

## Estudio, diseño e implementación de la capa física para comunicaciones remotas utilizando tecnología NVIS

Joaquim Porté Jimenez

<http://hdl.handle.net/10803/672180>

**ADVERTIMENT.** L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

**ADVERTENCIA.** El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

**WARNING.** The access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.

## TESIS DOCTORAL

Título	Estudio, diseño e implementación de la capa física para comunicaciones remotas utilizando tecnología NVIS
Realizada por	Joaquim Porté Jimenez
en el Centro	Facultad Internacional de Comercio y Economía Digital La Salle
y en el Departamento	Ingeniería
Dirigida por	Joan Lluís Pijoan Vidal



ESTUDIO, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA CAPA  
FÍSICA PARA COMUNICACIONES REMOTAS UTILIZANDO  
TECNOLOGÍA NVIS

por

JOAQUIM PORTÉ JIMENEZ  
GRUP DE RECERCA EN INTERNET TECHNOLOGIES & STORAGE  
ENGINYERIA I ARQUITECTURA LA SALLE  
UNIVERSITAT RAMON LLULL

Supervisado por:

DR. JOAN LLUIS PIJOAN VIDAL



*"Dedico a...*

*"...a la meua mare,  
pel teu esforç imparable i el teu sacrifici constant.  
Per donar-me totes les oportunitats que he necessitat per arribar a escriure aquesta tesi.  
Per la teua confiança cega i els teus consells,  
gràcies mama."*

*"...a la meua germana,  
per acompanyar-me i animar-me en tot moment.  
Per estar al meu costat en els bons i mals moments.  
Per superar junts amb la mama tots els obstacles que ens hem trobat,  
gràcies Maria."*

*"...al meu tiet Josep,  
pels teus consells com amic i família, com a tot.  
Per estar al meu costat en tot moment, recolzar-nos i donar-nos tot el que hem necessitat per  
sortir endavant.  
Gràcies per lluitar al nostre costat.  
Gràcies tiet, gràcies Inma."*

*Junts som imparables.  
Gràcies família.  
Joaquim Porté Jiménez.  
03 de setembre del 2020*



*"Agraeixo a . . ."*

*"...al meu amic i company Josep Maria Maso, per tots aquests anys treballant colze amb colze. Ha estat un plaer compartir amb tu aquesta experiència; bons i mals moments. Que res funcioni i que tot torni a funcionar sense saber com. Per tot el que hem aconseguit."*

*"...als meus amics, el Joan Lluís Pijoan i el David Badia, per donar-me l'oportunitat de dur a terme aquest magnífic projecte. Pels vostres consells, tan professionals com personals. Per la vostra confiança des del primer minut. Ha estat un honor aprendre de vosaltres i amb vosaltres."*

*"...al meu gran amic Marc Hermosilla, per ser un pilar en la meua vida. Gràcies per ajudar-me en tot moment: simplement, gràcies. Als meus amics companys de pis; l'Enric, el Manel, el Marc i la Mònica, per acompanyar-me en aquest camí i netejar-me els plats quan jo estava escrivint articles. Per ajudar-me en tot el que he necessitat."*

*"...a la Dana, per haver entrat a la meua vida, per complementar-me. Per ajudar-me a ser millor, cuidar-me, estar al meu costat i entendre'm. Gràcies per ser com ets i fer-me feliç."*

*"...als nous integrants del projecte: el Tomàs i el Jordi. Gràcies per la vostra passió i seguir investigant en aquest camp fent créixer el projecte Antàrtic. Moltes gràcies a totes les persones que han col·laborat en aquesta investigació. Els alumnes i amics que han fet avançar aquesta recerca amb els seus treballs de final de grau, la Marta, el Guillem, el Joan, el Jordi i el Gerard."*

*Gràcies família,  
Joaquim Porté Jiménez.*





## CONTENIDO

---

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Contexto e hipótesis	1
1.2	Objetivos de la tesis	2
1.2.1	Objetivo análisis y diseño capa física	2
1.2.2	Objetivo para el diseño e implementación de la plataforma de comunicación	3
1.3	Contextualización del proyecto y contribuciones del autor	4
1.4	Formato de tesis	4
1.5	Estructura del documento	6
2	INTERNET OF THINGS	7
2.1	IoT: origen, presente y futuro	7
2.1.1	Origen	7
2.1.2	Presente	7
2.1.3	Futuro	8
2.2	RIoT	8
2.2.1	Satélite	8
2.2.2	Comunicaciones HF	9
3	ESTADO DEL ARTE DE LAS COMUNICACIONES IONOSFÉRICAS	11
3.1	Principios de la Ionosfera	11
3.2	Transmisiones oblicuas	12
3.3	Transmisiones NVIS	13
3.4	Objetivos y bases del estudio	14
4	CONTRIBUCIONES	15
4.1	Tecnología y definición del hardware diseñado	15
4.1.1	Red Pitaya	16
4.1.2	Diseño de la plataforma	17
4.2	Sondeo	20
4.3	Sondeo antártico	27
4.4	Metodología de trabajo	30
4.4.1	Análisis y diseño capa física	30
4.4.2	Diseño e implementación de la plataforma de comunicación	32
4.5	Conclusiones del estudio	32
5	CASOS DE ESTUDIO Y APLICACIONES	35
5.1	Antártica	35
5.1.1	Sondeo	35
5.1.2	Aplicación	37
5.1.3	Objetivos, observaciones y conclusiones de la campaña antártica	38
5.2	Urubamba	38
5.2.1	Aplicación	39
5.2.2	Objetivos y conclusiones	39
5.3	Emergencias	39
5.3.1	Descripción de la aplicación	39
5.3.2	Objetivos y conclusiones	42

6	PROPUESTA DE MERCADO, UNA ALTERNATIVA DE COMUNICACIÓN AL SATÉLITE	43
6.1	Marco de la propuesta de negocio . . . . .	43
6.2	Crear, medir, aprender y pivotar . . . . .	44
6.2.1	Metodología: análisis de los clientes y de la competencia . . . . .	44
6.2.2	Resultados de la validación de mercado . . . . .	45
6.2.3	Resultados análisis de la competencia . . . . .	47
6.3	Conclusiones . . . . .	48
7	CONCLUSIONES Y LINEAS DE FUTURO	49
7.1	Conclusiones análisis y diseño capa física . . . . .	49
7.2	Conclusiones diseño e implementación de la plataforma de comunicación	50
7.3	Lineas de futuro . . . . .	51
	BIBLIOGRAFÍA	53
I	DESIGN, IMPLEMENTATION, AND TEST OF AN SDR FOR NVIS COMMUNICATIONS.	65
II	SENSING SYSTEM FOR REMOTE AREAS IN ANTARCTICA	81
III	EDUCATION AND E-HEALTH FOR DEVELOPING COUNTRIES USING NVIS COMMUNICATIONS.	97

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Estimación del crecimiento del número de dispositivos IoT en el mundo[10]. Esta gráfica muestra el crecimiento exponencial del uso de dispositivos IoT proporcionando una visión de la importancia en la investigación para este sector. . . . .	8
Figura 2	Uso de la ionosfera y del satélite como enlace de comunicación. En esta figura se muestran las principales diferencias entre las comunicaciones NVIS, las comunicaciones 2G, 3G, 4G y el satélite. Se destaca la necesidad de tener visión directa para las comunicaciones 2G, 3G y 4G y el rango de cobertura de un nodo NVIS (250 km). . . . .	9
Figura 3	Diagrama de bloques de la estructura del transceptor diseñado[1]. Este describe el diseño a nivel de bloques de la plataforma diseñada. Se observan los dos bloques de la Zynq, el PL y el PS con los diferentes módulos y periféricos usados para realizar la transmisión y recepción de datos. . . . .	18
Figura 4	Estructura y etapas del DDC diseñado[1]. Esta figura muestra las diferentes etapas que se han diseñado para la implementación del DUC y DDC. En esta se observan las diferentes etapas y los filtros implementados en estas. . . . .	19
Figura 5	Estructura <i>frame</i> versión 1 [83]. Esta figura muestra la primera definición de la estructura de datos. Se observan los diferentes bloques (secuencias de detección, tono, secuencias PN y datos y la duración de estos. . . . .	23
Figura 6	Variación de la potencia de recepción y del $E_b/N_0$ según las diferentes potencias de transmisión[1] . . . . .	24
Figura 7	BER vs $E_b N_0$ [1]. En esta gráfica se muestra una comparación de los resultados obtenidos en el enlace ionosférico con los resultados teóricos. Se destaca que para obtener una BER superior a $10^{-2}$ , el mínimo $E_b N_0$ necesario es de 16.7 dB. . . . .	25
Figura 8	Resultados de la CDF según modulación y potencia de transmisión. Estas gráficas muestran las probabilidades de obtener un cierto BER según las modulaciones y las potencias de trasmisión [1] . . . . .	26
Figura 9	En esta figura se representa el diseño de la trama que permitirá realizar los diferentes tests. En esta se muestra los diferentes bloques que contiene la trama en la transmisión de los diferentes bloques. [2] . . . . .	28
Figura 10	Rendimiento de las modulaciones de orden 4. Se analiza la CDF para una potencia de transmisión de 2W y la BER vs $E_b/N_0$ de las diferentes modulaciones.[2]. . . . .	29
Figura 11	Análisis de distintas CDFs para anchos dos anchos de banda, 5 y 10kHz a 24 W . . . . .	31

Figura 12	Proyecto antártico: Comunicaciones para <i>Remote IoT</i> . En esta figura se muestra la distribución de los diferentes nodos NVIS y la red de sensores durante la campaña 2018-2019 . . . . .	36
Figura 13	Distribución de nodos NVIS en la isla de Livingston. Se muestra las distintas ubicaciones donde se instalaron los nodos NVIS [2, 104, 105] . . . . .	36
Figura 14	Instalación antena en Nodo Caleta Argentina. Nodo situado a 1km de la base [2] . . . . .	37
Figura 15	Equipo transceptor Peru [3]. Se muestra el esquema diseñado para la implementación de la aplicación y la instalación del sistema . . . . .	40
Figura 16	Aplicación móvil mensajería Urubambau [111]. En estas imágenes se muestran las diferentes pantallas diseñadas para la aplicación de mensajería NVIS. . . . .	41
Figura 17	Representación de la solución IoT que permite el producto desarrollado. Se destacan las aplicaciones IoT en zonas marítimas, zonas montañosas y zonas agrícolas, principales sectores explorados . . . . .	45
Figura 18	<i>Landing page</i> diseñada para el análisis <i>on-line</i> de los clientes potenciales. [123] . . . . .	46
Figura 19	<i>Business model canvas</i> de la propuesta de <i>Spin-Off</i> . En esta se analizan los diferentes segmentos de clientes y todo lo necesario para realizar un modelo de negocio plenamente adaptado a sus necesidades. . . . .	46

## LISTA DE TABLAS

---

Tabla 1	Frecuencias críticas media capa $f_oF_2$ Julio del 2013 al 2016. En esta tabla se muestra la variación de los últimos años previos al estudio realizado en esta tesis de la frecuencia crítica de la capa $f_oF_2$ . Esta permite tener una visión sobre la evolución de la ionosfera y ha permitido seleccionar el rango de frecuencias para el estudio realizado. . . . .	20
Tabla 2	Los resultados de sondeo de NVIS a partir de datos de la ionosonda del Observatorio del Ebro. Datos obtenidos del estudio [56]. Estos datos han permitido tener una primera aproximación para realizar una primera versión de la capa física.	21
Tabla 3	En esta tabla se representa el banco de pruebas realizadas para la obtención de los diferentes resultados de esta tesis[1]. En esta se observa el barrido de potencias y las modulaciones usadas. . .	22
Tabla 4	Esta tabla representé el banco de pruebas realizado durante la campaña antártica según las potencias de transmisión y los diferentes ordenes de modulación [2] . . . . .	27
Tabla 5	Esta tabla representé el segundo banco de pruebas realizado durante la campaña antártica según los anchos de banda de las diferentes modulaciones[2] . . . . .	28
Tabla 6	Comparativa de las tecnologías de comunicación que representan una competencia para el mercado NVIS. . . . .	48



## INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 CONTEXTO E HIPÓTESIS

Desde 2003, La Salle Campus Barcelona ha llevado a cabo una línea de investigación en comunicaciones de muy largo alcance para zonas remotas. En una primera fase, estas comunicaciones se realizaban creando un enlace de 12 000 kilómetros entre la Base Juan Carlos I y el Observatorio del Ebro, en Cataluña. La investigación se basó en el sondeo y modelado del canal, así como en el uso de modulaciones de banda ancha. Estos trabajos concluyeron en 2014 con la publicación de la serie histórica de sondeos del enlace de muy larga distancia a lo largo de todo un ciclo solar.

Con todos los conocimientos y la experiencia adquiridos durante los 11 años de investigación en estos entornos tan hostiles, se inició un nuevo ámbito de aplicación de las comunicaciones con reflexión ionosférica para las comunicaciones entre sensores remotos, dentro del contexto del *Internet of Things*(IoT).

Al cuestionar el satélite como única solución de comunicación remota para dispositivos IoT, se redefinió el enfoque de las comunicaciones ionosféricas variando el ángulo de incidencia sobre la ionosfera. El uso de la tecnología de Near vertical incidence skywave (NVIS) a la ionosfera proporcionaría un radio de comunicación de hasta 250 km, sin necesidad de tener visión directa. Estas dos características son primordiales para entornos de comunicación tan hostiles como la Antártica. Una vez definida la tecnología, se formuló una primera hipótesis:

**Hipótesis 1:** *Un enlace de comunicación NVIS permitirá comunicar una red de sensores de bajo coste en la Antártica.*

Desde 2013, la ONG Proide, en especial desde la delegación de Proide Campus Barcelona, ha realizado anualmente actuaciones en las poblaciones alto andinas de Urubamba (Perú) con fines de formación al profesorado y al alumnado. Con la experiencia en estos entornos hostiles y el inicio de la investigación para comunicaciones remotas en la Antártica, se detectó una necesidad de comunicación entre personas para este tipo de escenarios. Llegados a este punto, se definió un segundo caso de estudio para la tecnología NVIS en entornos donde las redes de comunicación actuales no han llegado, ya sea porque se trata de entornos hostiles o bien por el alto coste económico, lo cual plantea una segunda hipótesis:

**Hipótesis 2:** *Un enlace NVIS resulta una comunicación estable y muy económica para comunicaciones de emergencia en Urubamba, Perú, una zona con pocos recursos económicos.*

El tercer caso de estudio es el diseño de redes de comunicaciones para primeros intervinientes o *first responders* en situaciones de emergencias por desastres naturales, terrorismo y, en definitiva, situaciones en las que una rápida actuación es primordial para salvar vidas. Para estas situaciones se presenta la siguiente hipótesis para validar:



**Hipótesis 3:** *La tecnología NVIS es una solución adecuada para cubrir las necesidades de comunicaciones en una emergencia donde todas las redes han dejado de funcionar proporcionando un despliegue rápido y estabilidad de la red en el área de Cataluña.*

Finalmente, una vez definidos los diferentes escenarios de comunicación para estudiar, se observó la posibilidad de integrar esta tecnología en un entorno comercial como alternativa de comunicación al satélite. Para demostrar la posible necesidad de mercado de esta tecnología, se creó una *spin-off*, cuyo objetivo era ofrecer una alternativa de comunicación al satélite, de bajo coste y bajo consumo en potencia, para el mercado de los dispositivos IoT, implementando los dos casos estudiados como solución de mercado.

## 1.2 OBJETIVOS DE LA TESIS

Esta tesis tiene como objetivos realizar el estudio, el diseño y la implementación de la capa física para comunicaciones remotas utilizando tecnologías NVIS. Para ello, se centra principalmente en la transmisión de datos IoT en entornos remotos donde prima el bajo consumo de los sistemas de transmisión. A fin de conseguir este objetivo general, se diferencian los objetivos con el fin de analizar y definir la capa física y objetivo de diseño de la plataforma de comunicación.

### 1.2.1 *Objetivo análisis y diseño capa física*

En esta sub sección se definen los principales objetivos para realizar el análisis y definición de la capa física. Se tienen en cuenta el análisis del canal, el diseño de los diferentes bancos de prueba a realizar para alcanzar el principal objetivo, y definir una primera versión de la capa física para un enlace ionosférico, especialmente, el enlace Barcelona-Cambrils.

- **Sondeo del canal:** Para optimizar la transmisión de datos y conseguir su máximo rendimiento, se ha realizado un estudio del canal de comunicación en el que se han definido las características de la señal (ancho de banda, tiempo de cada *frame*...). Este análisis se realizará con la finalidad de optimizar el diseño de la capa física para el enlace ionosférico Barcelona-Cambrils. Este análisis tendrá como objetivo minimizar el tiempo de preámbulo de la señal, y maximizar el tiempo de datos según especificaciones de canal obtenidas.
- **Minimización en la potencia de transmisión:** Se ha realizado un estudio para definir la potencia de transmisión mínima más adecuada para estos entornos. Con el objetivo de minimizar la potencia de transmisión que permita mantener nodos remotos con energías renovables con un mínimo de 2 semanas de autonomía de transmisión. Se busca optimizar el enlace de comunicación con potencias alrededor de 6W.
- **Selección de la modulación mejor adaptada al enlace:** Se ha realizado un estudio para definir la mejor modulación de banda estrecha adecuada para estos entornos. Con la premisa de minimizar la potencia de transmisión, se analizará qué estructura de modulaciones de banda estrecha (M-PSK, M-QAM y M-FSK) tiene

un mejor rendimiento teniendo en cuenta las premisas de potencia de transmisión y las limitaciones de canal. Se fija como objetivo obtener como mínimo un BER (*Bit error rate*) de  $10^{-2}$  para una potencia de transmisión de 6W y una SNR (*Signal-to-noise rate*) 12 dB.

- Pruebas de campo en Cambrils y en la Antártica: Se define como objetivo principal de definición de una capa física estable antes de la campaña antártica 2018-2019. Para ello, se realizará todo el estudio en el enlace entre Cambrils-Barcelona. Finalmente se analizará el rendimiento de esta capa física durante la Campaña española antártica 2018-2019 en la Base Juan Carlos I.

### 1.2.2 Objetivo para el diseño e implementación de la plataforma de comunicación

En esta sub sección se definirán los objetivos principales para el diseño de la plataforma de comunicación. En esta se definen las principales especificaciones para la implementación de la plataforma que permita realizar y alcanzar los objetivos definidos en el sub apartado anterior 1.2.1.

- Implementación plataforma de sondeo de bajo coste: Uno de los principales objetivos era el diseño de una plataforma que permitiera implementar todos los objetivos definidos en el sub apartado 1.2.1. Esta plataforma tendrá que ser de bajo coste económico respecto a las plataformas de mercado y que permita realizar un prototipado ágil. Tendrá que trabajar tanto como transmisor como receptor en el mismo hardware sin tener que realizar una reprogramación de este. Tendrá que permitir el almacenamiento de los datos en formato IQ recibidos y poder transmitir cualquier tipo de datos en formato IQ. Finalmente tendrá que poder trabajar como mínimo en el rango de frecuencias de 2 a 10 Mhz. Se minimizarán las dimensiones de la plataforma para facilitar la insatisfacción del dispositivo. El diseño de este tendrá que estar optimizado en el consumo de potencia.
- Sistema en tiempo real: Con la finalidad de demostrar el correcto funcionamiento de la capa física diseñada y proporcionando una visión de producto, un objetivo de esta tesis es la implementación de un transceptor digital. Siguiendo la principal misión de esta tesis, este dispositivo tendrá que ser de bajo coste económico y de bajo consumo en potencia. Este tendrá que permitir realizar transmisiones *Half-Duplex* en un único hardware. Tendrá que proporcionar como mínimo una velocidad de 2 kbps para un BER mínimo de  $10^{-3}$  y una potencia de transmisión máxima de 25W. La plataforma tendrá que permitir interactuar con un usuario o un dispositivo IoT mediante diferentes interfaces (pantalla, teclados, protocolos de comunicación *wireless*). Tanto el transmisor como el receptor tendrán que ser autónomos y se autosincronizaran. El receptor tendrá que detectar las tramas entrantes en tiempo real, corregir el *doppler shift* del enlace y ecualizar la señal entrante sin la necesidad de post procesado.
- El hardware deberá implementar tanto la plataforma de sondeo, como el transceptor en un único hardware.
- Validación del funcionamiento de la plataforma: Se define como objetivo principal el correcto funcionamiento del transceptor en tiempo real antes de la

campana antártica 2018-2019 en el enlace de comunicación Cambrils Barcelona (enlace *simplex*). Un segundo objetivo será la implementación de una red de sensores durante la campana validando el correcto funcionamiento de la plataforma en un entorno real. Finalmente se fija como objetivo el correcto funcionamiento de la plataforma en tiempo mediante la integración con una interfaz de usuario y una aplicación de mensajería en tiempo real.

