df['year'] = df['time'].dt.year

# Filtrar bandas específicas
bandas_objetivo = [3, 7, 14, 28]
df = df[df['band'].isin(bandas_objetivo)]

# Agrupar para curva global por año ( $\pm 1\sigma$ )
global_stats = df.groupby('year')['snr'].agg(['mean',
'std']).reset_index()

# Agrupar SNR promedio por banda y año
grouped = df.groupby(['year', 'band'])['snr'].mean().reset_index()

# Años disponibles
anios = sorted(df['year'].dropna().unique().astype(int))

# Crear gráfico
```

```
plt.figure(figsize=(12, 6))

# Sombreado de la desviación estándar global
plt.fill_between(global_stats['year'],
                 global_stats['mean'] - global_stats['std'],
                 global_stats['mean'] + global_stats['std'],
                 color='#1f77b4', alpha=0.2, label='±1σ global')

# Dibujar una línea por banda
for banda in bandas_objetivo:
    subset = grouped[grouped['band'] == banda]
    subset = subset.sort_values('year')
    x = subset['year'].to_numpy()
    y = subset['snr'].to_numpy()

    plt.plot(x, y, marker='o', label=f"{banda} MHz")

    for xi, yi in zip(x, y):
        plt.text(xi, yi + 0.5, f"{yi:.1f}", ha='center', fontsize=8)

# Salida
plt.xlabel("Año")
plt.ylabel("SNR promedio (dB)")
plt.title("SNR promedio y desviación estándar por banda y año")
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.5)
plt.legend(loc='lower right', fontsize=9)
plt.tight_layout()

# Guardar gráfico
plt.savefig(os.path.join(output_dir, "grafico.png"))
plt.close()
```

ANÁLISIS 9: SNR POR HORA DEL DÍA

PYTHON 3

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

# Cargar datos
df = pd.read_csv("../wspr_LU_LW_todos.csv")
```

```

# Filtrar bandas deseadas
bandas_objetivo = [3, 7, 14, 28]
df = df[df['band'].isin(bandas_objetivo)]

# Convertir columna de tiempo y extraer hora
df['hour'] = pd.to_datetime(df['time'], errors='coerce').dt.hour
df = df.dropna(subset=['hour']) # eliminar errores
df['hour'] = df['hour'].astype(int)

# Agrupar en bloques de 4 horas
df['hour_block'] = df['hour'] // 3
df['hour_label'] = df['hour_block'] * 3
df['hour_label'] = df['hour_label'].astype(str) + '-' +
(df['hour_label'] + 2).astype(str)

# Orden de categorías para eje X
orden_categorias = ['0-2', '3-5', '6-8', '9-11', '12-14', '15-17',
'18-20', '21-23' ]
df['hour_label'] = pd.Categorical(df['hour_label'],
categories=orden_categorias, ordered=True)

# Colores por banda
colores = {3: 'blue', 7: 'gold', 14: 'green', 28: 'red'}

# Crear figura 2x2
fig, axs = plt.subplots(2, 2, figsize=(14, 10), sharey=False)
axs = axs.flatten()

for i, banda in enumerate(bandas_objetivo):
    ax = axs[i]
    sub_df = df[df['band'] == banda].copy()
    sub_df['hour_label'] = pd.Categorical(sub_df['hour_label'],
categories=orden_categorias, ordered=True)

    # Boxplot
    sns.boxplot(
        data=sub_df,
        x='hour_label',
        y='snr',
        ax=ax,
        color=colores[banda]

```

```

)

# Mediana + suavizado
medianas = sub_df.groupby('hour_label',
observed=True)['snr'].median().reindex(orden_categorias)
medianas_suavizadas = medianas.rolling(window=2, min_periods=1,
center=True).mean()

# Línea de mediana suavizada
ax.plot(
    orden_categorias,
    medianas_suavizadas.values,
    marker='o',
    label='Mediana suavizada'
)

ax.set_title(f'Banda {banda} MHz')
ax.set_xlabel('Hora UTC (bloques de 3 horas)')
ax.set_ylabel('SNR')
ax.legend(loc='upper right')
ax.set_xticks(range(len(orden_categorias)))
ax.set_xticklabels(orden_categorias)

# Título global
plt.suptitle('Boxplot de SNR por hora del día', fontsize=14)
plt.tight_layout(rect=[0, 0, 1, 0.96])

# Guardar
plt.savefig("grafico.png")
plt.close()