### 1.3 CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROYECTO Y CONTRIBUCIONES DEL AUTOR

En esta sección se aportará una visión del papel que he desempeñado durante la realización de toda la tesis. En este punto también se exponen las necesidades y el estado del proyecto para esta nueva línea de investigación, destacando los nuevos retos que representa el proyecto. Tras la dilatada experiencia del grupo de investigación en comunicaciones ionosféricas con transmisiones oblicuas y la finalización de los proyectos sobre este campo, se buscó una nueva línea de investigación. El otorgamiento de un nuevo proyecto para la investigación de transmisiones NVIS proporciona al equipo una oportunidad, para enfrentarse a una nueva línea de investigación presentando grandes retos. En este punto, el grupo ya había realizado unos primeros estudios sobre la aplicación de NVIS mediante los datos capturados por el observatorio del Ebre. Todo el diseño de la capa física para sensores remotos, con una mínima potencia de transmisión, fue conceptualizada por el autor. Por otra parte, se había diseñado. Por otra parte, se había diseñado una plataforma de comunicación NVIS aunque esta no cumplía con las especificaciones necesarias para llevar a cabo el nuevo proyecto. Al tratarse de un nuevo proyecto y una nueva tecnología no se podía aprovechar ningún tipo de tecnología desarrollada por los integrantes del equipo de los proyectos anteriores, a excepción de los conocimientos de la ionosfera en concepto de la característica del canal de comunicación, y de la implementación de un DUC y un DDC. Aparte del análisis del canal, este proyecto plantea la implementación de un sistema de transmisión de datos en tiempo real jamás realizado en la universidad. Finalmente, y a diferencia de los proyectos anteriores, se estudiará el rendimiento en este entorno de modulación de banda estrecha. El autor de esta tesis desempeña el papel de técnico e investigador junior principal con la dedicación más alta de todos los integrantes. Toda la tecnología descrita en este documento son aportaciones realizadas por el autor. Las decisiones de diseño y conclusiones de la investigación son fruto de esta tecnología y valoradas por todos los miembros del equipo.

### 1.4 FORMATO DE TESIS

Esta tesis se ha depositado mediante la modalidad de tesis por compendio. En esta sección se listan los artículos presentados en el compendio. Se han publicado dos artículos en revistas indexadas y se ha dado una conferencia internacional:

- Primer artículo [1] (ver en Anexo i): J. Porté, J. M. Maso, J. L. Pijoan, and D. Badia. "Design, implementation, and test of an SDR for NVIS communications." In: *International Journal of Circuit Theory and Applications* 47.9 (Sept. 2019), pp. 1502–1512. issn:0098-9886. doi:10.1002/cta.2670.

Descripción: Esta publicación muestra las primeras conclusiones del estudio realizado en esta tesis. Se definen los primeros parámetros del canal ionosférico y las primeras conclusiones en el diseño de la capa física del enlace NVIS. Se realizan los primeros análisis del estudio, que nos permiten obtener las conclusiones iniciales sobre las características de la señal más adecuadas para el entorno de comunicación. Por otra parte, se describe brevemente el hardware diseñado.

Aportación: La aportación del coautor Joaquim Porté y autor de esta tesis en la publicación de este artículo, es el diseño, la implementación y el estudio del enlace, el desarrollo del hardware y la investigación llevada a cabo entre el enlace Barcelona-Cambrils. Escritura y revisión de las diferentes etapas en la publicación del artículo.

- Segundo artículo [2] (ver en Anexo ii): Joaquim Porté, Josep M. Maso, Joan Lluís Pijoan, and David Badia. "Sensing system for remote areas in Antarctica." In: *Radio Science* (2020), 2019RS006920. issn: 0048-6604. doi: 10.1029/2019RS006920. url: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019RS006920>..

Descripción: Con los primeros resultados del enlace entre Barcelona-Cambrils y de la primera publicación, se concluye con esta publicación el diseño del enlace NVIS óptimo para entornos de comunicaciones remotas. En esta se presenta el análisis del estudio realizado durante la Campaña española antártica 2018-2019 en la Base Juan Carlos I. En dicho análisis se muestran las mejoras tanto del protocolo como del diseño de la trama y sus características.

Aportación: La aportación del coautor Joaquim Porté y autor de esta tesis en la publicación de este artículo es el rediseño del formato de la trama, el diseño y la implementación de las mejoras del software, y la definición del banco de pruebas. Adquisición de los datos e instalación del sistema durante la campaña antártica. Análisis de los datos, escritura y revisión de las diferentes etapas en la publicación del artículo.

- Conferencia [3] (ver en Anexo iii): J. Porté, J. Maso, J. L. Pijoan, M. Miret, D. Badia, and J. Jayasinghe. "Education and e-health for developing countries using NVIS communications." In: *2018 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/R10-HTC.2018.8629842.

Descripción: En esta publicación se describe y valida una de las posibles aplicaciones del estudio y la implementación realizada en esta tesis. Se presenta una herramienta de comunicación sin necesidad de operador telefónico ni repetidores. Esta solución, con un radio de cobertura de hasta 250 km, se presenta como una gran alternativa de comunicación para la transmisión de datos en países en vías de desarrollo para aplicaciones de educación y sanidad. Este documento describe la validación de la tecnología en Pampallacta (Perú), una aldea alto andina sin cobertura móvil, del 15 de julio al 30 de julio de 2018.

Aportación: Diseño y adaptación del estudio realizado para las comunicaciones en zonas remotas a este nuevo entorno de comunicación. Adquisición de los datos e instalación en Pampallacta. Análisis de los datos, escritura y revisión de las diferentes etapas en la publicación del artículo.

## 1.5 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Esta tesis se organiza en 7 capítulos. El primer capítulo introduce el contexto en el que se desarrollan la tesis y el proyecto de investigación que le ha servido de marco de trabajo. También se definen los diferentes entornos e hipótesis que pretende resolver este estudio. Finalmente, se resumen los principales objetivos que se quieren lograr durante este trabajo y la estructura del documento, y se describen las diferentes publicaciones que permiten realizar esta tesis por compendio.

El segundo y tercer capítulo definen las bases tecnológicas y el estado del arte de las mismas. En el capítulo dos se describe la evolución de la filosofía del internet de las cosas, realizando un estado del arte del origen, presente y futuro de esta corriente tecnológica. Por otra parte, se introduce el corazón de esta tesis: las comunicaciones HF y, más específicamente, el NVIS y cómo pueden ser una alternativa de comunicación para los entornos estudiados. En el tercer capítulo se definen las bases de las comunicaciones NVIS y sus principales características que se tienen en cuenta para estudiar este canal.

El cuarto capítulo es un resumen de las contribuciones que se han aportado en esta tesis. Se realiza una descripción completa de la plataforma desarrollada para poder satisfacer los requerimientos de la investigación. Se muestra un estudio de canal que permite definir su comportamiento y las primeras características del entorno de comunicación. En este capítulo se observará la evolución del trabajo llevado a cabo, partiendo de las primeras hipótesis y la meteorología que permiten pivotar y obtener los primeros resultados. Finalmente, junto con las últimas pruebas de campo, se resumen las conclusiones.

El quinto capítulo describe los casos de estudio que han permitido realizar esta tesis, así como las diferentes aplicaciones que el trabajo puede resolver.

El sexto capítulo describe un estudio de mercado y un proceso de transferencia de conocimientos al mercado de la tecnología desarrollada en esta tesis. Se describe el proceso llevado a cabo y se exponen las conclusiones que han permitido validar las diferentes necesidades del desarrollo de esta tecnología en el entorno de utilización real. Finalmente, se describen las conclusiones del estudio realizado.

La revolución del mundo de las comunicaciones ha pasado de comunicar millones y millones de personas a millones y millones de *cosas*. Este nuevo paradigma, el *Internet of Things* (IoT), tiene como objetivo llevar la conectividad más allá de las personas. Las transacciones de datos son cada vez más numerosas y están enfocadas a mejorar la calidad de vida de la población, la gestión de emergencias, la comunicación de sensores, y tienen múltiples aplicaciones. Gracias a estos avances en el sector de las comunicaciones, han aparecido nuevas redes de telecomunicaciones destinadas a la interconexión de cualquier cosa. Estas redes cubren un abanico muy amplio de aplicaciones: desde la comunicación de dispositivos de muy bajo consumo de datos (1 kbps, CAT NB1(*Narrow Band*)) [4], hasta dispositivos en los que la necesidad de transmisión de datos es muy elevada (>100 Gbps CAT 4).

En este capítulo se definirá el estado actual de las redes de comunicación destinadas a los dispositivos IoT. Por otra parte, se estudiarán los entornos donde estas redes no dan cobertura IoT y de qué soluciones se dispone actualmente para comunicar estos entornos.

## 2.1 IOT: ORIGEN, PRESENTE Y FUTURO

### 2.1.1 Origen

El concepto del internet de las cosas está cada vez más interiorizado por la sociedad. La filosofía IoT tiene su origen en el año 1999, cuando Kevin Ashton [5] quiso introducir la tecnología *Radio frequency identification* RFID en la cadena de producción de la empresa Procter & Gamble. Con la ayuda de la Universidad de Massachussets (MIT [6]), empezaron a investigar la tecnología con el objetivo de crear un sistema global estandarizado para la integración de la tecnología RFID *everywhere*.

En estos primeros pasos, la comunidad científica e industrial tomó conciencia de la necesidad de la comunicación entre los diferentes dispositivos con la siguiente definición del concepto IoT por Kevin Ashton [5]:

*"If we had computers that knew everything there was to know about things – using data they gathered without any help from us – we would be able to track and count everything, and greatly reduce waste, loss and cost. We would know when things needed replacing, repairing or recalling, and whether they were fresh or past their best"*

### 2.1.2 Presente

Siguiendo estos primeros pasos definidos por Kevin Ashton, se ha creado un ecosistema alrededor de las comunicaciones IoT donde se han definido una serie de estándares de comunicación y operadores de telecomunicaciones como LoraWan, Sigfox, NB-IoT[7, 8]), dispositivos y empresas para la generación de los datos (Libelium[9]), y la aparición de operadores y redes de comunicación especializadas

y adaptadas a los dispositivos IoT, como las redes de telefonía móvil NB-IoT. La gran variedad de necesidades en el entorno de la IoT ha creado un gran abanico de soluciones, tanto a nivel de producto como de red. Estas proporcionan un gran poder para avanzar en el futuro, aunque no están adaptadas a todos los entornos y necesidades.

### 2.1.3 Futuro

Gracias a las fuertes inversiones en el sector de la IoT y como se muestra en la figura 1, se estima que tendrán un fuerte crecimiento en pocos años.

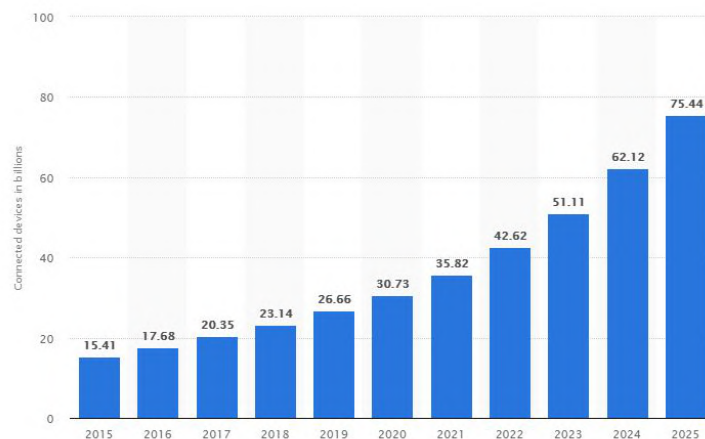


Figura 1: Estimación del crecimiento del número de dispositivos IoT en el mundo[10]. Esta gráfica muestra el crecimiento exponencial del uso de dispositivos IoT proporcionando una visión de la importancia en la investigación para este sector.

Cada vez más dispositivos estarán conectados a las redes en entornos de todo tipo [11, 12]. Pese a la fuerte inversión del mundo de la industria en la investigación, la mayoría de las soluciones se centran en la comunicación de dispositivos y personas en entornos urbanos; por ejemplo, con la creación de redes como el 5G, en las que el alcance no llega a 1 kilómetro. A causa de este enfoque, surgen diferentes problemáticas en zonas donde ningún operador ha considerado rentable desplegar ningún tipo de red. Definiremos estos casos como RIoT, *Remote Internet of Things*.

## 2.2 RIOT

En esta sección, se definirán dos tipos de tecnología que permiten hoy en día la comunicación en zonas remotas sin la necesidad de las redes de comunicación habituales.

### 2.2.1 Satélite

Las comunicaciones *High frequency* (HF) son una solución a las comunicaciones por satélite en estos entornos tan hostiles. En el artículo [13] realizado por *M. De Sanctis et al.* muestra una aplicación para la comunicación de dispositivos IoT a traves del

satélite. Por otra parte, las comunicaciones por satélite también juegan un papel muy importante en la comunicación para sensores remotos como podemos ver en el trabajo [14] del autor *Nathan Borges*. Aunque la mayoría de las aplicaciones de radio necesitan tener visión directa entre transmisor y receptor, la banda de HF ofrece un largo alcance sin necesidad de visión directa, debido a la reflexión en la ionosfera [15]. Cada vez, las grandes empresas están apostando para dar cobertura a todo el planeta tierra mediante las comunicaciones por satélite. Estas comunicaciones destacan la posibilidad de proporcionar internet de bajo coste [16], y dar un servicio para la conectividad IoT [17].

### 2.2.2 Comunicaciones HF

Las comunicaciones HF están definidas por varios estándares de comunicación, principalmente el *MIL-STD* [18] y el *STANAG* [19]. La mayoría de las aplicaciones de Radio Frecuencia (RF) necesitan tener visión directa entre transmisor y receptor. Aunque estas proporcionan un largo alcance, es necesario tener visión directa para poder asegurar dicho enlace. La alternativa de comunicación HF [20] más adaptada a estos entornos son las comunicaciones a través de la ionosfera (Figura 2), cuya virtud principal es que no necesitan tener una visión directa.

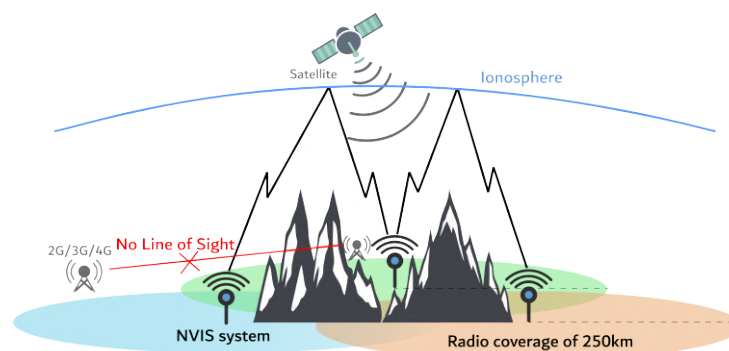


Figura 2: Uso de la ionosfera y del satélite como enlace de comunicación. En esta figura se muestran las principales diferencias entre las comunicaciones NVIS, las comunicaciones 2G, 3G, 4G y el satélite. Se destaca la necesidad de tener visión directa para las comunicaciones 2G, 3G y 4G y el rango de cobertura de un nodo NVIS (250 km).

Este estudio define las bases de un nuevo estándar de comunicación para la transmisión de datos en entornos remotos donde solamente el satélite es una alternativa viable de comunicación. Como se ha definido en el capítulo 1, se proponen tres casos de estudio en los que aplicar esta tecnología.

Uno de estos casos son las zonas más inhóspitas del mundo, las comunicaciones en la Antártica, donde la comunicación por satélite es la única solución para realizar un enlace de comunicación sin visión directa.

El segundo caso de estudio se centra en zonas en vías de desarrollo, especialmente la zona alto andina de Urubamba (Perú). En estas zonas, las redes de comunicación más conocidas (el 3G, 4G, GPRS...) están muy poco implantadas debido al alto coste del despliegue de infraestructuras que requieren. Muchas poblaciones viven aisladas



sin ningún tipo de comunicación, lo que supone una gran reducción de la calidad de vida en términos sanitarios, socioeconómicos y educativos.

Finalmente, la importancia del correcto funcionamiento de las redes de comunicación es clave en situaciones de extrema emergencia. Agentes externos a la vida cotidiana, como podría ser una catástrofe natural, un atentado terrorista o una tormenta solar, pueden causar la caída de los sistemas de comunicación actuales como se muestra en los trabajos [21, 22]. En los trabajos [23, 24] se muestra como el *Software defined radio* ayuda en el restablecimiento de las comunicaciones en situaciones de desastres naturales. Por otro lado, en los trabajos [25–27] se muestra la importancia y el rol que juega una rápida recuperación de las redes de comunicaciones en una situación de emergencia. Finalmente en [28, 29] se observa la necesidad de disponer de redes móviles para la gestión de estas situaciones de emergencia. En estas situaciones es primordial llevar a cabo una actuación rápida y eficaz en la zona afectada para minimizar el coste humano y económico del desastre. Este estudio permitirá definir una tecnología fácil de desplegar y adaptada para los *first responders* en casos de emergencias.

Hoy en día, las telecomunicaciones son uno de los pilares principales para la sociedad. Las grandes redes de telefonía móvil (3G, 4G, GPRS...) permiten hacer llegar internet y la conexión de datos a millones de personas para centenares de aplicaciones diferentes. De hecho, no solo para comunicar a las personas, sino también para comunicar «cosas». Aunque estas redes están presentes en todas las zonas con mucha población, otras zonas del mundo no disponen de ellas y tienen que usar otro tipo de tecnologías de comunicación. En estos entornos, las principales soluciones son las comunicaciones vía satélite o vía radio VHF. Los estándares de radio *Very High Frequency* VHF tienen un alcance de hasta 50 km con visión directa. Para alcanzar más distancia, es necesaria la instalación de repetidores. A diferencia de las comunicaciones de VHF, las comunicaciones por satélite sí que permiten alcanzar un área de cobertura mucho mayor, aunque su alto precio económico impide, en muchos casos, usar esta tecnología. Si bien es cierto que se trata de una de las principales soluciones, no cubren un gran número de aplicaciones y usos en ciertos casos, principalmente en los casos en los que se basa esta tesis.

Gracias a las comunicaciones por propagación ionosférica, se pueden cubrir las necesidades de estos entornos de comunicación, que requieren comunicar grandes extensiones sin visión directa, y esto se consigue sin tener que pagar un alto coste económico. Hoy en día, la gran mayoría de soluciones destinadas a las comunicaciones ionosféricas tienen como objetivo aplicaciones militares [30, 31] y dejan de lado necesidades en entornos civiles. Para estos entornos existen muchos estándares que definen las bases de los entornos de comunicaciones HF [18, 19] incluidos los mínimos que debe cumplir un producto de HF.

### 3.1 PRINCIPIOS DE LA IONOSFERA

La ionosfera es una de las capas de la atmósfera situada entre 250 km y 450 km, que por sus características físicas permite reflejar señales radioeléctricas comprendidas entre 1 y 30 MHz. Estos rebotes se producen gracias a la ionización de esta capa. La ionización de las capas exteriores de la atmósfera depende del grado de actividad solar. Un indicador de la actividad solar son las manchas. La actividad solar sigue ciclos de aproximadamente 11 años. El estado de la ionosfera no solo sufre cambios anualmente, sino que también depende de la estación del año y del momento del día. Estas variaciones hacen de las comunicaciones ionosféricas un entorno de comunicación muy hostil y variable que requiere un sistema que se adapte al estado de la ionosfera en cada momento. Las comunicaciones ionosféricas se pueden dividir entre transmisiones oblicuas y NVIS; el centro de la investigación de esta tesis.

### 3.2 TRANSMISIONES OBLICUAS

Desde La Salle Campus Barcelona se ha realizado un gran esfuerzo en el estudio de las comunicaciones ionosféricas con incidencia oblicua. Este tipo de comunicación se basa en la transmisión de la señal con un ángulo de incidencia de la señal sobre la ionosfera muy bajo (de 0 a 30 grados).

Concretamente, el enlace se efectuaba entre la Base Juan Carlos I, en la Isla de Livingston (Antártica) y el Observatorio del Ebro, con una distancia de más de 12 000 km (5 rebotes con la ionosfera) y un ángulo de salida inferior a 3 grados respecto al horizonte. Las antenas utilizadas eran monopolos verticales. Desde el inicio de esta investigación en el 2003 hasta la última campaña en el 2014, se han realizado decenas de estudios sobre este canal de comunicación sondeando la ionosfera. En el trabajo realizado por *R.M Alsina-Pagès et al.* en [32] se detalla el estudio realizado para la definición de la capa física para comunicaciones de larga distancia (entre la Antártica y España) a través de la ionosfera. En esta se definen dos métodos diferentes según el estado del canal. En el trabajo realizado por *C. Vilella et. al* en [33, 34] se realiza un estudio de las diferentes características del enlace de comunicación ionosférica entre la Antártica y España. En este se analiza la disponibilidad del canal, el *doppler spread*, *delay spread* y la relación señal ruido. Tras la evolución de la investigación por los miembros del equipo de investigación, se realizan mejoras considerables en el sistema que permiten realizar un estudio más exhaustivo sobre el análisis de la ionosfera en este enlace de comunicación. En las publicaciones [35, 36] se observa estas mejoras. Por otra parte, se han realizado numerosos estudios externos a la universidad de La Salle. En la tesis realizada por *J. Martin Wilson* en [37] se realiza un profundo estudio de las comunicaciones de larga distancia mediante el uso de la ionosfera como canal de comunicación. En esta, se desarrolla en enlace de comunicación con la finalidad de diseñar un sistema de bajo consumo en potencia y poca transmisión de datos. Por otra parte, en el trabajo realizado por *H. Wang* en [38] se analiza la disipación de la energía de las ondas en un enlace HF de larga distancia permitiendo proporcionar un tiempo máximo de comunicación en el uso de las transmisiones de HF para largo alcance en un barco. Finalmente en el trabajo realizado por *Q. Guo et .al* en [39] analiza los resultados en términos de multi-camino y *doppler spread* mediante un radar que permite analizar un enlace ionosférico de incidencia oblicua. Aparte de realizar un exhaustivo estudio del canal de comunicación, se realizan varios estudios sobre el rendimiento de diversas modulaciones en un enlace de comunicaciones ionosférico con incidencia oblicua. En el estudio realizado por *M. Deumal et al.* en [40] se estudió el método DS-SS (espectro ensanchado por secuencia directa) para transmisiones de datos en el enlace Antártica-España. Por otro lado, en el trabajo realiza por *M. Hervás et al.* en [41] se realiza una propuesta de esquema para la modulación *Single carrier frequenc y domain equalisation (SC-FDE)* para el mismo enlace. Finalmente en los estudios realizados en [42–44] se estudian diversos esquemas de modulaciones de banda ancha, la *Orthogonal frequency division multiplexing* OFDM y sus variantes OFDMA, SC-FDE y sus variantes SC-FDMA y finalmente la DSSS. Todos estos estudios han permitido obtener un profundo conocimiento sobre el comportamiento de esta capa de la atmósfera. Aunque estos resultados permiten tener una visión del estado de la ionosfera y de sus posibles aplicaciones, estos difieren de las comunicaciones NVIS, base de estudio de esta tesis.

### 3.3 TRANSMISIONES NVIS

Tras realizar durante años un profundo estudio sobre las comunicaciones ionosféricas con incidencia oblicua, la universidad de La Salle apuesta por el estudio de las comunicaciones NVIS. En esta sección se definen el estado del arte de las comunicaciones NVIS, tanto del estudio de las características del canal como el uso del enlace como canal de comunicación. Vistas las grandes posibilidades de esta tecnología de comunicación NVIS, los nuevos proyectos *CTM2015-68902-R* y el recientemente concedido *RTI2018-097066-B-I00* brindaron la posibilidad de investigar una nueva capa física para comunicaciones NVIS para redes de sensores, estudio dentro del cual se enmarca esta tesis. Como bien sabemos, un canal, en el entorno de las comunicaciones, se puede definir con cinco parámetros: ruido, interferencias, dispersión temporal, dispersión frecuencial y disponibilidad [20, 45-47]. El conocimiento y estudio previo de estos parámetros permite diseñar correctamente la capa física para adaptarse al entorno de comunicación. Asimismo, permite definir los límites del canal en el cual trabajará el estándar diseñado.

Una vez terminado el proyecto y con la experiencia adquirida, se empezaron a estudiar las comunicaciones con incidencia vertical. En este punto se analiza el estado de las investigaciones en concepto de comunicaciones NVIS. En una primera instancia se muestran los trabajos llevados a cabo en el análisis del canal NVIS, finalmente se analizarán los estudios realizados en concepto de transmisión de datos.

En el estudio realizado por *R.M Alsina-Pagès et al.* en [48] y en el trabajo realizado por *A.G. Ads et al.* en [49] se realiza una comparativa entre las comunicaciones VIS y las comunicaciones ionosféricas con incidencia oblicua. Estas comparaciones han permitido desarrollar un método de predicción para la mejor frecuencia de comunicación en un enlace de 12760 km sin la necesidad de realizar un sondeo oblicuo. En los trabajos realizados por *B. A. Witoliet et al.* en [50, 51] se muestran dos estudios genéricos de las comunicaciones NVIS. En estos, se muestran los principales factores para tener en cuenta en este tipo de comunicación, se define la ionosfera como canal de comunicaciones, sus principales características y aplicaciones. En el trabajo realizado por *M.C. Walden* en [52] se realiza un análisis de la potencia de la señal recibida, junto la frecuencia de la ionosonda y las predicciones de la señal y HF. Este estudio permite analizar las diferentes técnicas de propagación a través de la ionosfera comparando las comunicaciones amateurs con las comunicaciones profesionales. En el artículo [53] del autor *S.L. Manalu et al.* se muestra el diseño de sistema de medición para canal HF mediante un enlace NVIS con tecnología MIMO. Este trabajo permite obtener la respuesta del canal como base para diseñar el modelado de un canal NVIS. En el trabajo realizado por *B. A. Witoliet et al.* en [54] se muestra el diseño de un monopolo horizontal optimizado en ángulo y elevación para una comunicación NVIS. Por otro lado, en su tesis doctoral [55] se analiza la propagación de la ionosfera analizando sus principales características y estudiando la mejor configuración de la antena para un enlace NVIS. Finalmente, en los trabajos realizados por *M. Hervas et al.* en [56] y por *B. A. Witoliet et al.* en [57] se analizan las dos polarizaciones de la ionosfera mediante técnicas de diversidad de polarización. Una vez analizada la ionosfera desde un punto de vista de canal, se observan los diferentes estudios realizados en concepto de transmisión de datos y diferentes técnicas de modulación. En los estudios [58, 59] se realiza un estudio sobre el rendimiento de la modulación OFDM sobre el canal NVIS.

Finalmente, en el trabajo realizado por *L. Hung Yi et al.* en [60] se realiza un estudio de del rendimiento de las modulaciones BPSK en un entorno donde predomine el ruido.

#### 3.4 OBJETIVOS Y BASES DEL ESTUDIO

Esta tesis busca definir las bases de un sistema de comunicación con tecnología NVIS. Unas de las principales consideraciones que ha marcado desde un inicio el camino para el desarrollo de esta tesis, ha sido obtener un sistema de bajo coste económico y un muy bajo consumo en potencia. Esta tesis busca, desde la capa física hasta una aplicación en tiempo real, demostrar la viabilidad de crear una nueva red de comunicaciones sin la necesidad de un operador telefónico que funcione como alternativa al satélite para entornos remotos. Con el fin de poder definir correctamente la capa física y las bases de este nuevo estándar, se estudian tanto la mejor configuración de las características de la trama y de la señal, como el hardware que permitirá implementar todos los test y validar todas las hipótesis. Basándonos en los estándares de HF y las modulaciones actuales usadas, se estudiará y definirá la mejor configuración en la potencia de transmisión mínima, así como la mejor modulación de banda estrecha para este entorno de comunicaciones. Uno de los principales objetivos es la caracterización del canal ionosférico y la definición de las bases de las comunicaciones ionosféricas para entornos remotos. Para ello, se define un banco de pruebas para validar las principales hipótesis. Con el fin de realizar el estudio y la transmisión de los diferentes test requeridos que se han creado, se ha diseñado e implementado una plataforma de transmisión digital con dos aplicaciones totalmente diferenciadas 4. Una permite realizar transmisiones para el pos procesamiento de los datos con una herramienta de proceso más potente [61] que el hardware usado, y la otra permite la transmisión en tiempo real.

## CONTRIBUCIONES

---

En este capítulo se muestran los planteamientos iniciales al estudio de los diferentes casos. Se muestra el diseño y la implementación de la plataforma que ha permitido realizar todos los sondeos y el transceptor en tiempo real. La plataforma permite demostrar la viabilidad en los diferentes casos de estudio. Se expondrán los diferentes sondeos realizados para definir las bases de la capa física y el diseño final de esta. Finalmente, se expondrán las principales conclusiones extraídas en esta tesis.

### 4.1 TECNOLOGÍA Y DEFINICIÓN DEL HARDWARE DISEÑADO

Uno de los principales objetivos definía la plataforma como un dispositivo de bajo coste económico y multifunción. Dentro de sus principales funcionalidades, se destaca la posibilidad de sondear el canal ionosférico, realizar test de modulaciones y variar el tipo de modulación, ancho de banda y potencia de transmisión de la señal. Finalmente, cabe destacar también el hecho de que permitiera desarrollar un transceptor en tiempo real para entornos remotos y un bajo consumo en potencia. Ninguna plataforma del mercado presentaba estas características, lo cual nos forzó a implementar nuestra propia plataforma.

Uno de los retos en el diseño de una plataforma para transmisión ionosféricas es mitigar los efectos del canal. Las nuevas tecnologías digitales permiten que estos procesos sean cada vez más eficientes y con un menor coste económico [62, 63]. Uno de los principales avances tecnológicos en este sector son las FPGA (*Field-programmable gate array*). Estas permiten realizar operaciones aritméticas a alta velocidad, de forma mucho más eficiente que un procesador y multiplicando su capacidad. Gracias a estos dispositivos, el tratamiento digital de la señal en tiempo real es cada vez más eficiente y tiene un coste mucho menor. Además, son reprogramables e ideales para prototipado. Otros sistemas a tener en cuenta son los conversores DAC/ADC (*Digital to analogue converter/ Analogue to Digital converter*). Permiten digitalizar la señal analógica a una alta velocidad de muestreo y con un alto número de bits para muestrear la señal. Estos dos dispositivos son los principales actores en un transceptor digital. Una vez definidas las características digitales, se definió la necesidad de contar con un sistema de control que permitiera gestionar todo el proceso de sondeo y de las diferentes aplicaciones en tiempo real.

Uno de los retos más importantes a los que nos enfrentamos en el diseño de la plataforma fue el de ensamblar los dos sistemas digitales con el sistema de procesado en un único hardware sin disparar los costes. El crecimiento del *Software Radio* ha permitido que las soluciones presentes en el mercado sean más variadas y de menor coste económico. Al realizar un análisis previo de los diferentes productos presentes en el mercado y con las características definidas (características digitales y de procesado para desarrollar todo el tratamiento de la señal) se encontraron diferentes alternativas. Una de las principales características que se tuvo en cuenta para seleccionar la plataforma era el coste económico y los conversores ADC/DAC. Con esta premisa,

se buscó una alternativa que contemplara la placa de desarrollo [64] con una placa externa con los convertidores ADC y DAC [65, 66]. Esta opción proporcionaba una alta flexibilidad al permitir modificar la placa de los convertidores según las necesidades. Por otra parte, la placa de desarrollo dispone de una versión de potencia intermedia de computacional de la serie ZYNQ 7000. Esta solución proporcionaba un sistema de desarrollo de dimensiones reducidas, aunque el precio resultaba elevado. Se contempló una segunda opción con las placas de desarrollo [67, 68]. Estas, con las mismas placas de convertidores proporcionaban múltiples oportunidades al, disponer de todos los periféricos necesarios para realizar cualquier, tarea aunque el precio elevado y las dimensiones de la placa descartaron esta opción. Finalmente, se analizó la viabilidad de la plataforma [69], la Red Pitaya. Esta integra la menor de las FPGAs de la serie ZYNQ 7000 generando incertidumbre en la posibilidad de implementar todo el diseño que se tenía en mente. Esta plataforma integraba en una placa de dimensiones muy reducidas 4 convertidores, 2 DAC y 2 ADC, suficientes para la implementación del diseño deseado. Definitivamente, el precio de esta era el menor de todas las opciones planteadas., Tras el análisis, la plataforma Red Pitaya [69] disponía de las mejores prestaciones para afrontar el desarrollo de la plataforma aun que presentara dudas sobre la posibilidad de integrar todas las funcionalidades en la FPGA. La plataforma dispone de todos los periféricos indispensables para implementar un sistema de comunicación NVIS, y de una gran capacidad computacional necesaria para la implementación de todos los procesos definidos en los objetivos de esta tesis. Estos se definen en la siguiente sección.

#### 4.1.1 Red Pitaya

La plataforma Red Pitaya dispone de un sistema embedded con una FPGA y un microprocesador. Estos dos sistemas han sido ensamblados gracias a la tecnología Zynq [70].

#### Zynq

Se define un sistema incrustado como un sistema empotrado; es decir, un sistema que utiliza un microcontrolador (para realizar varias aplicaciones) con un hardware específico (dispositivo ASIC/FPGA). Por lo tanto, un sistema empotrado estará formado principalmente por un microcontrolador, que será el cerebro de todas las operaciones, gestionado por un sistema operativo. El sistema operativo y las aplicaciones del mismo estarán totalmente relacionadas con un hardware específico para las aplicaciones señaladas. Gracias a la tecnología Zynq, estos dos sistemas totalmente independientes se encuentran ensamblados en el mismo dispositivo. La familia de productos Zynq®-7000 [70] se basa en la arquitectura Xilinx All Programmable SoC. Estos productos engloban un núcleo (o dos núcleos, según qué producto se haya escogido) ARM® Cortex™-A9 [71] basado en Processing System (PS), además de 28 nm de la lógica programable de Xilinx PL (Programmable Logic). Al englobar estos dos sistemas, las posibilidades a la hora de desarrollar un producto son mucho más elevadas, sobre todo en procesado digital de la señal (principal funcionalidad de este sistema), ya que todas las operaciones matemáticas con un alto coste computacional serán realizadas por la lógica programable, y todo el control del sistema, por el PS. Por



lo tanto, este tándem hace del Zynq un dispositivo óptimo para implementar sistemas de procesamiento digital de la señal [72].

### DAC/ADC

La plataforma dispone igualmente de dos canales convertidores de digital a analógico, con una resolución de 14 bits y una frecuencia de muestreo de 125 Msps. A diferencia de los convertidores ADC, los DAC disponen de un único convertidor para gestionar los dos canales convertidores del mundo digital al analógico, hecho que deberá tenerse en cuenta a la hora de implementar el sistema. Estos permitirán sacar por antena la señal ya tratada. Por lo tanto, este periférico lo utiliza únicamente la FPGA. Cabe destacar que las prestaciones de los convertidores ADC y DAC, tanto en frecuencia de muestreo como en bits, definirán todo el sistema de procesamiento digital de la señal, y todas las decisiones de diseño estarán sometidas a estos valores [72].

### Periféricos

- MicroSD: La *microSD* presente en la plataforma permitirá cargar el sistema operativo y el hardware definido previamente. Sin esta, la plataforma no sería gestionada por un sistema operativo, sino que únicamente se podría cargar código (sin gestión de los periféricos). La creación del sistema operativo debe ser de acuerdo con el hardware definido en el diseño del hardware (código FPGA), ya que ambos sistemas utilizarán los mismos periféricos y, por tanto, se deben configurar los dos sistemas exactamente con las mismas propiedades (frecuencias, direcciones de los dispositivos en la RAM...). Si estas propiedades no se definen correctamente, el sistema operativo no se podrá lanzar [72].
- USB: Tendrá un papel muy importante en el funcionamiento del sistema. Las comunicaciones con los periféricos que no están presentes en la placa (GPS, amplificador, memoria externa) se realizarán mediante el USB presente en la placa. Con la ayuda del sistema operativo, se podrán montar todos los dispositivos conectados en el puerto USB (con un hub-USB) y se podrá realizar la comunicación pertinente con los dispositivos externos [72].
- Ethernet: La comunicación Ethernet permitirá programar la aplicación en el sistema operativo, es decir, la gestión de la transmisión y la recepción de los datos. Asimismo, permitirá disponer de un servidor remoto para intercambiar archivos entre un cliente externo y la Red Pitaya [72].
- UART: Finalmente, la comunicación serie permitirá tener un *feedback* del sistema operativo en caso de que haya alguna interrupción no deseada. Permitirá depurar la inicialización del sistema operativo y, por tanto, comprobar si ha habido algún error. Sin este periférico, sería imposible determinar el origen del error que ha impedido lanzar el sistema operativo correctamente [72].

#### 4.1.2 Diseño de la plataforma

Una vez definido el hardware y todos los periféricos disponibles para el diseño de la plataforma, una de las principales etapas en el diseño de un transceptor digital



son los *Digital Up Converters* (DUC) y los *Digital Down Converters* (DDC) [73]. Estos procesos permiten adaptar las frecuencias de muestreo del sistema en banda base con la frecuencia de muestreo de los conversores DAC/ADC. En el caso del sistema diseñado, se define como frecuencia de muestreo  $f_m = 100 \text{ ksps}$ . La  $f_m$  seleccionada permitirá tratar señales de hasta  $50 \text{ khz}$ , valor que servirá para muestrear las señales predefinidas para realizar todos los sondeos 4.2 y la implementación del tiempo real. Conociendo la frecuencia de los DAC y ADC de la plataforma  $f_m = 125 \text{ Msps}$ , se tiene que realizar un factor de delación o interpolación de 1250. A continuación, se define el proceso para un correcto diseño del mismo. En la figura 3 se puede ver la estructura diseñada con todos los bloques y elementos definidos.

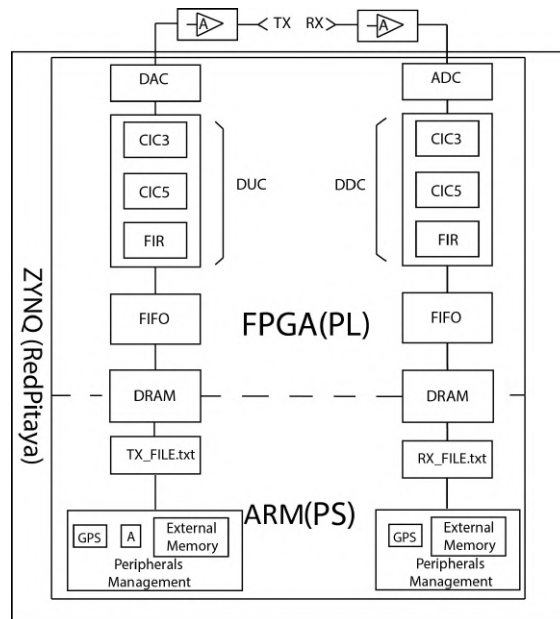


Figura 3: Diagrama de bloques de la estructura del transceptor diseñado[1]. Este describe el diseño a nivel de bloques de la plataforma diseñada. Se observan los dos bloques de la Zynq, el PL y el PS con los diferentes módulos y periféricos usados para realizar la transmisión y recepción de datos.

### Diseño del DDC/DUC

En un sistema de comunicaciones inalámbricas, el bloque del DDC/DUC es uno de los más importantes para el correcto diseño [74–78] y ganar eficiencia en el tratamiento digital de la señal. Dicha eficiencia viene fijada por la diferencia entre el ancho de banda marcado por la frecuencia de muestreo transmitida y el ancho de banda de la modulación de banda estrecha. Realizar el tratamiento de la señal modulada a las frecuencias de los conversores supondría una pérdida en la eficiencia de esta, que, además, sería totalmente innecesaria, ya que no mejoraría el rendimiento [79–82]. El proceso de delación/interpolación para trasladar el espectro de la señal a frecuencias más bajas se podría realizar con una única etapa, aunque el consumo de recursos de la FPGA y el consumo en potencia sería demasiado elevado. Este proceso se realiza en varias etapas para optimizar el consumo en potencia y de recursos de la implementación en la FPGA. El proceso para el diseño está definido en la sección 3.1 *Up and Down Converters*. Este proceso para definir las diferentes etapas en el diseño de

la plataforma ha permitido reducir el coste en potencia y el consumo de los recursos de la FPGA. En la figura 4 se definen las diferentes etapas que permitirán adaptar el ancho de banda de las modulaciones que se transmitirán en los diferentes sondeos.

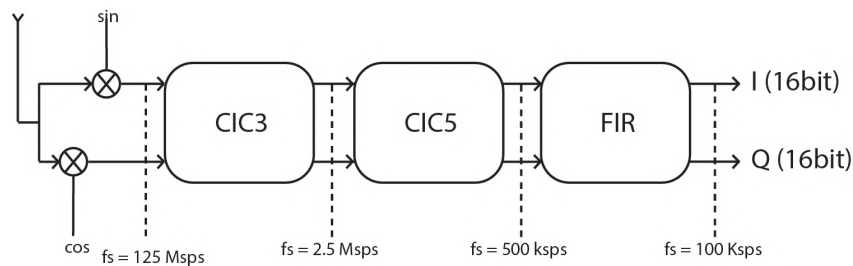


Figura 4: Estructura y etapas del DDC diseñado[1]. Esta figura muestra las diferentes etapas que se han diseñado para la implementación del DUC y DDC. En esta se observan las diferentes etapas y los filtros implementados en estas.

Como se observa en la figura 4, el DDC permite pasar la señal a banda base sin un bloque analógico. El mezclador digital permite bajar a banda base (frecuencia central 0), y los diferentes filtros permiten realizar el filtrado anti-aliasing y la delación correspondiente a cada etapa.

Una vez definida e implementada la estructura de hardware, esta permite, mediante la unidad de procesado (PS) de la Zynq, crear la aplicación para realizar los sondeos diseñados 4.2, así como diseñar e implementar la transmisión de datos en tiempo real.