```

ANÁLISIS 10: DISTANCIA POR HORA DEL DÍA

PYTHON 3

```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

# Cargar datos
df = pd.read_csv("../wspr_LU_LW_todos.csv")

```

```

# Filtrar bandas deseadas
bandas_objetivo = [3, 7, 14, 28]
df = df[df['band'].isin(bandas_objetivo)]

# Convertir columna de tiempo y extraer hora
df['hour'] = pd.to_datetime(df['time'], errors='coerce').dt.hour
df = df.dropna(subset=['hour']) # eliminar errores
df['hour'] = df['hour'].astype(int)

# Agrupar en bloques de 4 horas
df['hour_block'] = df['hour'] // 4
df['hour_label'] = df['hour_block'] * 4
df['hour_label'] = df['hour_label'].astype(str) + '-' +
(df['hour_label'] + 3).astype(str)

# Orden de categorías para eje X
orden_categorias = ['0-3', '4-7', '8-11', '12-15', '16-19', '20-23']
df['hour_label'] = pd.Categorical(df['hour_label'],
categories=orden_categorias, ordered=True)

# Colores por banda
colores = {3: 'blue', 7: 'gold', 14: 'green', 28: 'red'}

# Crear figura 2x2
fig, axs = plt.subplots(2, 2, figsize=(14, 10), sharey=False)
axs = axs.flatten()

for i, banda in enumerate(bandas_objetivo):
    ax = axs[i]
    sub_df = df[df['band'] == banda].copy()
    sub_df['hour_label'] = pd.Categorical(sub_df['hour_label'],
categories=orden_categorias, ordered=True)

    # Boxplot de distancia
    sns.boxplot(
        data=sub_df,
        x='hour_label',
        y='distance',
        ax=ax,
        color=colores[banda]
    )

```

```

# Mediana + suavizado
medianas = sub_df.groupby('hour_label',
observed=True)['distance'].median().reindex(orden_categorias)
medianas_suavizadas = medianas.rolling(window=2, min_periods=1,
center=True).mean()

# Línea de mediana suavizada
ax.plot(
    orden_categorias,
    medianas_suavizadas.values,
    marker='o',
    label='Mediana suavizada',
    color=colores[banda]
)

ax.set_title(f'Banda {banda} MHz')
ax.set_xlabel('Hora UTC (bloques de 4 horas)')
ax.set_ylabel('Distancia (km)')
ax.legend(loc='upper right')
ax.set_xticks(range(len(orden_categorias)))
ax.set_xticklabels(orden_categorias)

# Título global
plt.suptitle('Boxplot de distancia por hora del día', fontsize=14)
plt.tight_layout(rect=[0, 0, 1, 0.96])

# Guardar
plt.savefig("grafico.png")
plt.close()

```

ANEXO III – CATÁLOGO DE MAGNITUDES Y UNIDADES

El presente catálogo es una elaboración propia desarrollada a partir del análisis comparativo de estándares internacionales expuesto en la Sección 1.4. Su diseño integra referencias de WQX, WMO, UCUM, UN/CEFACT e IEC 60050, adaptadas a las restricciones de 50 bits del mensaje WSPR.

El catálogo no pretende reemplazar los estándares existentes, sino ofrecer una capa de abstracción optimizada para entornos de transmisión de ultra baja capacidad.