#### Hardware

- Antena: Como se ha comentado en varias ocasiones, el proyecto prioriza dos aspectos muy importantes: el consumo en potencia y su coste económico. La antena tiene un papel muy importante en el consumo del sistema, ya que puede aportar una gran cantidad de pérdidas en el enlace. Una de las prioridades en la selección de la antena era que fuera fácil de transportar e instalar en zonas de difícil acceso. En estas circunstancias y dada la necesidad de ángulos elevados de incidencia en la ionosfera (de 70° a 90°), se seleccionó una V invertida [54, 55] para realizar el estudio y el tiempo real (análisis de la selección de la antena en [1, 2, 83]).
- Amplificador: Para poder realizar los diferentes sondeos con las modulaciones FSK, QAM y PSK y con las transmisiones de modulaciones con envolvente no constante (QAM), es necesario el uso de un amplificador de clase A. Para realizar el estudio se ha instalado un amplificador con una potencia máxima de 250 W [32, 84].

#### Linux

Los dispositivos con tecnología Zynq son óptimos para el diseño y la implementación de plataformas destinadas al tratamiento digital de la señal. El ensamblaje de una FPGA y un ARM en un único chip proporciona una solución de menor coste económico, menor complejidad y alta elasticidad en el diseño. Igualmente, presenta unas dimensiones reducidas y de un bajo coste en potencia. La posibilidad de integrar

un sistema operativo incrementa las aplicaciones que este tipo de tecnología puede resolver.

Para validar y demostrar las hipótesis de inicio, y tal como se especifica en 3.4, se definen dos aplicaciones totalmente diferenciadas, *sondeo y tiempo real*. Estas dos aplicaciones se fundamentan en el sistema base diseñado e implementado en la FPGA 3. Se diferencian en algunos detalles en la implementación de la FPGA y en la aplicación del Linux. Para una descripción más detallada del diseño del sistema, consultar [72].

#### 4.2 SONDEO

##### *Estudios previos VIS[83]*

Uno de los factores que cabe tener en cuenta para poder sondear el estado de la ionosfera es realizar el estudio de canal correctamente. Para ello, se definieron los primeros parámetros de canal sobre la base de estudios previos realizados por el grupo de investigación y de otros estudios [48, 56, 85–87]. Estos primeros datos se obtienen con los datos de la ionosonda del Observatorio del Ebro [88]. El análisis de los datos de esta ionosonda, y el hecho de que se encontrara cerca de la ubicación de los test previos (Cambrils Barcelona), permitió definir los siguientes parámetros:

- La frecuencia de trabajo de la ionosfera: Elegir la frecuencia de trabajo óptima como  $0.85 \times foF2$ , siendo  $foF2$  la frecuencia crítica de la capa superior de la ionosfera [89–91]. Para definirla, se estudiaron las frecuencias críticas de los años anteriores para el mes en el que se realizarían los test, lo cual permitió establecer un rango frecuencial de uso de la ionosfera para NVIS. En la tabla 1 se muestran las frecuencias críticas  $foF2$  medias de los meses de julio a diferentes horas y para diferentes años. Gracias a este estudio, se determinó que la mejor banda para trabajar y tener mayor disponibilidad en el enlace ionosférico es de 5 a 6 MHz.

	Julio 6.00 UTC	Julio 8.00 UTC	Julio 9.00 UTC	Julio 10.00 UTC	Julio 14.00 UTC
2013	4,3	4,2	5,2	5,9	6
2014	6,3	6,4	6,3	7,5	8
2015	5,5	7,8	7,78	6,5	7,2
2016	4,8	4,6	5,2	5,9	5,8

Tabla 1: Frecuencias críticas media capa  $foF2$  Julio del 2013 al 2016. En esta tabla se muestra la variación de los últimos años previos al estudio realizado en esta tesis de la frecuencia crítica de la capa  $foF2$ . Esta permite tener una visión sobre la evolución de la ionosfera y ha permitido seleccionar el rango de frecuencias para el estudio realizado.

- *Doppler y Delay Spread*: Un estudio previo permitió dimensionar correctamente la cantidad de muestras que se transmitirán en cada paquete para realizar el sondeo. Estos parámetros limitarán la longitud de cada trama, lo cual permite mantener todos los datos sondeados dentro del tiempo y ancho de banda de coherencia de canal 2.

		Octubre 24 de 2012		Marzo 5 de 2013	
Parámetros	Onda	Media	varianza	Media	varianza
<i>Doppler Spread</i> (Hz)	Ordinaria	0,681	0,094	0,378	0,199
	Extraordinaria	0,123	0,095	0,081	0,061
<i>Doppler Shift</i> (Hz)	Ordinaria	-0,088	0,554	-0,025	0,208
	Extraordinaria	-0,073	0,478	-0,222	0,177
<i>Multipath Spread</i> ( $\mu$ s)	Ordinaria	710,71	2,83	496,01	2,017
	Extraordinaria	921,41	4,457	712,47	3,186

Tabla 2: Los resultados de sondeo de NVIS a partir de datos de la ionosonda del Observatorio del Ebro. Datos obtenidos del estudio [56]. Estos datos han permitido tener una primera aproximación para realizar una primera versión de la capa física.

Tras las primeras decisiones de diseño, se creó el primer formato de trama, que permitió realizar los primeros test de sondeo. Estos se dividen en dos secciones totalmente diferenciadas: una comparativa de tipos de modulaciones de banda estrecha y un barrido de las potencias de transmisión de 0,7 W a 100 W 3. Está puesta en marcha permitió definir los primeros objetivos e hipótesis sobre el rendimiento de las diferentes modulaciones.

#### *Objetivos del estudio e hipótesis*

Uno de los requisitos fundamentales en la selección del banco de pruebas y uno de los principales aspectos en el que se basa el estudio es el bajo consumo en potencia. Para ello, la investigación se centró en definir qué modulación de banda estrecha (permitiendo optimizar el ancho de banda ocupado por la modulación) podría tener un mejor rendimiento para transmisiones de muy baja potencia. Para poder comparar los resultados obtenidos con los estándares actuales y observar las diferencias, el ancho de banda de las señales será de 3 kHz [19, 92, 93]. Los test realizados permitirán medir el rendimiento de estas modulaciones según sus características, 2-4PSK/2-4QAM vs. FSK. Una de las principales diferencias entre estas es que la FSK se verá más afectada por los efectos del canal, como el *Doppler shift* y la duración del símbolo, lo cual dificulta la demodulación. Sin embargo, no se verá afectada por los cambios de amplitud del canal; será más robusta frente a los *fading* del mismo. A diferencia de la FSK, las PSK/QAM de orden 2-4 se verán afectadas tanto por el *Doppler shift* como por los *fadings*, lo cual causará la pérdida de sincronismo y la pérdida de datos. La primera hipótesis para los primeros resultados de esta tesis es que se obtendrá un mejor resultado para potencias bajas para la modulación FSK y, al contrario, para potencias más altas tendrá un mejor rendimiento la PSK. Esto se debe a que la PSK no se verá afectada por las variaciones de amplitud provocadas por el canal.

Los primeros test permitirán observar los comportamientos para el mismo ancho de banda y la misma velocidad en la transmisión de bit de las dos modulaciones para diferentes potencias de transmisión 3.

Tabla 3: En esta tabla se representa el banco de pruebas realizadas para la obtención de los diferentes resultados de esta tesis[1]. En esta se observa el barrido de potencias y las modulaciones usadas.

N-Test	M-PSK	M-FSK	TX Power(W)
0-Test	2-PSK	2-FSK	100W
1-Test	4-PSK	4-FSK	100W
2-Test	2-PSK	2-FSK	24W
3-Test	4-PSK	4-FSK	24W
4-Test	2-PSK	2-FSK	6W
5-Test	4-PSK	4-FSK	6W
6-Test	2-PSK	2-FSK	3W
7-Test	4-PSK	4-FSK	3W
8-Test	2-PSK	2-FSK	1.5W
9-Test	4-PSK	4-FSK	1.5W
10-Test	2-PSK	2-FSK	0.7W
11-Test	4-PSK	4-FSK	0.7W

#### Estructura de la trama del sondeo[83]

En todo sistema de telecomunicaciones, una correcta sincronización tanto temporal como frecuencial es primordial para su correcto funcionamiento. Aparte del bajo consumo en potencia, uno de los prerrequisitos en el diseño era la adaptación del estudio para una plataforma de bajo coste económico. Esto dificultaba la detección y la demodulación de los datos. Una de las principales desventajas en el uso de plataformas SDR (*Software defined radio* de bajo coste es la estabilidad de los cristales, que provoca variaciones de hasta  $\pm 50$  Hz en la frecuencia de la portadora y añade un *Doppler shift* muy elevado en el enlace de comunicación. En un sistema de telecomunicaciones, el *Doppler shift* afecta significativamente a la sincronización y detección del *frame* recibido, lo cual causa un aumento de los errores en la transmisión y la disminución de la eficiencia en la sincronización de la secuencia *PN* (*Pseudo-Noise*). La corrección del *Doppler shift* se realiza transmitiendo un tono de 600 Hz al inicio de cada trama. Esta corrección permitirá sincronizar y demodular correctamente la señal recibida. Por otra parte, la secuencia *PN* juega un papel esencial tanto en la detección de los datos, como en la sincronización entre los diferentes paquetes. Con el fin de diseñar una trama que la FPGA pudiera tratar en tiempo real con la estructura de datos, se seleccionó una secuencia *PN* adecuada a las características de la FPGA. Se tuvo en cuenta la frecuencia de muestreo y la limitada capacidad de esta con el fin de poder implementar un *matcher filter* y poder detectar las tramas entrantes en tiempo real. Por ello, se seleccionó una secuencia *PN* de la familia de secuencias tipo *m* [94], ya que nos permite maximizar la propiedad de autocorrelación de esta secuencia. Se estableció una relación entre ancho de banda y muestras a tratar por la FPGA manteniendo un alto número de chips adecuado. Finalmente, se definió una secuencia *PN* con un total de 64 chips y un orden de 6 formada por el polinomio [6 5 0], finalmente se le aplica un factor de

remuestreo de 8 obteniendo un total de 5.12 ms, 512 muestras y un ancho de banda de 11 khz. En la figura 5 se puede observar la estructura de datos con los diferentes bloques definidos.

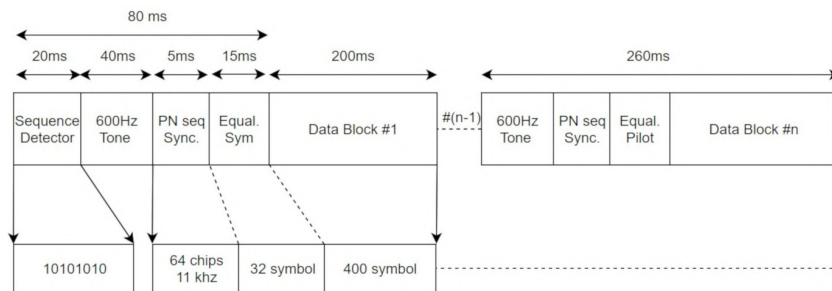


Figura 5: Estructura *frame* versión 1 [83]. Esta figura muestra la primera definición de la estructura de datos. Se observan los diferentes bloques (secuencias de detección, tono, secuencias PN y datos y la duración de estos.

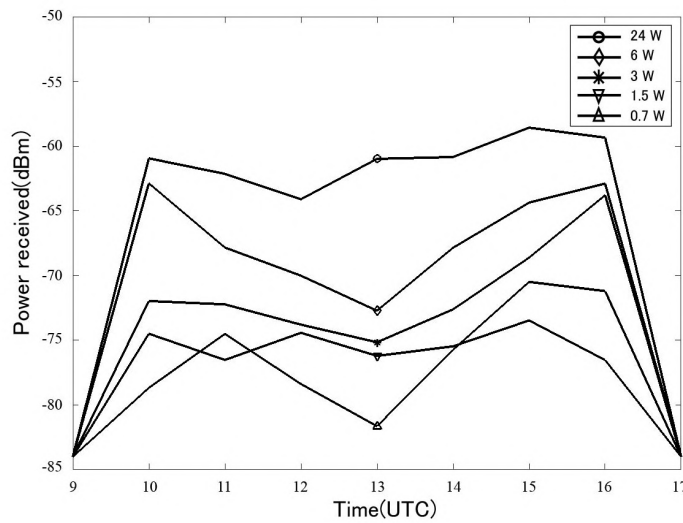
Gracias a los estudios realizados con anterioridad al proyecto, a la definición de los primeros objetivos, las hipótesis, el diseño y el testeo de la estructura, se observan los primeros resultados.

#### Resultados y observaciones: BER vs EbNo, Time variation, CDF function [1]

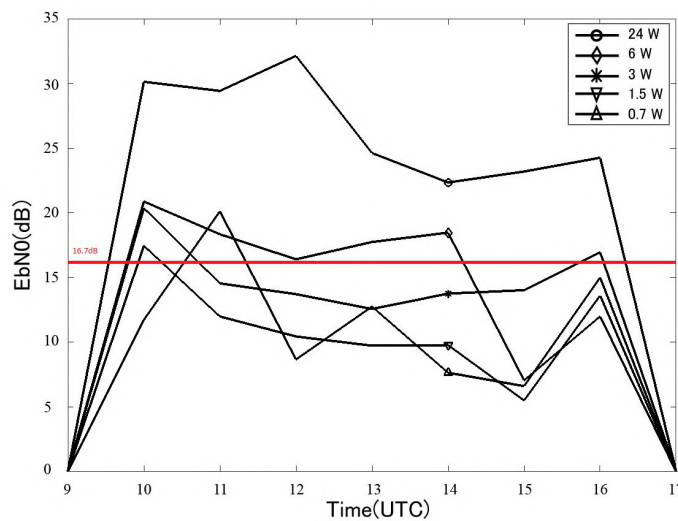
Para un primer análisis del comportamiento de las diferentes modulaciones y órdenes de las mismas, se realiza un estudio de la tasa de bit errónea respecto a la energía de bit y al ruido ambiente de la señal recibida. Los test realizados se observan en la tabla 3. Un dato importante para conocer el rendimiento de las diferentes modulaciones es la CDF (*Cumulative distribution function*). La CDF nos permite saber la probabilidad de obtener un cierto *Bit Error Rate (BER)* para una determinada potencia de transmisión. Asimismo, nos permite saber qué tipo de modulación tendrá un mejor rendimiento en las mismas condiciones. Por otra parte, se realiza un estudio analizando la EbNo asociada a las dos variables, según las diferentes potencias de transmisión y la hora de la transmisión. A continuación, se relacionan los resultados de este estudio.

- *Time variation*: Como se definía en las primeras hipótesis, el canal NVIS muestra fuertes variaciones en su comportamiento dependiendo de la hora de transmisión. En la figura 6 a) se observa la potencia recibida según la hora y la potencia transmitida, y se muestran variaciones de hasta 12 dB para la misma potencia de transmisión en únicamente 3 horas. Aunque se observan fuertes variaciones, hay un intervalo de tiempo largo de alrededor de 6 horas durante el día y la noche en el que el enlace puede establecerse sin cambiar la frecuencia, ya que es mucho más constante. Si comparamos las potencias transmitidas 3 y recibidas (estas oscilan entre -60 y -80 dBm), observamos que el canal aporta alrededor de unos 105 dB de pérdidas. Asimismo, observamos que las pérdidas por el canal son mayores alrededor de la 1 p. m. Este hecho se debe a que la capa D tiene un máximo de absorción en este momento de del día, lo cual provoca una mayor pérdida de potencia de la señal [95–98]. Finalmente, en la figura 6 b) se observan las variaciones del  $E_b/N_0$  según la potencia de transmisión y la hora (UTC) para una BPSK. Observamos que, para una potencia de transmisión de 6

W, el  $E_b/N_0$  se encuentra alrededor de los 17 dB. Junto con el análisis de bits erróneos, estos datos permitirán escoger la mejor configuración para este entorno de comunicación.



(a) Potencia de recepción para la modulación BPSK.[1]. En esta gráfica se muestra la variación de la potencia recibida según la potencia transmitida para la modulación BPSK.



(b)  $E_b/N_0$  según potencia de transmisión.[1]. En esta se observa la variación del  $E_b/N_0$  según la potencia de transmisión durante las principales horas del día. Se destacan los 16.7 dB para su posterior comparación con la figura 7

Figura 6: Variación de la potencia de recepción y del  $E_b/N_0$  según las diferentes potencias de transmisión[1]

- BER vs  $E_b/N_0$ :

Para realizar la demodulación de los datos y el análisis BER vs.  $E_b/N_0$ , todos los datos han sido corregidos en frecuencia (corrección del *Doppler shift*) y sincronizados temporalmente. Además, se les ha aplicado una ecualización del



tipo *Recursive Least Squares (RLS)* [99] para corregir las variaciones del canal NVIS [100] (*Doppler y Delay spread*). La figura 7 muestra que alrededor de 18 dB el sistema empieza a responder correctamente a las variaciones del canal. En este análisis se han mezclado todos los canales posibles sin diferenciar si la señal ha pasado por mejores o peores condiciones[101]. En este análisis (resultados analizados más profundamente en [1]) se empieza a observar que la modulación PSK tiene un mejor rendimiento que la FSK. Por otra parte, es necesario tener un  $E_b/N_0$  a partir de 17 dB para observar una menor cantidad de errores y que un sistema sea capaz de corregirlos.

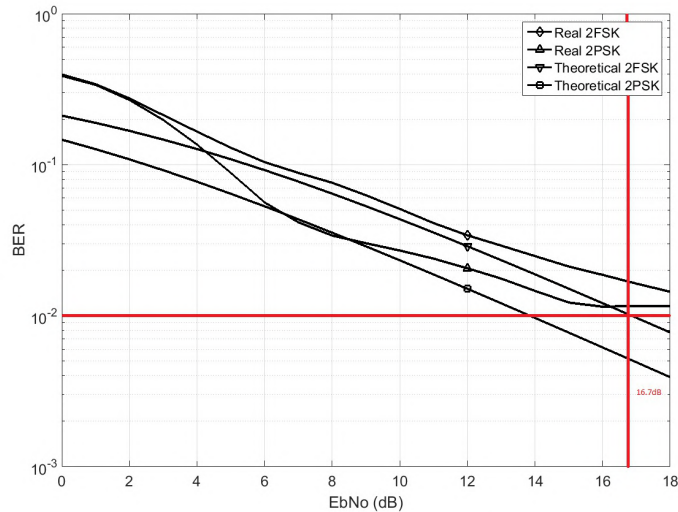


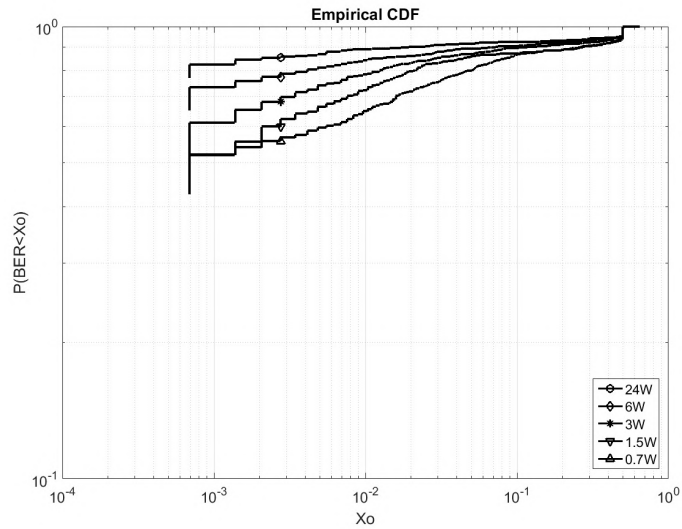
Figura 7: BER vs  $E_bN_0$  [1]. En esta gráfica se muestra una comparación de los resultados obtenidos en el enlace ionosférico con los resultados teóricos. Se destaca que para obtener una BER superior a  $10^{-2}$ , el mínimo  $E_bN_0$  necesario es de 16.7 dB.

- CDF function:

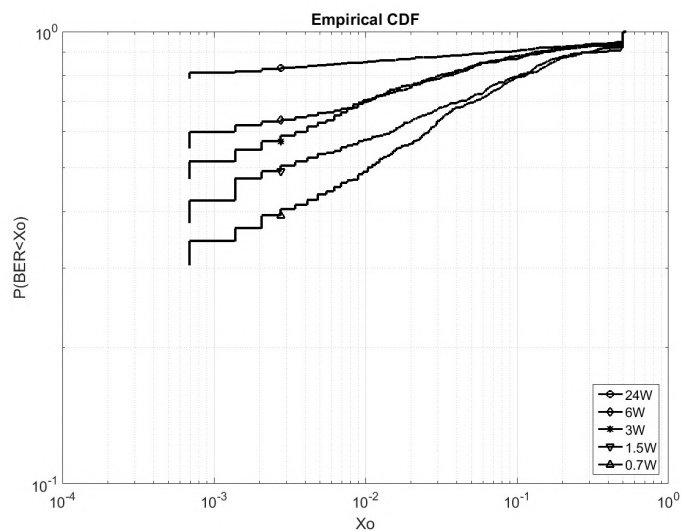
Para poder analizar más profundamente las diferencias entre el rendimiento de las modulaciones de fase y las de frecuencia, se realizan unas estadísticas de las posibilidades de conseguir un BER según el tipo de modulación. En las figuras 8 se observa la probabilidad de obtener un cierto BER (eje de las X) en un porcentaje (eje de las Y). Estas gráficas aportan otro punto de vista que no tiene en cuenta el  $E_bN_0$ , con lo cual el resultado obtenido es más realista para este tipo de entornos. El análisis se realiza diferenciando las potencias de transmisión y las modulaciones (PSK, FSK). Para una potencia de transmisión de 6 W, si comparamos las dos gráficas se observa una gran diferencia: para la FSK, la probabilidad de tener un BER de  $10^{-3}$  es del 60%, mientras que para la PSK es 73%. Esta gran diferencia puede deberse al hecho que, para poder competir con los mismos *bit-rates* que la PSK, la separación entre los símbolos de la FSK y la duración del símbolo dificulta la detección y demodulación del dato recibido. Teniendo en cuenta estos resultados, se puede realizar la primera conclusión con el análisis de la CDF. Para potencias de transmisión de hasta 6 W con modulación BPSK aplicando un ecualizador RLS, los resultados observados muestran que dichas potencias de transmisión son suficientes para comunicaciones para



sensores remotos que utilizan comunicaciones NVIS. Tenemos que considerar que no se ha utilizado ECC (Corrección de código de error).



(a) Resultados de la CDF para la modulación PSK según las potencias de transmisión [1]



(b) Resultados de la CDF para la modulación FSK según las potencias de transmisión [1]

Figura 8: Resultados de la CDF según modulación y potencia de transmisión. Estas gráficas muestran las probabilidades de obtener un cierto BER según las modulaciones y las potencias de transmisión [1]

### Primeras conclusiones

Sobre la base de los estudios previos a esta tesis y los primeros resultados obtenidos, se puede establecer una ventana de hasta 6 horas en la que se pueden comunicar dos dispositivos mediante una única frecuencia. Estos datos aportan un gran avance para demostrar que con solamente 4 frecuencias previamente seleccionadas se podría

transmitir durante todo el día (24 horas). Además, no será necesario utilizar una antena de banda ancha, sino que se usará una antena multi banda con menos pérdidas. Por otra parte, se tendrá en cuenta que durante las horas del mediodía la atenuación del canal ionosférico causa una mayor pérdida de potencia en la señal.

La modulación BPSK parece la mejor opción, debido a su compensación entre el rendimiento de BER y la eficiencia del amplificador de potencia. Hemos determinado que el uso de BPSK con una potencia de transmisión no superior a 10 W garantiza la demodulación adecuada de los datos del sensor.

Aunque la PSK muestra una gran mejora respecto a la FSK, falta saber si para un mayor orden en la modulación la respuesta de estos tipos de modulación sigue la misma tendencia. El análisis realizado en la siguiente sección se ha llevado a cabo en entornos remotos, donde el nivel de ruido es mucho menor, lo cual supone una gran mejora en el rendimiento de las modulaciones. Por otra parte, se realizarán test con diferentes anchos de banda para observar el rendimiento de las diferentes modulaciones fuera del ancho de banda estándar de un canal de HF.

### 4.3 SONDEO ANTÁRTICO

En esta sección presentamos los resultados más relevantes de las pruebas realizadas en términos de modulación, ancho de banda y potencia de transmisión. Todos los datos se recopilaron durante la campaña antártica española 2018-2019 en la Isla Livingston del 1 de febrero al 2 de marzo de 2019 [2]. Para el nuevo análisis en este entorno, y a partir de los resultados obtenidos, se realizará un estudio no solo de las modulaciones según la potencia de transmisión y orden, sino modificando el ancho de banda de la señal 5 (de 2,3 kHz a 25 kHz) y aumentando el orden de las modulaciones 4 (de 2 a 32 para PSK, QAM y FSK) para diferentes potencias de transmisión. Este estudio permitirá realizar el análisis del comportamiento de las modulaciones según diferentes parámetros, así como observar el rendimiento del sistema diseñado para anchos de banda más exigentes.

Tabla 4: Esta tabla representé el banco de pruebas realizado durante la campaña antártica según las potencias de transmisión y los diferentes ordenes de modulación [2]

Order of modulation	Power transmission	Minute
2,4,8,16,32	1W	05,06,07,08,09
2,4,8,16,32	3W	15,16,17,18,19
2,4,8,16,32	6W	25,26,27,28,29
2,4,8,16,32	12W	35,36,37,38,39
2,4,8,16,32	24W	45,46,47,48,49
2,4,8,16,32	6W	55,56,57,58,59

Para optimizar este estudio y asegurarse que todas las señales están dentro del ancho de banda del canal 2, se realiza una modificación en el formato de trama utilizado para

Tabla 5: Esta tabla representé el segundo banco de pruebas realizado durante la campaña antártica según los anchos de banda de las diferentes modulaciones[2]

Order of modulation	Bandwidth transmission	Minute
2,4,8,16,32	5kHz	05,06,07,08,09
2,4,8,16,32	10kHz	15,16,17,18,19
2,4,8,16,32	16.66kHz	25,26,27,28,29
2,4,8,16,32	16.66kHz	35,36,37,38,39
Other tests	Other tests	45,46,47,48,49
Other tests	Other tests	55,56,57,58,59

realizar las transmisiones. En la figura 9 se observa que cada paquete de modulaciones se encuentra dentro de un mismo intervalo de tiempo (510,36 ms), inferior al tiempo de coherencia del canal (1,61 s a 2 [20, 56]). Esta modificación respecto a la figura 5 permite realizar la comparación de las modulaciones con un método más equitativo, ya que todos los paquetes para todas las modulaciones se encuentran en las mismas condiciones de canal. Esta mejora permitirá obtener una comparativa más justa entre todas las modulaciones observadas.

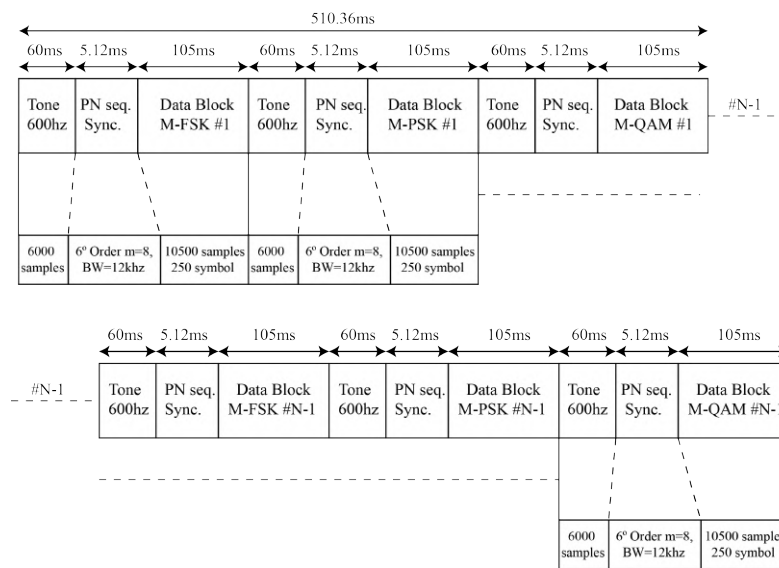
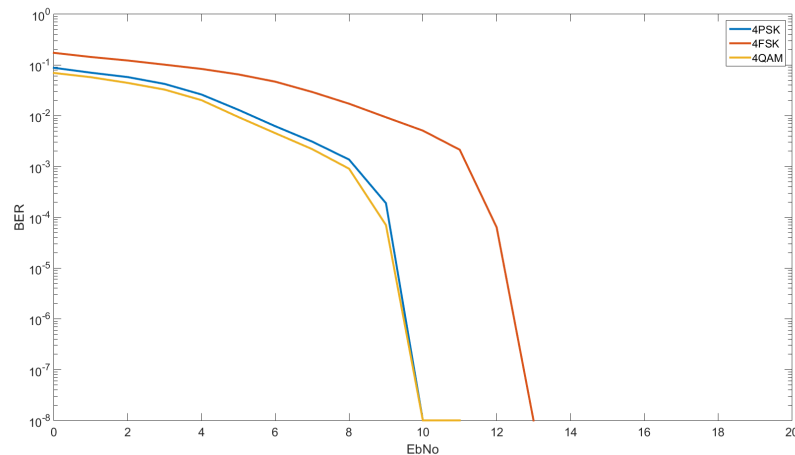


Figura 9: En esta figura se representa el diseño de la trama que permitirá realizar los diferentes tests. En esta se muestra los diferentes bloques que contiene la trama en la transmisión de los diferentes bloques. [2]

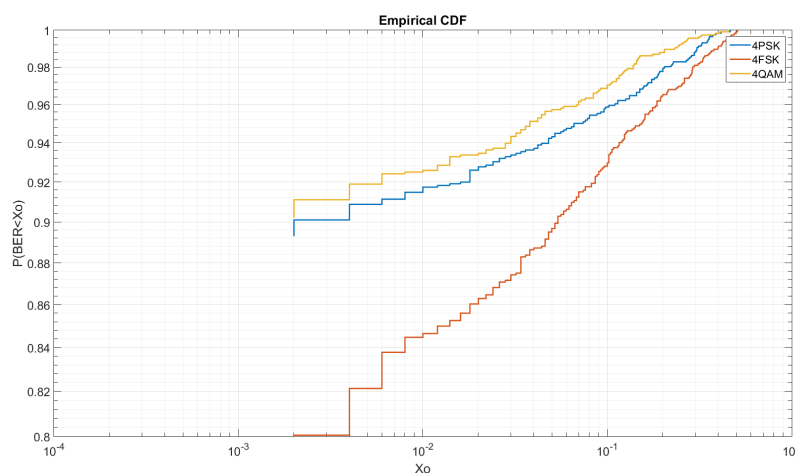
### Test según potencia transmitida[2]

Si comparamos los resultados obtenidos en el estudio previo a la campaña antártica, se observa una clara mejora en la potencia de transmisión mínima para conseguir un mejor rendimiento de las diferentes modulaciones. En las figuras 10 se observan los resultados obtenidos en el sondeo antártico. Se puede destacar que para la

modulación 4QAM y una potencia de transmisión de solamente 2 W se obtiene una probabilidad del 90% de tener un BER inferior al 0,004. Por otra parte, podemos observar que para obtener un BER inferior a  $10^{-3}$  únicamente es necesario un EbNo de 8 dB. Observamos, además, que la modulación de frecuencia sigue teniendo un peor rendimiento que las otras modulaciones. Cabe resaltar que los resultados muestran una clara mejora respecto a los mostrados en la sección anterior. Concretamente, señalan que las comunicaciones NVIS para entornos remotos son una clara alternativa de comunicación. Al comparar los resultados obtenidos con los estándares actuales de HF, se puede observar una clara mejoría (comparación detallada en [2] y en 4.5).



(a) BER vs Eb/No según modulaciones de orden 4 [2]. En esta gráfica se muestra el rendimiento de las diferentes modulaciones de cuarto orden según el Eb/No.



(b) CDF según modulaciones de orden 4 y 2W de potencia de transmisión [2]

Figura 10: Rendimiento de las modulaciones de orden 4. Se analiza la CDF para una potencia de transmisión de 2W y la BER vs Eb/No de las diferentes modulaciones.[2].

#### Test según ancho de banda[2]

Tanto en el estudio realizado en 4.2 como en 4.3, el ancho de banda es el definido por un canal de HF estándar. En este punto se estudiará el comportamiento de las diferentes

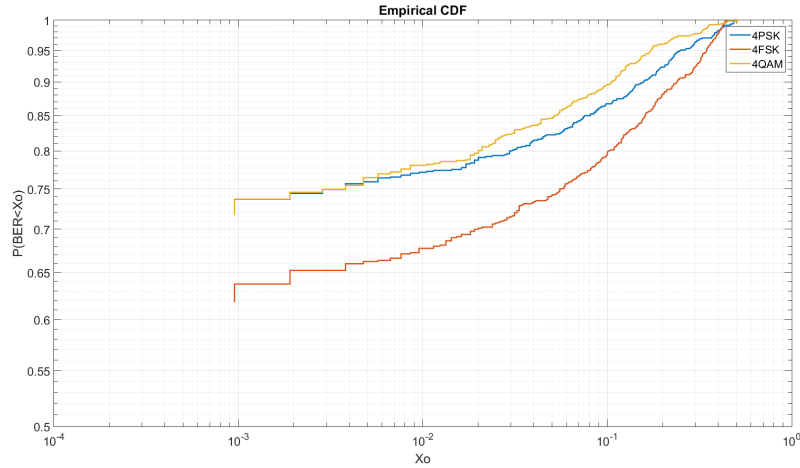
modulaciones con un único canal con anchos de banda más grandes. Para un esquema de las modulaciones testeadas (PSK y QAM), el ancho de banda influye directamente en la velocidad de bit que proporciona la modulación. En el caso de la FSK, permite conseguir una mayor separación frecuencial entre subportadoras o bien mantener la separación y tener mayor velocidad. A fin de que la comparación sea coherente entre las diferentes modulaciones, estas se configuran con el mismo ancho de banda y con la misma velocidad de bit. Este análisis muestra los resultados para un ancho de banda de hasta 25 kHz, aunque se muestra mayor énfasis en los resultados obtenidos con anchos de banda hasta 10 kHz. Las configuraciones seleccionadas alcanzan una velocidad de hasta 18,4 Kbps (BW = 10 kHz para una 4QAM); configuración que aporta los mejores resultados. Todos estos test se han realizado con una potencia de transmisión de 24 W. En la figura 11 se muestran los resultados obtenidos en el estudio. Se observa que, para un ancho de banda de 5 kHz, la probabilidad de obtener un BER inferior a  $10^{-3}$  es del 73,7% tanto para la 4PSK como para la 4QAM, mientras que para la FSK es de un 63,8 %. Finalmente, para un ancho de banda de 10 kHz, para la 4PSK y 4QAM es de alrededor de un 66 % frente al 43,9 % de la FSK. Estos resultados muestran que para aumentar la velocidad de transmisión, tanto la 4PSK como la 4QAM muestran mejores resultados que la FSK. Aunque el ancho de banda se ve aumentado, la tasa de error de bits sigue siendo baja, y existe una probabilidad alta de conseguir la tasa deseada.

#### 4.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

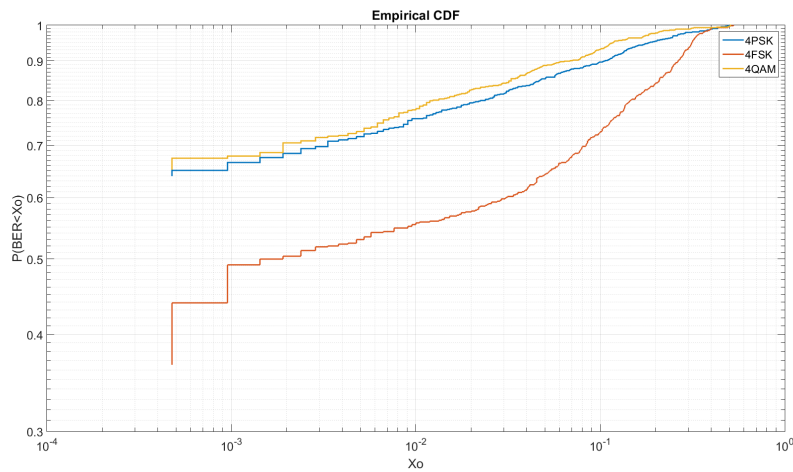
En esta sección se describirá los diferentes procesos llevados a cabo para la obtención de todos los objetivos que se definen en la tesis.

##### 4.4.1 *Análisis y diseño capa física*

- Selección de la frecuencia de trabajo: Al tratarse de uno de los parámetros más críticos en un enlace ionosférico, la selección de la frecuencia se ha realizado mediante un estudio exhaustivo de los últimos 10 años. Para ello se seleccionaron las frecuencias críticas de la capa  $f_2$  de las series históricas proporcionadas por el Observatorio de Ebre en Roquetes. Estimando las variaciones de los anteriores ciclos solares, se seleccionó la frecuencia de trabajo. Con la finalidad de obtener los mejores resultados, se ha modificado esta frecuencia a medida que han pasado los años adaptando los sondeos al ciclo solar. Por otro lado, la frecuencia de uso durante la estada en la Antártica se analizó de la misma forma, pero esta vez con los datos de la ionosonda del Observatorio del Ebre situada en la Base Juan Carlos I.
- Simulaciones canal ionosférico: Para poder analizar los posibles resultados de las modulaciones seleccionadas para el banco de pruebas, inicialmente se realiza una serie de simulaciones del canal ionosférico. La selección de los parámetros de la ionosfera se basó en el estudio realizado en [56] donde se analizan los parámetros de la ionosfera con los datos obtenidos en el Observatorio del Ebre. Todas las versiones de las tramas definidas se han basado en este análisis. Con los parámetros de la ionosfera seleccionados se definió una primera versión de



(a) Análisis de la CDF para las modulaciones de cuarto orden para un BW=5 kHz[2]



(b) Análisis de la CDF para las modulaciones de cuarto orden para un BW=10 kHz[2]

Figura 11: Análisis de distintas CDFs para anchos dos anchos de banda, 5 y 10kHz a 24 W [2]

la trama. Con la primera estructura de trama se realizaron las simulaciones para ver los rendimientos de las modulaciones.

- Selección del banco de pruebas: Los resultados de las simulaciones que se utilizaron para la selección del banco de pruebas fueron la SNR. Teniendo en cuenta la atenuación en potencia de la ionosfera, las antenas utilizadas y las posibles potencias de transmisión, se seleccionaron los diferentes órdenes de modulación que se definirían en el banco de pruebas. Así mismo, se acotaron las potencias de transmisión según especificaciones el amplificador.
- Iteraciones en el diseño de la trama: Los primeros resultados obtenidos en [1] dieron pie a un primer análisis del rendimiento de las modulaciones. En este se analiza el rendimiento de ellas comparando con los datos simulados mediante el canal ionosférico definido. Tras el análisis de estos resultados, y con la finalidad de realizar una comparación entre las modulaciones como más estricta posible, se

modificó la estructura de trama. Una vez redefinida se realizó una simulación de esta nueva estructura analizando los resultados con los obtenidos anteriormente.

#### 4.4.2 *Diseño e implementación de la plataforma de comunicación*

- **Diseño del hardware:** Para realizar el desarrollo de la plataforma y para las etapas más críticas de la implementación (intercambio de datos entre PS y PL mediante la DMA y el DUC/DDC), se validó su correcto funcionamiento mediante la implementación en *bare-metal* (programación del PS sin un sistema operativo). Esta fase inicial permitió validar el funcionamiento y la elección correctos del hardware escogido. Para el diseño del DUC y el DDC, se simuló todo el proceso con la herramienta de cálculo MATLAB con el fin de obtener la mejor configuración de filtros minimizando el consumo de recursos de la FPGA, consumo en potencia y eficiencia de la arquitectura. Para ello, se definieron diferentes escenarios en el proceso de interpolado y delmado de la señal, en los que el *Alias Rejection* cumpliera los requisitos de la señal y de los conversores. Una vez definidas estas configuraciones, se implementó el hardware para seleccionar la arquitectura con un menor consumo. Tras escoger la estructura, se integró con un SO y se implementaron las aplicaciones necesarias.
- **Sistema tiempo real (TR) y formato de trama:** El análisis previo del canal y de las modulaciones permitió definir un primer formato de trama. El sistema en tiempo real se validó y testeó en un entorno controlado (test en laboratorio), y se terminó de adaptar la trama al hardware. Finalmente, se testeó tanto el formato de trama como el correcto funcionamiento de la plataforma en tiempo real en el enlace entre Barcelona y Cambrils. Todo este estudio previo, las decisiones de diseño y la validación de la implementación de la plataforma permitieron realizar la campaña antártica con una arquitectura y un banco de pruebas testeados y validados, lo cual ofrecería una garantía en los resultados.

#### 4.5 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

El estudio realizado en [1] y en [2, 102] permite definir una nueva solución para comunicar dispositivos en ubicaciones en las que hasta ahora solo eran posibles las comunicaciones por satélite.

En esta tesis se explora la influencia de diferentes tipos de modulaciones de banda estrecha, la potencia de transmisión y el ancho de banda de la señal en las comunicaciones, con el fin de aportar una solución para las comunicaciones en entornos remotos. Los diferentes test realizados en las diferentes ubicaciones permiten extraer conclusiones claras para el uso de este canal de comunicaciones con el fin de establecer comunicaciones de largo alcance, bajo consumo y adaptadas a múltiples entornos.

Basándonos en el estudio realizado en [1] se establece una ventana de uso del canal ionosférico con transmisiones NVIS de 6 horas con una única frecuencia. La definición de esta ventana aporta una ventaja respecto a la selección de las frecuencias de transmisión, ya que, con solamente 4 frecuencias, el enlace ionosférico podría estar

activo durante las 24 horas del día. Este hecho es clave para la optimización de las pérdidas de potencia añadidas por las antenas en un sistema multi banda.