ID	MAGNITUD	UNIDAD	WQX Code	WMO Code	ISO/IEEE Code	UNCEFACT Code	UCUM Code	DECIMALES	NEGATIVOS	MÍNIMO	MÁXIMO
1	Corriente AC (RMS)	A				AMP	A	2	No	0	1,000
2	Voltaje AC	V				VLT	V	1	No	0	1,000
3	Voltaje AC (RMS)	V				VLT	V	1	No	0	1,000
4	Aceleración	m/s ²				MSK	m/s2	3	Sí	−100	100
5	Temperatura del aire	°C	20	12101	101	CEL	Cel	1	Sí	−90	60
6	Temperatura del aire	°F	21	12101	101	FAH	[degF]	1	Sí	−130	140
7	Alcalinidad (como CaCO ₃)	mg/L	39086			KGM	mg/L	0	No	0	500
8	Altitud	m		7002		MTR	m	1	Sí	−500	9,000
9	Amoníaco (NH ₃)	mg/L	619			KGM	mg/L	2	No	0	10
10	Amonio (NH ₄ ⁺)	mg/L	608			KGM	mg/L	2	No	0	10
11	Presión atmosférica	hPa		10004	301	HPA	hPa	1	No	800	1,100
12	Presión atmosférica	kPa		10004	301	KPA	kPa	2	No	80	110
13	Presión atmosférica	mmHg	25	10004	301	C62	[mmHg]	1	No	600	825
14	Azimut	°				DDG	deg	0	No	0	360
15	Ancho de banda	Hz				HTZ	Hz	0	No	0	10,000,000
16	Ancho de banda	kHz				KHZ	kHz	1	No	0	10,000

ID	MAGNITUD	UNIDAD	WQX Code	WMO Code	ISO/IEEE Code	UNCEFACT Code	UCUM Code	DECIMALES	NEGATIVOS	MÍNIMO	MÁXIMO
17	Ancho de banda	MHz				MHZ	MHz	3	No	0	10,000
18	Capacitancia	µF				FAR	uF	3	No	0	100,000
19	Cloruro (Cl ⁻)	mg/L	940			KGM	mg/L	0	No	0	1,000
20	Corriente DC	A				AMP	A	2	Sí	-1,000	1,000
21	Voltaje DC	V				VLT	V	1	Sí	-1,000	1,000
22	Punto de rocío	°C				CEL	Cel	1	Sí	-90	60
23	Caudal	L/s		13214		LTR	L/s	1	No	0	500,000
24	Caudal	m³/s		13214		MQS	m3/s	3	No	0	5,000
25	Oxígeno disuelto	% sat.	301			P1	%	0	No	0	200
26	Oxígeno disuelto	mg/L	300			KGM	mg/L	2	No	0	20
27	Distancia	km				KMT	km	3	No	0	20,000
28	Conductividad eléctrica	mS/cm			903	C62	mS/cm	3	No	0	200
29	Conductividad eléctrica	µS/cm	95		903	C92	uS/cm	0	No	0	200,000
30	Potencia eléctrica	W				WTT	W	1	No	0	100,000
31	Elevación	°				DDG	deg	0	Sí	-10	90
32	Energía	kWh				KWH	kW.h	3	No	0	1,000,000
33	Fluoruro (F ⁻)	mg/L	950			KGM	mg/L	2	No	0	10
34	foF2	MHz				MHZ	MHz	2	No	0	20
35	Frecuencia	GHz				GHZ	GHz	3	No	0	100
36	Frecuencia	Hz				HTZ	Hz	0	No	0	10,000,000,000
37	Frecuencia	kHz				KHZ	kHz	0	No	0	10,000,000
38	Frecuencia	MHz				MHZ	MHz	2	No	0	10,000

ID	MAGNITUD	UNIDAD	WQX Code	WMO Code	ISO/IEEE Code	UNCEFACT Code	UCUM Code	DECIMALES	NEGATIVOS	MÍNIMO	MÁXIMO
39	Drift	Hz/min				C62	Hz/min	2	Sí	-100	100
40	Radiación solar global	W/m²		14041		WTT	W/m2	0	No	0	1,500
41	GRID Locator 4 caracteres	locator						0	No		
42	GRID Locator 6 caracteres	locator						0	No		
43	GRID Locator 8 caracteres	locator						0	No		
44	Visibilidad horizontal	km				KMT	km	1	No	0	100
45	Impedancia	Ω				OHM	Ohm	1	No	0	10,000
46	Índice UV	adimensional				C62		0	No	0	15
47	Inductancia	mH				HEN	mH	3	No	0	100,000
48	Latitud	° decimales		5001		DDG	deg	5	Sí	-90	90
49	Distancia de enlace	km				KMT	km	1	No	0	20,000
50	Longitud	° decimales		6001		DDG	deg	5	Sí	-180	180
51	LUF (Lowest Usable Frequency)	MHz				MHZ	MHz	2	No	0	30
52	Frecuencia de red	Hz				HTZ	Hz	2	No	0	200
53	Manganeso (Mn)	mg/L	1056			KGM	mg/L	2	No	0	10
54	MUF	MHz				MHZ	MHz	2	No	0	30
55	Nitrato (como N)	mg/L	618			KGM	mg/L	2	No	0	11
56	Nitrato (como NO ₃ ⁻)	mg/L	618			KGM	mg/L	2	No	0	50
57	Nitrito (como NO ₂ ⁻)	mg/L	613			KGM	mg/L	2	No	0	5
58	Potencial Redox (ORP)	mV	90			VLT	mV	1	Sí	-1,000	1,000