Como solución para entornos remotos donde el consumo en potencia es decisivo para el correcto funcionamiento y la durabilidad del enlace, de los resultados observados en [2, 102] se desprende que la mejor configuración es una potencia de transmisión de 2 W, un ancho de banda de 2,3 kHz y una 4QAM o bien una 2PSK. Estas configuraciones permitirían tener un enlace de muy bajo consumo con respecto a otros sistemas de comunicaciones HF [30, 31] genéricos, los cuales no serían aptos para comunicaciones de dispositivos remotos en las que prima el bajo consumo en batería.

Para entornos en los que prima el ancho de banda y la velocidad de transmisión de datos, la mejor configuración para potencias de transmisión de 24 W (la cual sigue siendo menor que la de los sistemas actuales de HF) es una 4QAM y un ancho de banda de 5 kHz, con los que se consigue una velocidad de bit de 10 kbits.

Finalmente, al comparar los rendimientos observados en los diferentes entornos de comunicación, se observan mejores resultados con la estructura de trama definida en la figura 9.





## CASOS DE ESTUDIO Y APLICACIONES

---

La flexibilidad de la tecnología y su fácil instalación permiten emplear este sistema en múltiples aplicaciones. Como se expresa en el capítulo 1, se definen tres casos de estudio y tres aplicaciones diferentes en las que se podría implementar la investigación realizada en esta tesis. En este capítulo se definirán con más detalle estas aplicaciones y los diferentes casos de estudio en los que se ha desarrollado la tesis:

- Sensores situados en zonas remotas sin infraestructuras de comunicación - Antártica
- Sistema de comunicación (mensajería, correo) para zonas con población muy dispersa - Urubamba
- Sistema para emergencias en situaciones en las que todas las redes disponibles fallen

### 5.1 ANTÁRTICA

La Antártica es uno de los lugares más remotos y aislados del mundo. Muchas actividades de investigación se desarrollan en las bases científicas distribuidas en todo el continente durante el año [103]. La mayoría de los estudios científicos se basan en datos recopilados por sensores. Algunos de ellos se encuentran lejos de la base, y la descarga de los datos debe hacerse manualmente. Uno de los principales casos de estudio, y el fundamento de los resultados de este documento, se basa en comunicaciones para aportar una solución para dispositivos IoT en estos entornos. Actualmente, la única solución para la comunicación es por satélite, si bien tiene un alto coste económico. Por otra parte, en ubicaciones tan remotas como los polos, la cobertura del satélite está igualmente limitada, lo cual incrementa el coste y la dificultad en la instalación del nodo transceptor. Con el estudio realizado en esta tesis se propone una aplicación para redes de sensores en entornos muy remotos.

Como se ha mostrado en la sección 4.3, las aplicaciones diseñadas e implementadas en la Antártica se diferencian entre el sondeo de las capas de la ionosfera y una red de comunicaciones para dispositivos IoT.

#### 5.1.1 *Sondeo*

Aunque la presencia de digisondas [88] en la Antártica permite estudiar y definir el comportamiento de la ionosfera en estas latitudes del planeta, no permite realizar el estudio mediante la propagación NVIS. Los estudios basados en los resultados de las digisondas permiten definir el comportamiento de la ionosfera, pero no son capaces de hacerlo con la suficiente claridad para comunicaciones ionosféricas, ya que el canal de comunicación para NVIS es diferente que para el VIS (canal observado por la

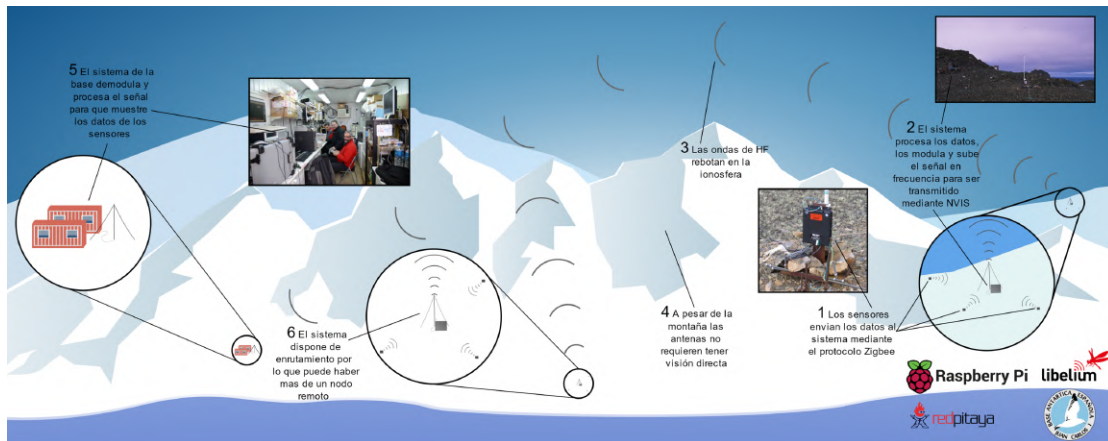


Figura 12: Proyecto antártico: Comunicaciones para *Remote IoT*. En esta figura se muestra la distribución de los diferentes nodos NVIS y la red de sensores durante la campaña 2018-2019

digisonda). El diseño y la implementación de esta plataforma permiten definir con más facilidad y fiabilidad el comportamiento de la ionosfera para diferentes ángulos de incidencia. El hecho de disponer de un transmisor y varios receptores (a diferencia de la digisonda, que solamente realiza el sondeo con un único transceptor) permite colocar los nodos en diferentes ubicaciones y obtener el estado de la ionosfera en el mismo instante en diferentes momentos. Eso, a su vez, permite observar la respuesta del canal con diferentes ángulos de incidencia.

Durante la Campaña antártica 2018-2019, se ubicaron dos nodos receptores que permitieron tener la respuesta del canal en dos ubicaciones diferentes en el mismo momento [13](#).

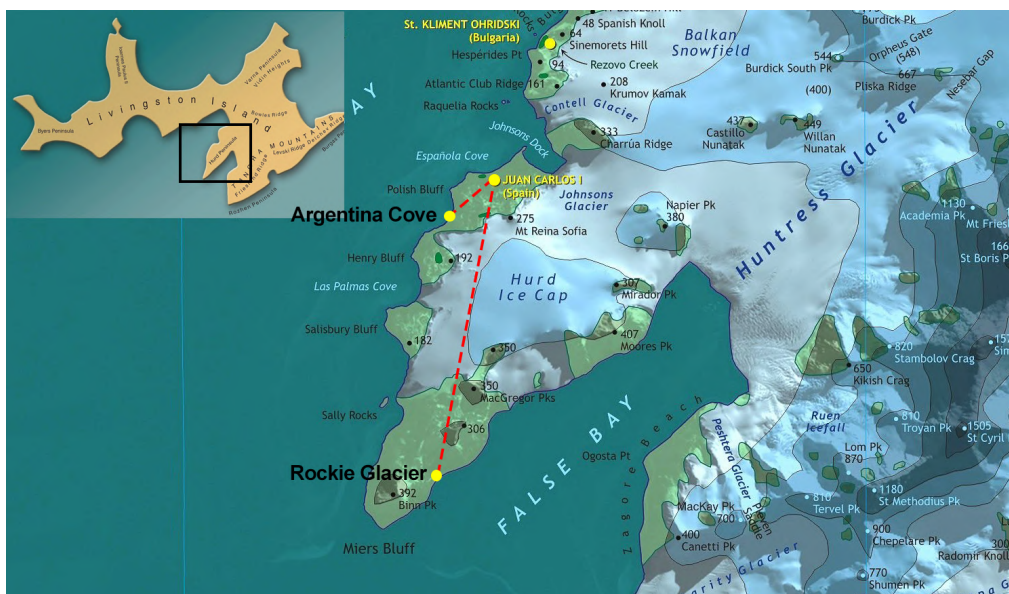


Figura 13: Distribución de nodos NVIS en la isla de Livingston. Se muestra las distintas ubicaciones donde se instalaron los nodos NVIS [\[2, 104, 105\]](#)

Además de tener la respuesta de los dos canales, el nodo situado en Caleta Argentina se ubicó estratégicamente para obtener también la señal recibida mediante propagación

por onda superficial. La recepción de la onda superficial proporcionó una referencia para calcular el camino de la onda rebotando en la ionosfera y poder así caracterizar las diferentes capas de la ionosfera [1, 2, 102, 106, 107] (estudio detallado en 4.3).



Figura 14: Instalación antena en Nodo Caleta Argentina. Nodo situado a 1km de la base [2]

### 5.1.2 Aplicación

Para aplicaciones y redes de comunicación para dispositivos IoT, existen dos factores clave que hay que tener en cuenta: un consumo mínimo con la mayor velocidad de transmisión de datos posible y la disminución del tamaño del dispositivo. La implementación de una red de comunicaciones alrededor de la Base Juan Carlos I se puede definir como un caso particular de los paradigmas de comunicación para dispositivos IoT [108]. En estos entornos tan hostiles, la necesidad de tener un bajo consumo, tolerancia a los retardos, seguridad y estabilidad de los sistemas es un punto clave.

La creación de esta red de comunicación adaptada para entornos remotos y dispositivos IoT permitirá a la comunidad de investigadores de la Antártica disponer de una alternativa al satélite. Muchos proyectos muestran necesidades de sondear parámetros de diferentes índoles y realizar la transmisión de sus datos durante las campañas antárticas con mayor frecuencia con el fin de facilitar la adquisición de estos datos y aumentar la cantidad de datos recogidos. Por otra parte, la posible instalación de esta red durante todo el año permitirá la monitorización de ciertos datos antárticos durante la campaña de verano e invierno desde cualquier parte del mundo. Aunque gran parte del esfuerzo en el diseño e investigación de esta tesis se centra en el entorno Antártico, este estudio define las comunicaciones en otros entornos del planeta con dificultades en las comunicaciones.

### 5.1.3 *Objetivos, observaciones y conclusiones de la campaña antártica*

- La estancia en la campaña antártica 2018-2019 tenía como principal objetivo la validación del diseño realizado entre el enlace Barcelona-Cambrils. Este, tenía el foco puesto en la validación de la estructura de comunicación en otra parte del planeta sin la necesidad de adaptar esta a las especificaciones de la ionosfera en ese entorno. En este, se puede observar que, a pesar del correcto funcionamiento de la plataforma, se recibían interferencias de las diferentes emisoras de radio de las bases cercanas y de barcos. Especialmente se observaban fuertes interferencias durante las horas de máxima propagación ionosférica que provocaron errores en las tramas de recepción, aunque fueron corregidos mediante software en el pos proceso.
- Las características del escenario proporcionaban el mejor entorno para validar la capacidad de comunicación de la plataforma al disponer de una ventaja principal, el bajo ruido ambiente. Este factor permitió analizar modulaciones de mayor orden, que hasta el momento no se podían entre el enlace Barcelona-Cambrils. Se pudo analizar con más facilidad los diferentes parámetros de la ionosfera (el análisis de las diferentes características de la ionosfera antártica no es caso de estudio de esta tesis). Este análisis se puede consultar en el trabajo realizado por *Josep M. Maso* en [109].
- Por otro lado, se buscaba demostrar el correcto funcionamiento de la plataforma en un escenario hostil y trabajando durante más de dos meses en unas características climáticas totalmente diferentes a las conocidas. El bajo ruido ambiente permitió optimizar el sistema de transmisión en tiempo real minimizando la potencia de transmisión de la plataforma.
- Se buscó realizar el análisis simultáneo en dos puntos diferentes de la ionosfera, uno en Caleta Argentina y otro en Glaciar Rocosó. A causa de la recepción de la onda superficial en el nodo de caleta argentina, no se pudieron aprovechar los datos para el análisis de las diferentes modulaciones. Por otra parte, la onda superficial permitió analizar con más precisión las variaciones del canal permitiendo detectar en que capa de la ionosfera y su altura se estaba rebotando, obteniendo resultados no esperados durante la campaña.
- Finalmente, se quería demostrar viabilidad de un sistema de comunicación Half-Duplex en tiempo real a través de la ionosfera, demostrando el correcto funcionamiento de la aplicación principal que se definió en la subvención *CTM2015-68902-R (MINECO/FEDER)*.

## 5.2 URUBAMBA

El trabajo realizado en esta tesis no solo se centra en una aplicación de comunicación de sensores en zonas remotas, sino que también permite realizar comunicaciones entre personas. Este proyecto ha permitido realizar un primer prototipo que permitiría validar la posibilidad del uso de las tecnologías NVIS en las comunidades alto andinas del Valle Sagrado de los Incas [3].



### 5.2.1 Aplicación

Este sistema permite a los usuarios enviar mensajes de texto e imágenes de baja resolución a través de la ionosfera y con un radio de cobertura de 250 km. Esta tecnología ofrecerá a las poblaciones de entornos rurales [110], que tienen dificultades para comunicarse y desplazarse a núcleos urbanos más grandes, una alternativa de comunicación con la que poder solicitar ayuda en caso de emergencias médicas, así como una herramienta para la educación o para cualquier necesidad de la población. El sistema basado en el estudio de esta tesis ofrece acceso a una tecnología de bajo coste ideal para entornos con pocos recursos económicos, lo cual favorece la educación y aporta una herramienta de *e-health*. En las figuras 15 podemos ver el sistema diseñado para este entorno. Este estudio se profundiza en el trabajo final de grado [111].

Para demostrar la viabilidad de las comunicaciones NVIS en las comunidades, se realizó la instalación de dos equipos transceptores con el fin de testarlos en otro tipo de entornos. Uno se instaló en la escuela de Urubamba, como núcleo urbano donde podrían cubrir y dar soporte a las necesidades de las comunidades. Se instaló otro punto en Pampallacta, una comunidad situada a más de 6 horas andando hasta el siguiente núcleo y con difícil acceso en vehículo.

La aplicación 16 se diseñó y se adaptó a las necesidades de comunicación para estos entornos. Este es un primer paso importante para fomentar programas educativos y acciones de salud electrónica en todo el Valle Sagrado de los Incas y en cualquier otro país en desarrollo. Las mejoras realizadas en el sistema, en la capa física y en el transceptor en tiempo real del trabajo de final de grado [112] permitirían aumentar considerablemente la capacidad de la red diseñada. Estas mejoras y avances en la tecnología permitirían, por otra parte, aportar una alternativa de comunicación estable para situaciones de emergencia en las que las redes actuales de comunicación se han visto saturadas o han caído por una emergencia natural o terrorismo.

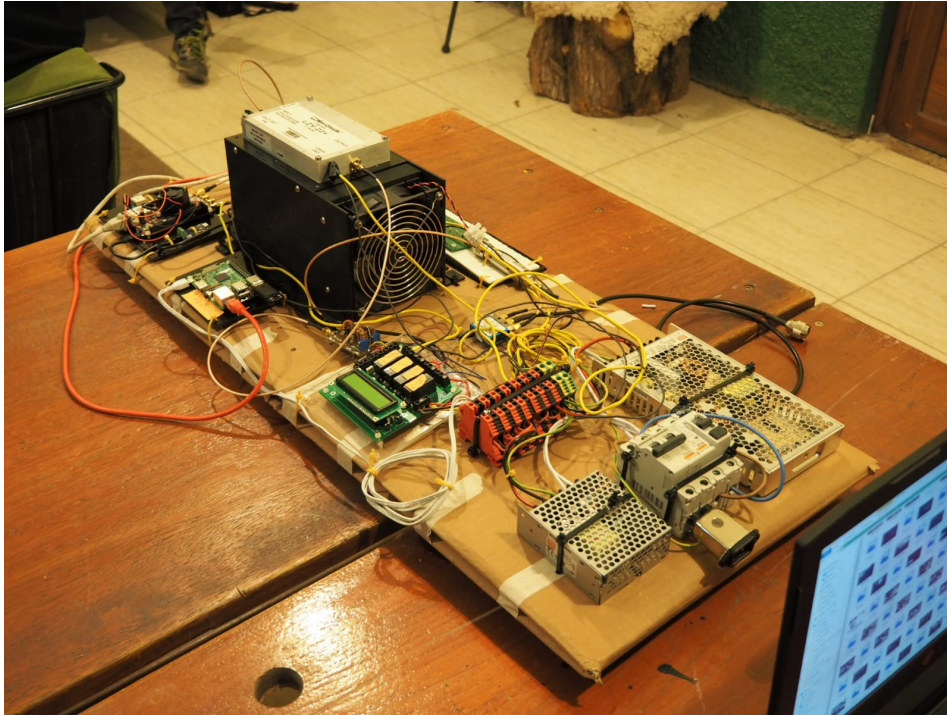
### 5.2.2 Objetivos y conclusiones

Una de las principales finalidades en la estancia en Urubamba fue el testeo de la plataforma de comunicación en tiempo real en un entorno hostil. Por otra parte, era una prueba piloto previa a la campaña antártica para demostrar tanto el funcionamiento de la plataforma, como la logística y versatilidad de la instalación del enlace ionosférico. Por otro lado, igual que en el caso de la Antártica, este estudio permitió demostrar el correcto funcionamiento de la plataforma diseñada aunque no se encuentre en el mismo punto del planeta tierra. Otro objetivo fue la demostración de las posibilidades de una tecnología de comunicación para entornos remotos sin la necesidad de disponer de un operador de telefonía y para entornos con pocos recursos para la instalación de una red de comunicación.

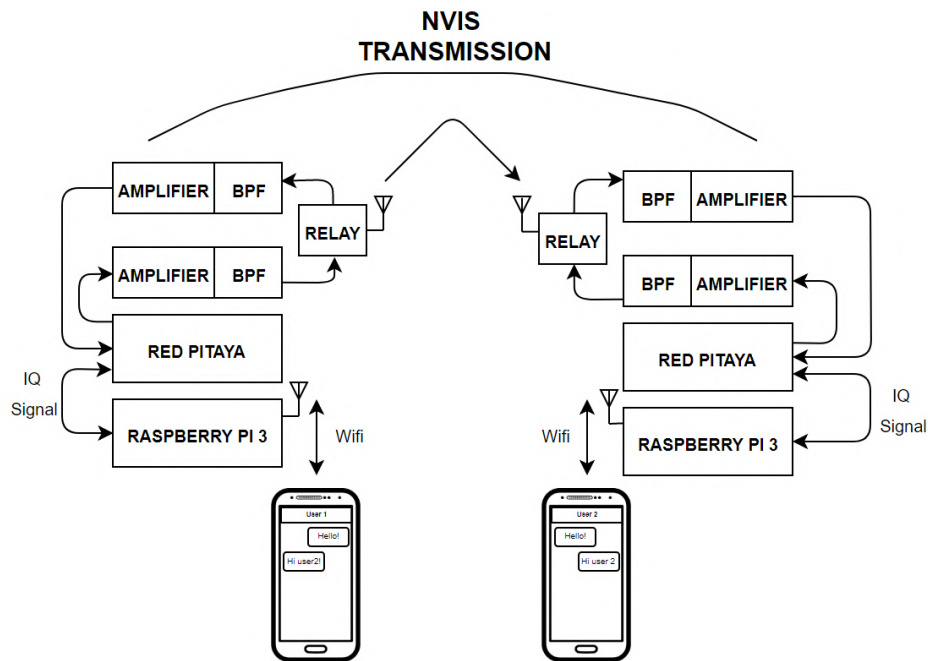
## 5.3 EMERGENCIAS

### 5.3.1 Descripción de la aplicación

A causa del cambio climático, las situaciones y climas extremos son cada vez más comunes y tienen graves consecuencias en las infraestructuras, las vidas humanas y



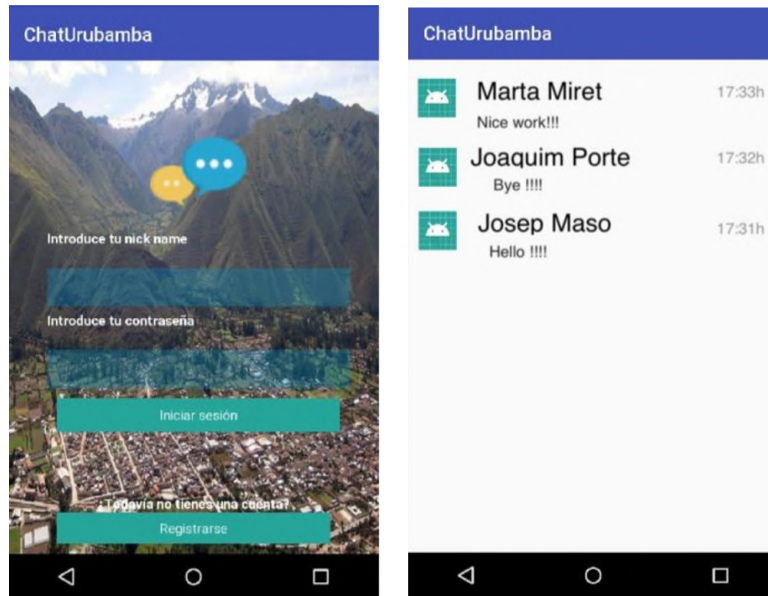
(a) Equipo instalado en Urubamba, Perú



(b) Esquema arquitectura transceptor. Se muestran los diferentes módulos usados para la implementación de la aplicación de mensajería.

Figura 15: Equipo transceptor Peru [3]. Se muestra el esquema diseñado para la implementación de la aplicación y la instalación del sistema

los recursos de un país [21–29, 113–116]. Por otra parte, el terrorismo es otro de los factores que provoca un estado de emergencia tanto para la sociedad como para las infraestructuras presentes en un territorio. En estas situaciones, las comunicaciones



(a) App: Log-In

(b) App: Conversaciones abiertas



(c) App: Conversación

Figura 16: Aplicación móvil mensajería Urubambau [111]. En estas imágenes se muestran las diferentes pantallas diseñadas para la aplicación de mensajería NVIS.

son un factor clave para disminuir el impacto de la tragedia, ya que permiten ofrecer una atención rápida en las primeras horas tras el desastre. La coordinación ágil de los primeros intervinientes (*first responders*) permite limitar gran parte de los males. Sin embargo, la mayoría de los sistemas de comunicación actuales no soportan tales catástrofes y dejan incomunicadas muchas zonas. En estas situaciones, las comunicaciones NVIS son un recurso muy útil gracias a su bajo coste y a la facilidad de instalación en lugares remotos. Esta tesis no solo ofrece una alternativa de comunicación en zonas remotas, sino también en zonas urbanas en las que los sistemas de comunicaciones habituales dejan de funcionar. La combinación de las redes



de NVIS diseñadas con otras redes WSN (*Wireless sensor network*) y su distribución por todo un territorio permitiría obtener un sistema de prevención de desastres, facilitar los trabajos de los *First Responders* y optimizar los recursos de rescate [117]. Finalmente, se ha realizado la petición de un proyecto europeo para *first responders* permitiendo de esta manera indagar mucho más en esta aplicación de las comunicaciones ionosféricas.

### 5.3.2 *Objetivos y conclusiones*

Para demostrar el correcto funcionamiento de esta, se ha realizado un estudio simulado de la viabilidad y las posibilidades de esta posible situación. Este estudio ha sido publicado en [118], en este se puede ver la capacidad de las comunicaciones en un entorno de emergencia resaltando la capacidad de la red interactuando con múltiples nodos remotos.

## PROPUESTA DE MERCADO, UNA ALTERNATIVA DE COMUNICACIÓN AL SATÉLITE

---

Uno de los pilares en una investigación es la validación de los resultados realizando publicaciones con un cierto impacto. El otro pilar es la transferencia de los conocimientos a la sociedad, asistiendo a conferencias divulgativas de ciencia o conferencias en escuelas, y la transferencia de los conocimientos a la empresa. Desde los últimos años, las instituciones de desarrollo científico están fomentando cada vez más la transferencia de conocimientos a las empresas. Gracias a esta apuesta por parte de las instituciones, y al fuerte crecimiento del nuevo concepto de PYME (pequeñas y medianas empresas) y de empresa emergente o *Start-Up's* [119], la validación de una nueva propuesta de un producto es más accesible. Este nuevo ecosistema brinda la oportunidad de desarrollar un estudio de mercado y validar una idea o una tecnología de una forma eficiente, tanto económicamente como en tiempo, basándose en la metodología *Lean Startup* [120].

Una vez finalizada la campaña antártica española 2019-2020 y con la motivación tras los resultados obtenidos, los investigadores Josep M. Masó y Joaquim Porté deciden emprender un camino para la validación de la tecnología desarrollada. Este camino tenía como fin validar si las hipótesis de necesidad son reales en el mercado. Gracias a la metodología *Lean Startup* y al programa de aceleración de start-ups llamado T-Launch [121] de la incubadora de empresas **Technova** de La Salle, la tecnología desarrollada en esta tesis se llevó a una validación de mercado.

Gracias a este programa, los resultados de esta tesis han sido validados no solamente con publicaciones científicas y conferencias, sino que, además, se ha validado la necesidad que resuelve y la solución que propone. En este capítulo se expone el proceso de validación de la tecnología en el mercado mediante la metodología de aprendizaje *Lean Startup*.

### 6.1 MARCO DE LA PROPUESTA DE NEGOCIO

Uno de los primeros pasos realizados para encaminar la validación de negocio fue la definición del cuadro en la que se creía que la tecnología podía tener cabida. Se propuso una primera versión:

*Cada año el número de dispositivos de Internet of Things (IOT) conectados crece de manera exponencial. Las redes que interconectan estos dispositivos son muy extensas, pero no tienen la capacidad de dar cobertura en todo el territorio. Este hecho viene dado cuando los dispositivos se encuentran en zonas muy alejadas de las redes de telecomunicaciones o zonas donde la orografía (como podrían ser zonas montañosas) no permiten la llegada de cobertura. En estos casos la ampliación de la red tiene unos costes económicos muy altos para construir la infraestructura y los recursos necesarios. Actualmente en el mercado encontramos como solución el uso de comunicaciones por satélite que tienen la capacidad de dar cobertura en estas zonas, aunque la utilización de estos servicios supone un coste elevado. Dada la situación, las posibilidades del IoT se ven totalmente afectadas, limitando su capacidad de alcance. Como*

*alternativa a la problemática y las soluciones actuales, se propone una red de comunicación de bajo coste para dispositivos IoT en zonas remotas utilizando tecnología NVIS (comunicación ionosférica). La principal característica de esta tecnología es la reflexión de las frecuencias usadas con la ionosfera, haciendo que la comunicación no requiera visión directa ante grandes obstáculos (a diferencia de todos los otros sistemas) y permita un alcance de cobertura de 250 km entre nodos. Dada la ubicación de los nodos remotos, el prototipo desarrollado está basado en un bajo consumo en energía para asegurar su autosuficiencia dotada de fuentes renovables. Dadas las características del sistema, esta solución podría dar cobertura a cualquier zona donde fuera necesaria la comunicación de dispositivos IoT. La utilización de esta tecnología en el ámbito IoT abriría las puertas a nuevas aplicaciones y mejoras de la red actual, dando más oportunidades y acceso a un sector actualmente en fuerte crecimiento. Esta herramienta de bajo coste permitiría dar pie a nuevas aplicaciones o mejorar las aplicaciones actuales donde el factor limitante sea el coste de la conexión por satélite. Finalmente, la necesidad identificada es la ausencia de una red de telecomunicaciones para dispositivos IoT en zonas sin cobertura de telecomunicaciones. Este hecho puede ser debido al elevado coste de hacer llegar las redes de comunicaciones a estas zonas dada la orografía como serían zonas montañosas, o bien porque la cobertura de telecomunicaciones queda atenuada a mucha larga distancia como serían las comunicaciones en alta mar 17. Este problema es un obstáculo para la posibilidad de monitorizar parámetros de riesgo e interés social como podrían ser: sensores de incendios forestales, monitorización de fauna en extinción, aplicaciones de IoT en ámbitos rurales, o bien la monitorización de parámetros relevantes del mar (presencia de microplásticos, meteorología, etc.).*

Tras un previo análisis del mercado y de la tecnología, se realizó la petición y la concesión de una subvención *Produkte* [122] con identificador IU68-017034-2019PROD00039 para poder continuar con la transferencia de conocimientos de la ciencia a la empresa. La solicitud de esta subvención se ha basado en este mismo capítulo de esta tesis doctoral.

## 6.2 CREAR, MEDIR, APRENDER Y PIVOTAR

La metodología Lean proporciona una herramienta ágil de aprendizaje. Este proceso se basa en la iteración de tres subprocesos que permiten desarrollar el modelo de negocio y el *Business model canvas* de forma conjunta con los posibles clientes. Estas iteraciones permiten transformar las ideas e hipótesis iniciales midiendo constantemente las reacciones de los diferentes mercados. Dicha metodología se basa, principalmente, en realizar entrevistas con los posibles clientes (Crear), interpretar el *feedback* de las entrevistas (Medir) y, por último, estudiar y aprender de ese *feedback* recibido (Aprender) qué cambios es necesario aplicar a la estrategia inicial. Este ciclo está continuamente rotando, lo cual permite pivotar tanto el funcionamiento técnico y las especificaciones del producto, como la estrategia de negocio. En definitiva, se pivota constantemente en todos los aspectos de un producto de mercado.

### 6.2.1 Metodología: análisis de los clientes y de la competencia

Se crearon las primeras hipótesis de mercado y de las necesidades de los posibles clientes que permitirían realizar el primer acercamiento y las primeras validaciones

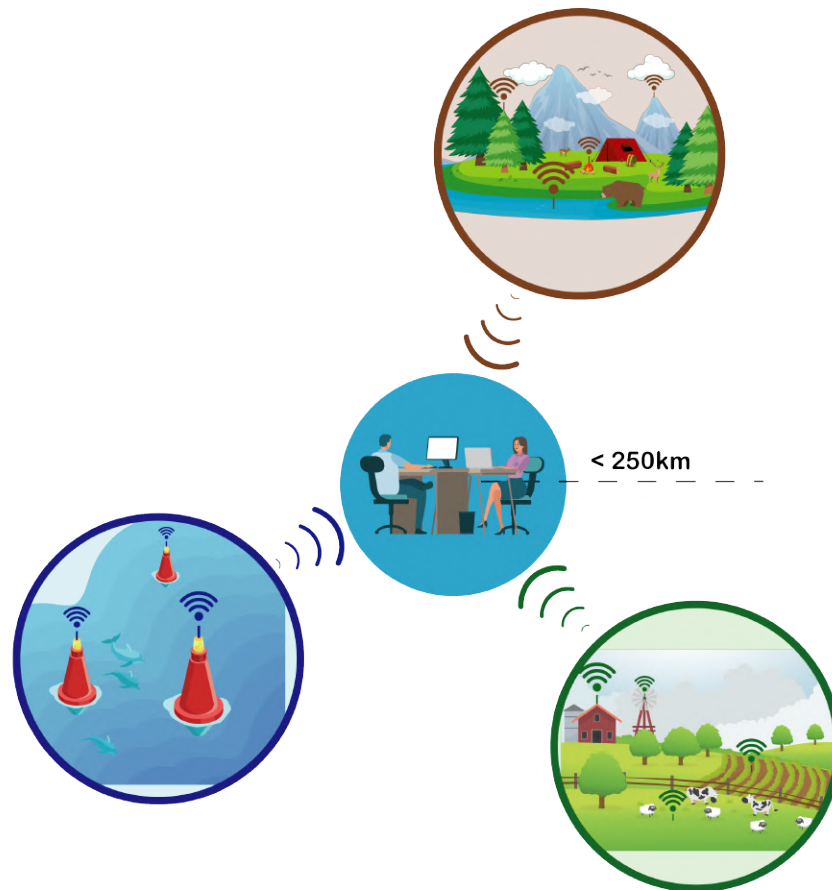


Figura 17: Representación de la solución IoT que permite el producto desarrollado. Se destacan las aplicaciones IoT en zonas marítimas, zonas montañosas y zonas agrícolas, principales sectores explorados

de nuestra tecnología. Con las primeras preguntas claras, la metodología se basaba en la validación activa de estas suposiciones realizando entrevistas diarias a posibles clientes. Aparte de las entrevistas, se aplicaron diversas técnicas digitales para acceder a los clientes y conocer sus necesidades: desde preguntas en foros y anuncios en *Google Ads* focalizados a un sector específico, hasta una *landing page*[123] 18 que permitiría captar la atención de los posibles clientes. Gracias a las entrevistas con los clientes y a los diferentes medios de acercamiento, se pudieron medir las respuestas y, por consiguiente, obtener respuestas a nuestras hipótesis. Todo ello permitió aprender activamente según dichas respuestas. Este proceso cíclico permitió conocer las necesidades del mercado y de los clientes pivotando constantemente la idea, el producto, la tecnología y el modelo de negocio.

#### 6.2.2 Resultados de la validación de mercado

En la figura 19 se muestra el *Business model canvas* desarrollada para la exploración del mercado. En este se destaca la propuesta de valor que aporta va la tecnología NVIS.

La propuesta de valor proporciona la posibilidad de la implantación de una red de sensores en zonas donde las redes de comunicaciones habituales no llegan, proporcionando una zona de 250km de cobertura sin la necesidad de visión directa y

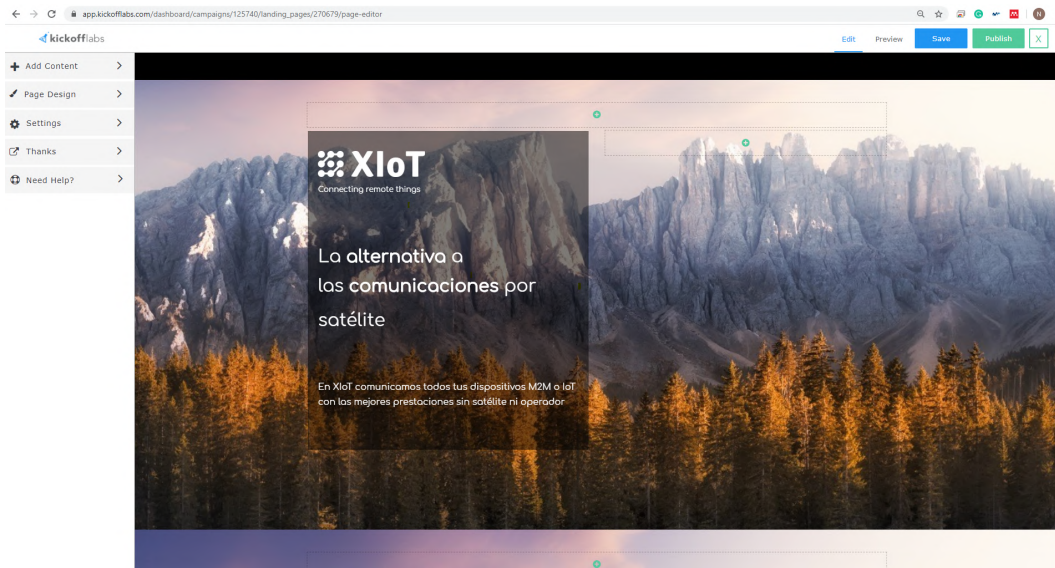


Figura 18: Landing page diseñada para el análisis *on-line* de los clientes potenciales. [123]

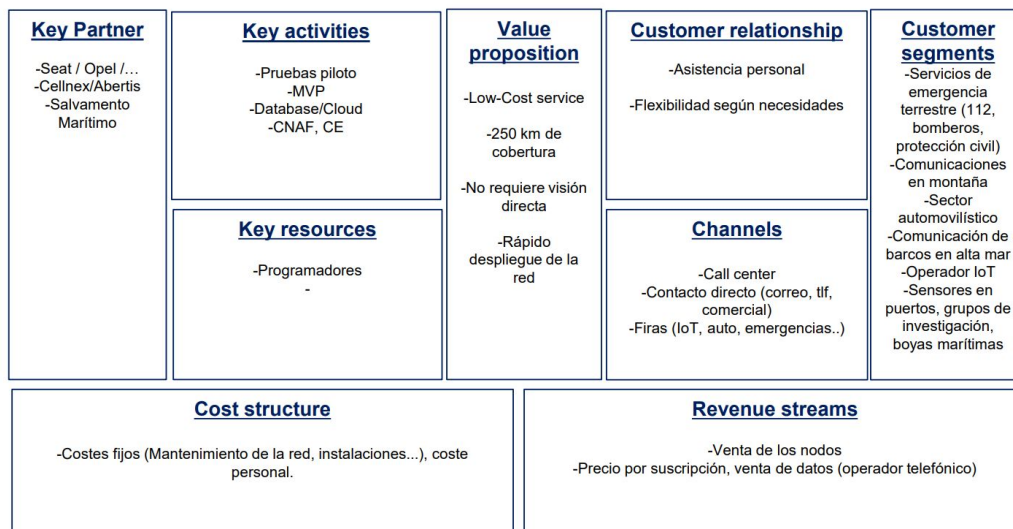


Figura 19: *Business model canvas* de la propuesta de *Spin-Off*. En esta se analizan los diferentes segmentos de clientes y todo lo necesario para realizar un modelo de negocio plenamente adaptado a sus necesidades.

de rápido despliegue. Por otra parte, se definen las hipótesis de mercado, que se creían más oportunas para la integración de nuestra tecnología. Principalmente se tuvieron en cuenta los servicios de emergencia, especialmente los servicios de salvamento en alta mar, las comunicaciones en zonas montañosas, comunicaciones IoT y finalmente la comunicación de boyas oceanográficas. Con el fin de analizar los posibles clientes y la viabilidad de la tecnología se realizaron una serie de entrevistas donde se destacan las siguientes que permitieron desmentir o confirmar hipótesis de mercado definidas en el *Business model canvas*:

- *Salvament Maritim*: En una primera instancia se analizó la posibilidad de integrar el sistema NVIS en los barcos que cruzan de Barcelona a las islas con el fin de

integrar un sistema de emergencias. Para la validación de este sector se realizó una entrevista con la directora de *Salvament Marítim* del puerto de Barcelona. En esta, nos desmintió una de las principales hipótesis en la falta de cobertura esta travesía.

- Centro de monitorización fauna y flora: Se realizó una entrevista con un centro *público* de monitorización de la fauna y la flora. En esta destacaron la necesidad de obtener una red IoT en una zona montañosa que ningún operador les proporcionaba. En esta, resultaron muy interesados en la propuesta que ofrecía XIoT permitiendo validar la necesidad de comunicar dispositivos IoT en zonas montañosas. La relación con esta entidad no resulto fructífera al tratarse de una entidad con pocos recursos económicos.
- Empresa de recreo marítimo: Con la finalidad de monitorizar los trayectos que realizaban los clientes con los barcos de alquiler de esta empresa, se interesaron con la propuesta de alternativa al satélite que XIoT proporcionaba.
- Pozos digitales: Tras realizar una reunión con la *Agencia Catalana del Aigua* destacaron la necesidad en la comunicación de contadores de pozos de agua situados en zonas montañosas. El actual sistema de comunicación que utilizan generaba muchos errores provocando lecturas erróneas de estos sistemas. Esta permitió abrir una nueva línea de investigación aportando un nuevo posible mercado a explorar.
- Operador IoT de última milla: Finalmente, un posible sector donde la tecnología NVIS tendría lugar es proporcionar un incremento de la cobertura de los operadores de redes IoT. Esta proporcionaría una infraestructura dedicada a las ubicaciones que a los operadores no les interesa hacer llegar sus redes a causa del alto coste económico y la baja demanda de comunicación.

### 6.2.3 Resultados análisis de la competencia

El sector de las telecomunicaciones es un sector que proporciona muchas alternativas de comunicación. Como es de suponer, uno de los principales aspectos que hay que tener en cuenta es la competencia. En este caso, la principal competencia es la comunicación por satélite, el fuerte crecimiento de las redes IoT y los módems de comunicación HF estándar. Por otra parte, se comparó con las redes actuales de comunicación como el 2G/3G/4G. En la tabla 6 se muestran las principales diferencias que muestra la competencia. Este análisis resultó muy positivo para las aspiraciones de la tecnología NVIS al únicamente encontrar rival en las comunicaciones por satélite. Las redes IoT ya instaladas en el territorio no permitían dar cobertura en zonas muy montañosas o bien en alta mar, al igual que las comunicaciones 2G/3G/4G. Estas principales desventajas destacaban las propuestas de valor de la tecnología NVIS. Al analizar la opción vía satélite nos dimos cuenta de que había alternativas con un coste muy bajo con las que no se podía competir, mientras que había otros sistemas de comunicación por satélite con costes muy elevados con los que sí se podía. El análisis de la competencia, de los diferentes mercados y del perfil de los posibles clientes nos permitió llegar a una conclusión sobre la viabilidad de entrada al mercado de nuestra tecnología.



Tabla 6: Comparativa de las tecnologías de comunicación que representan una competencia para el mercado NVIS.

Red de comunicación	Precio	Capacidad	BitRate	Distancia
XIoT	Bajo	Baja	Bajo	Larga
Satellite (Iridium, Immarsat. . .)	Medio	Media	Alto	Larga
VHF Radio	Medio	Baja	Alto Bit rate	Media
Sigfox, LoRa	Bajo	Alta	Bajo	Corta
3G, 4G	Bajo	Muy alta	Alto	Corta

### 6.3 CONCLUSIONES

El fuerte crecimiento y la continua bajada de costes de las comunicaciones a través de los satélites fue uno de los puntos más influyentes en la toma de decisiones para la continuidad de la salida al mercado de la tecnología. Se encontraron numerosas aplicaciones en las que la tecnología tenía cabida, aunque la gente no estaba dispuesta a pagar mucho dinero por el producto. Por otra parte, a las empresas con un poder económico más alto no les importaba pagar la suma de dinero que hiciera falta para tener una conexión por satélite. Teniendo en cuenta estos hechos y la previsión de que las redes por satélite crezcan con el proyecto *StarLink* [16, 17, 124, 125] de *SpaceX*, consideramos que se cerraba la puerta a tecnologías de comunicaciones remotas emergentes. El mercado que quedara disponible y la competencia que tendría la tecnología no permitirían tener un margen suficiente para poder competir con el satélite. Por otra parte, otra barrera de entrada es la antena del sistema. Sus dimensiones dificultan la instalación en ciertos espacios. Finalmente, esta tecnología, a priori, no tiene cabida en el mercado mayoritario de las telecomunicaciones, aunque sí que resuelve ciertas aplicaciones 5 y demuestra la necesidad de continuar investigando en este campo. Aunque no suponga una gran rentabilidad para el mercado, esta tecnología puede ser una gran solución para aplicaciones de bajo coste sin la intervención de un operador telefónico para los entornos estudiados.