ID	MAGNITUD	UNIDAD	WQX Code	WMO Code	ISO/IEEE Code	UNCEFACT Code	UCUM Code	DECIMALES	NEGATIVOS	MÍNIMO	MÁXIMO
59	Pérdida de trayecto	dB				DEC	dB	1	Sí	0	300
60	pH	adimensional	400		801	C62	pH	2	No	0	14
61	Fosfato (PO ₄ ³⁻)	mg/L	665			KGM	mg/L	2	No	0	10
62	Factor de potencia	adimensional				C62		2	No	0	1
63	Precipitación acumulada	in		13011		INH	[in_i]	2	No	0	40
64	Precipitación acumulada	mm		13011		MMT	mm	1	No	0	1,000
65	Humedad relativa	%	52	13105	601	P1	%	0	No	0	100
66	Resistencia	Ω				OHM	Ohm	2	No	0	1,000,000
67	Return loss	dB				DEC	dB	1	Sí	-60	0
68	RSSI (señal recibida)	dBm				C62	dBm	1	Sí	-150	10
69	Salinidad	‰ (ppt)	480			C62	‰	2	No	0	42
70	Salinidad	PSU	90860			C62	PSU	2	No	0	42
71	SNR	dB				DEC	dB	1	Sí	-20	60
72	Sílice (SiO ₂)	mg/L	955			KGM	mg/L	2	No	0	100
73	SFI – Solar Flux Index	s.f.u.				C62	sfu	1	No	0	500
74	Gravedad específica (SG)	adimensional				C62		3	No	1	1
75	Gravedad específica (SG)	g/cm ³				KGM	g/cm ³	3	No	1	1
76	Sulfato (SO ₄ ²⁻)	mg/L	945			KGM	mg/L	0	No	0	1,000
77	Número de manchas solares	adimensional				C62		0	No	0	300

ID	MAGNITUD	UNIDAD	WQX Code	WMO Code	ISO/IEEE Code	UNCEFACT Code	UCUM Code	DECIMALES	NEGATIVOS	MÍNIMO	MÁXIMO
78	Nubosidad total	%	32			RH	{RH}	0	No	0	100
79	Sólidos disueltos (TDS)	mg/L	70300			KGM	mg/L	0	No	0	50,000
80	TEC	TECU				C62	TECU	1	No	0	300
81	Dureza total (CaCO ₃)	mg/L	900			KGM	mg/L	0	No	0	1,000
82	THD (distorsión armónica)	%				P1	%	1	No	0	100
83	Hierro total (Fe)	mg/L	1046			KGM	mg/L	2	No	0	10
84	Fósforo total (P)	mg/L	665			KGM	mg/L	2	No	0	5
85	Potencia TX	dBm				C62	dBm	1	Sí	-50	57
86	Potencia TX	W				WTT	W	1	No	0	5,000
87	Turbidez	NTU	63675			NTU	NTU	1	No	0	1,000
88	ROE/VSWR	adimensional				C62		2	No	1	10
89	Nivel del agua	m	72			MTR	m	3	No	0	100
90	Temperatura del agua	°C	10	12122	101	CEL	Cel	1	Sí	-5	50
91	Temperatura del agua	°F	11	12122	101	FAH	[degF]	1	Sí	23	122
92	Longitud de onda	m				MTR	m	3	No	0	1,000
93	Dirección del viento	°		11001	202	DDG	deg	0	No	0	360
94	Velocidad del viento	km/h		11002	201	KMH	km/h	0	No	0	360
95	Velocidad del viento	kt		11002	201	KNT	kt	0	No	0	200
96	Velocidad del viento	m/s		11002	201	MTS	m/s	1	No	0	100