## CONCLUSIONES Y LINEAS DE FUTURO

---

Como conclusiones generales de esta tesis, este capítulo se basa en las contribuciones aportadas para resolver una necesidad de comunicación en zonas remotas. Como objetivos principales, esta tesis buscaba definir una alternativa de comunicación en tres entornos muy diferenciados:

**Hipótesis 1:** *Un enlace de comunicación NVIS permitirá comunicar una red de sensores de bajo coste en la Antártica.*

**Hipótesis 2:** *Un enlace NVIS resulta una comunicación estable y muy económica para comunicaciones de emergencia en Urubamba, Perú, una zona con pocos recursos económicos.*

**Hipótesis 3:** *La tecnología NVIS es una solución adecuada para cubrir las necesidades de comunicaciones en una emergencia donde todas las redes han dejado de funcionar proporcionando un despliegue rápido y estabilidad de la red en el área de Cataluña*

Estos tres entornos de comunicación muestran características similares y presentan restricciones que limitan el diseño de una red de comunicaciones y dificultan el uso de las redes actuales. Los principales requisitos en el diseño de la red son el bajo coste económico, el bajo consumo en potencia del sistema para entornos remotos, o bien una alternativa que mejore el rendimiento de la red. Finalmente, la característica más importante es la necesidad de un sistema que no requiera tener visión directa para comunicar dos nodos.

El estudio, diseño e implementación de la red para estos entornos se basa en las comunicaciones ionosféricas. El estudio realizado pretende definir la mejor capa física para optimizar el uso de este canal. Las comunicaciones ionosféricas con incidencia casi vertical permiten comunicar hasta 250 km sin necesidad de visión directa, con lo que se presentan como una solución ideal para estos escenarios. En este capítulo se analizarán las conclusiones según la tipología de objetivos definidos en el capítulo 1, se diferencian las conclusiones de análisis y diseño capa física, de los objetivos para el diseño e implementación de la plataforma de comunicación.

### 7.1 CONCLUSIONES ANÁLISIS Y DISEÑO CAPA FÍSICA

Para poder diseñar la capa física, se creó un prototipo de transceptor digital que permitiera realizar el sondeo del canal ionosférico modificando todas las propiedades de la señal (frecuencia, modulación, ancho de banda, tiempos de trama...). Esto ha permitido realizar todos los test necesarios para llegar a una conclusión sobre la mejor configuración.

Para poder optimizar el esquema de transmisión, en primer lugar, se hizo un estudio de las características de canal NVIS. Esto nos llevó a la definición de unos tiempos de trama y unos mecanismos de sincronización temporal y frecuencial. A continuación, se



realizó una batería de pruebas en las que se variaba el tipo de modulación, el ancho de banda y la potencia de transmisión. Este estudio se basó en tres partes totalmente diferenciadas:

- Disponibilidad del canal: Para demostrar la viabilidad de un canal de comunicación, la disponibilidad del enlace es uno de los factores más importantes que hay que tener en cuenta. Por otra parte, la elección de la antena tiene un papel muy importante en el consumo de potencia de sistema, ya que puede aportar pérdidas en el enlace. El estudio ha demostrado que con una única antena V-Invertida y, por tanto, una única frecuencia, el canal ionosférico puede comunicar hasta 6 horas. Esto nos permite concluir que con una antena multi banda con 4 frecuencias (en vez de una antena de banda ancha con más pérdidas) podemos tener una disponibilidad del enlace alrededor del 100 % del tiempo.
- El consumo de potencia, uno de los factores más importantes en el diseño, viene limitado en mayor parte por la potencia de transmisión de la señal. El estudio ha permitido definir las mejores configuraciones según el entorno de comunicación. Para zonas urbanas y para la estructura de trama de la figura 5, la mejor configuración es una potencia de transmisión de alrededor de 10 W para una B-PSK, con la que se obtiene una velocidad de 2,3 ksps. Para entornos remotos y para la estructura de trama de la figura 9, la mejor configuración es una Q-PSK con una potencia de transmisión de únicamente 2 W con una velocidad de 4,6 ksps. Estos dos resultados muestran que las comunicaciones ionosféricas son una alternativa de muy bajo coste en potencia para realizar transmisiones de largo alcance. Por otra parte, demuestra que no es necesario tener un sistema con un alto coste económico para obtener un alto rendimiento de la red.
- Aparte del bajo consumo en potencia, se buscó maximizar el rendimiento de la plataforma modificando el ancho de banda de HF estándar. Este estudio ha permitido subir la velocidad de bit hasta 20 ksps para una potencia de transmisión de 24 W. Estos datos demuestran que el rendimiento del enlace NVIS puede ser mucho más alto aumentando de forma moderada el consumo en potencia de transmisión.

## 7.2 CONCLUSIONES DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIÓN

Con los resultados obtenidos durante todo el estudio y, finalmente, durante la antártica española 2018-2019, se implementó un transeptor en tiempo real que demuestra la viabilidad de la capa física diseñada para un enlace ionosférico de bajo coste. Por otra parte, verifica el correcto funcionamiento para entornos remotos donde no solo prima el bajo consumo energético, sino también un bajo coste económico de la plataforma de comunicación. Por último, este estudio no resuelve únicamente las necesidades de comunicación en entornos remotos, sino también en entornos donde las redes de comunicaciones actuales no se consideran viables a causa de su elevado coste. En la publicación [3] se muestra la viabilidad de las comunicaciones ionosféricas en estos entornos y en 5.2.

Por otra parte, esta tesis planteaba el diseño de una plataforma con múltiples funciones. Por un lado, permitía el sondeo del canal y el estudio de las modulaciones

óptimos, y por otro lado permitía la implementación del módem en tiempo real, validando así el correcto funcionamiento de la nueva capa física. La implementación del sistema en tiempo real apoyado por los estudios realizados permite validar las hipótesis iniciales para las diferentes aplicaciones. Esta plataforma aporta una alternativa de comunicación de bajo coste para los tres entornos de comunicación definidos.

Finalmente, no solo se ha validado la contribución de esta tesis con las publicaciones realizadas, sino que también se ha realizado un estudio de mercado para validar la viabilidad tecnológica y la oportunidad de mercado. Por lo tanto, las hipótesis formuladas en el inicio han sido demostradas tanto a nivel tecnológico como validando la necesidad real de la población beneficiada.

### 7.3 LINEAS DE FUTURO

Esta tesis corrobora el uso de la tecnología NVIS para redes de sensores en lugares remotos. Aunque la explotación comercial de esta tecnología queda en entredicho según el estudio comercial realizado, la viabilidad tecnológica queda ampliamente demostrada. Como puntos de mejora se visualizan tres caminos claramente diferenciados:

- OFDM vs QAM: Uno de los puntos débiles de las comunicaciones ionosféricas basadas en modulaciones de banda estrecha es el multitrayecto. A partir de un determinado nivel de multitrayecto, se produce un aumento considerable de los errores de bit debido a la interferencia entre símbolos (ISI). Para poder ecualizar correctamente sin la necesidad de disminuir de forma considerable la velocidad de bit, una posible solución contra la ISI es el uso de una modulación OFDM (*Orthogonal frequency division multiplexing*) diseñada específicamente para un enlace ionosférico. La comparativa entre las dos modulaciones permitiría saber si el aumento de la complejidad de la OFDM compensaría y mejoraría los resultados obtenidos en esta tesis.
- Dimensiones de la antena: Para la instalación tanto del transceptor en tiempo real como del sondeador, uno de los puntos que hay que tener en cuenta es la dimensión de la antena. A día de hoy, sus grandes dimensiones son un punto en contra de la viabilidad del sistema. El estudio en la miniaturización de antenas de HF aportaría más viabilidad al sistema para su instalación.
- Polarizaciones (SIMO-MIMO): Cuando una onda con polarización lineal incide en la ionosfera, se transforma en dos ondas: una con polarización circular a derechas y otra a izquierdas. Eso es debido a la birrefringencia provocada por el campo magnético terrestre. El uso de las dos componentes en la recepción permitiría obtener un mayor rendimiento del enlace, optimizando tanto la tasa de errores como la disminución de la potencia de transmisión necesaria o bien aumentando la capacidad del enlace. Este estudio permitiría mejorar muchas de las características analizadas en esta tesis.

La validación e investigación de estas posibles mejoras se realizará gracias al nuevo proyecto **ShetlandSouth, RTI2018-097066-B (MINECO/FEDER)** que se llevará a cabo del 2020 al 2023, y al **Producte** asignado en marzo del 2020 y con una duración de 18 meses con referencia 2019PROD00039.



## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Joaquim Porte, Josep M. Maso, Joan Lluís Pijoan, and David Badia. "Design, implementation, and test of an SDR for NVIS communications." In: *International Journal of Circuit Theory and Applications* 47.9 (Sept. 2019), pp. 1502–1512. ISSN: 0098-9886. DOI: [10.1002/cta.2670](https://doi.org/10.1002/cta.2670).
- [2] Joaquim Porte, Josep M. Maso, Joan Lluís Pijoan, and David Badia. "Sensing system for remote areas in Antarctica." In: *Radio Science* (2020), 2019RS006920. ISSN: 0048-6604. DOI: [10.1029/2019RS006920](https://doi.org/10.1029/2019RS006920). URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019RS006920>.
- [3] Joaquim Porte, Josep M. Maso, Joan Lluís Pijoan, Marta Miret, David Badia, and Jeevani Jayasinghe. "Education and e-health for developing countries using NVIS communications." In: *2018 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*. 2018, pp. 1–5. DOI: [10.1109/R10-HTC.2018.8629842](https://doi.org/10.1109/R10-HTC.2018.8629842).
- [4] Elbert Bechthum, Mohieddine El Soussi, Johan Dijkhuis, Paul Mateman, Gert-Jan van Schaik, Arjan Breeschoten, Yao-Hong Liu, Christian Bachmann, and Kathleen Philips. "A CMOS polar single-supply class-G SCPA for LTE NB-IoT and cat-M1." In: *2018-IEEE 44th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC)*. IEEE. 2018, pp. 30–33.
- [5] Kevin Ashton et al. "That 'internet of things' thing." In: *RFID journal* 22.7 (2009), pp. 97–114.
- [6] *Historia y evolucion del internet of thing*. URL: <https://www.recluit.com/historia-y-evolucion-del-internet-of-things/#.Xjy5hGgzZHE> (visited on 02/07/2020).
- [7] *Las redes más usadas en IoT (Sigfox, LoRa, NB-IoT, LTE Cat M)*. URL: <http://www.bcendon.com/las-redes-mas-usadas-en-el-iot/> (visited on 11/15/2019).
- [8] Mads Lauridsen, Huan Nguyen, Benny Vejlggaard, Istvan Z. Kovacs, Preben Mogensen, and Mads Sorensen. "Coverage Comparison of GPRS, NB-IoT, LoRa, and SigFox in a 7800 km<sup>2</sup> Area." In: *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. Sydney, NSW, Australia: IEEE, June 2017, pp. 1–5. ISBN: 978-1-5090-5932-4. DOI: [10.1109/VTCSpring.2017.8108182](https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2017.8108182). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8108182/>.
- [9] *Libelium - Connecting Sensors to the Cloud*. URL: <http://www.libelium.com/> (visited on 07/06/2018).
- [10] *IoT: number of connected devices worldwide 2012-2025 | Statista*. URL: <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/> (visited on 02/07/2020).

- [11] Jayavardhana Gubbi, Rajkumar Buyya, Slaven Marusic, and Marimuthu Palaniswami. "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions." In: *Future Generation Computer Systems* 29.7 (2013). Including Special sections: Cyber-enabled Distributed Computing for Ubiquitous Cloud and Network Services & Cloud Computing and Scientific Applications "Big Data, Scalable Analytics, and Beyond", pp. 1645–1660. ISSN: 0167-739X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X13000241>.
- [12] Isam Ishaq, David Carels, Girum Teklemariam, Jeroen Hoebeke, Floris Abeele, Eli Poorter, Ingrid Moerman, and Piet Demeester. *IETF Standardization in the Field of the Internet of Things (IoT): A Survey*. Vol. 2. 2. 2013, pp. 235–287. ISBN: 3293314899. DOI: [10.3390/jsan2020235](https://doi.org/10.3390/jsan2020235).
- [13] Mauro De Sanctis, Ernestina Cianca, Giuseppe Araniti, and Igor Bisio. "Satellite Communications Supporting Internet of Remote Things." In: *IEEE Internet of Things Journal* 3.1 (Feb. 2016), pp. 113–123. ISSN: 2372-2541. DOI: [10.1109/JIOT.2015.2487046](https://doi.org/10.1109/JIOT.2015.2487046).
- [14] Nathan Borges Gonasalves, Aline Pontes Lopes, Ricardo Dalagnol, Jin Wu, Davieliton Mesquita Pinho, and Bruce Walker Nelson. "Both near-surface and satellite remote sensing confirm drought legacy effect on tropical forest leaf phenology after 2015/2016 ENSO drought." In: *Remote Sensing of Environment* 237 (2020), p. 111489. ISSN: 0034-4257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111489>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425719305085>.
- [15] Gorry Fairhurst, Luca Caviglione, and Bernhard Collini-Nocker. "FIRST: Future Internet — a role for satellite technology." In: *2008 IEEE International Workshop on Satellite and Space Communications*. Oct. 2008, pp. 160–164. DOI: [10.1109/IWSSC.2008.4656774](https://doi.org/10.1109/IWSSC.2008.4656774).
- [16] *SpaceX just launched two of its space internet satellites — the first of nearly 12,000* - *The Verge*. URL: <https://www.theverge.com/2018/2/15/17016208/spacex-falcon-9-launch-starlink-microsat-2a-2b-paz-watch-live> (visited on 01/15/2020).
- [17] *Starlink: Cómo Elon Musk quiere conectar toda la Tierra a internet usando satélites*. URL: <https://hipertextual.com/2019/05/starlink-elon-musk-quiere-conectar-toda-tierra-internet-usando-satelites> (visited on 01/15/2020).
- [18] *MIL-188-110A*. URL: <http://www.wavecom.ch/content/ext/DecoderOnlineHelp/default.htm#!worddocuments/mil188110a.htm> (visited on 07/06/2018).
- [19] STANAG 4539. *North Atlantic Treaty Organization*. Tech. rep. URL: <https://www.rapidm.com/standard/stanag-4539/>.
- [20] John Proakis. *Digital communications*. McGraw-Hill, 1995, p. 928. ISBN: 0070517266.

- [21] Alexis Kwasinski, Fabio Andrade, Marcel J. Castro-Sitiriche, and Efrain O'Neill-Carrillo. "Hurricane Maria Effects on Puerto Rico Electric Power Infrastructure." In: *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal* 6.1 (Mar. 2019), pp. 85–94. ISSN: 2332-7707. DOI: [10.1109/JPETS.2019.2900293](https://doi.org/10.1109/JPETS.2019.2900293). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8644031/>.
- [22] Morten Wendelbo, | Federica, La China, Hannes Dekeyser, Leonardo Taccetti, Sebastiano Mori, Varun Aggarwal, Omar Alam, Ambra Savoldi, and Robert Zielonka. *The Crisis Response to the Nepal Earthquake: Lessons Learned*. Tech. rep. 2016. URL: [www.eias.org](http://www.eias.org).
- [23] Ron Austin, Peter Bull, and Shaun Buffery. "A Raspberry Pi Based Scalable Software Defined Network Infrastructure for Disaster Relief Communication." In: *2017 IEEE 5th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*. IEEE, Aug. 2017, pp. 265–271. ISBN: 978-1-5386-2074-8. DOI: [10.1109/FiCloud.2017.25](https://doi.org/10.1109/FiCloud.2017.25). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8114492/>.
- [24] PJ Wilkinson and DG Cole. "The role of Radio science in disaster management." In: *Commissions of the International Union of Radio Science Radio Science Bulletin* 335 (2010), pp. 45–51. DOI: [10.23919/URSIRSB.2010.7909400](https://doi.org/10.23919/URSIRSB.2010.7909400). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7909400/authors#authors>.
- [25] Patrick C. Smith and David M. Simpson. "Technology and Communications in an Urban Crisis: The Role of Mobile Communications Systems in Disasters." In: *Journal of Urban Technology* 16.1 (Apr. 2009), pp. 133–149. DOI: [10.1080/10630730903076494](https://doi.org/10.1080/10630730903076494). URL: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10630730903076494>.
- [26] Yasmin Jahir, Mohammed Atiquzzaman, Hazem Refai, Anirudh Paranjothi, and Peter G Lopresti. "Routing Protocols and Architecture for Disaster Area Network: A Survey." In: *Ad Hoc Networks* 82 (2019). DOI: [10.1016/j.adhoc.2018.08.005](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.08.005). URL: <https://www.researchgate.net/publication/326946745>.
- [27] Nor Aida Mahiddin and Nurul I.Sarkar. "An Efficient Gateway Routing Scheme for Disaster Recovery Scenario." In: *2019 International Conference on Information Networking (ICOIN)*. IEEE, Jan. 2019, pp. 204–209. ISBN: 978-1-5386-8350-7. DOI: [10.1109/ICOIN.2019.8718189](https://doi.org/10.1109/ICOIN.2019.8718189). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8718189/>.
- [28] Larysa Globa and Ievgen Volvach. "Mobile networks disaster recovery." In: *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*. IEEE, Feb. 2015, pp. 84–86. ISBN: 978-6-1760-7716-9. DOI: [10.1109/CADSM.2015.7230802](https://doi.org/10.1109/CADSM.2015.7230802). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7230802/>.
- [29] Ievgen Volvach and Larysa Globa. "Mobile networks disaster recovery using SDN-NFV." In: *2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*. IEEE, Sept. 2016, pp. 1–3. ISBN: 978-1-5090-4409-2. DOI: [10.1109/UkrMiCo.2016.7739648](https://doi.org/10.1109/UkrMiCo.2016.7739648). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7739648/>.
- [30] *HF 3000 | Thales Group*. URL: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/defence/hf-3000-skyfst> (visited on 10/24/2019).

- [31] R&S®M3SR Series4100 Software Defined Radios | System Components | Rohde & Schwarz. URL: [https://www.rohde-schwarz.com/es/producto/m3srseries4100-productos-secundarios{\\\_}63489-9903.html](https://www.rohde-schwarz.com/es/producto/m3srseries4100-productos-secundarios{\_}63489-9903.html) (visited on 10/24/2019).
- [32] Rosa Alsina-Pagès, Marcos Hervás, Ferran Orga, Joan Pijoan, David Badia, and David Altadill. "Physical Layer Definition for a Long-Haul HF Antarctica to Spain Radio Link." In: *Remote Sensing* 8.5 (May 2016), p. 380. ISSN: 2072-4292. DOI: 10.3390/rs8050380. URL: <http://www.mdpi.com/2072-4292/8/5/380>.
- [33] Carles Vilella, David Miralles, and Joan Lluís Pijoan. "An Antarctica-to-Spain HF ionospheric radio link: Sounding results." In: *Radio Science* 43.4 (Aug. 2008), n/a–n/a. ISSN: 00486604. DOI: 10.1029/2007RS003812. URL: <http://doi.wiley.com/10.1029/2007RS003812>.
- [34] Carles Vilella, David Miralles, David Altadill, F. Acosta, J. G. Solé, Josep Maria Torta, and Joan Lluís Pijoan. "Vertical and oblique ionospheric soundings over a very long multihop HF radio link from polar to midlatitudes: Results and relationships." In: *Radio Science* 44.2 (Apr. 2009), n/a–n/a. ISSN: 00486604. DOI: 10.1029/2008RS004001. URL: <http://doi.wiley.com/10.1029/2008RS004001>.
- [35] A. G. Ads, P. Bergadà, C. Vilella, J. R. Regué, J. L. Pijoan, R. Bardají, and J. Mauricio. In: *Radio Science* (). ISSN: 00486604. DOI: 10.1029/2012RS005074.
- [36] Marcos Hervás, Rosa Alsina-Pagès, Ferran Orga, David Altadill, Joan Pijoan, and David Badia. "Narrowband and Wideband Channel Sounding of an Antarctica to Spain Ionospheric Radio Link." In: *Remote Sensing* 7.9 (Sept. 2015), pp. 11712–11730. ISSN: 2072-4292. DOI: 10.3390/rs70911712. URL: <http://www.mdpi.com/2072-4292/7/9/11712>.
- [37] John Martin Wilson. "A LOW POWER HF COMMUNICATION SYSTEM." PhD thesis. Manchester: University of Manchester, 2011, p. 246.
- [38] Huihui Wang. "The study of multi-hop HF radio propagation." In: *2019 2nd International Conference on Information Systems and Computer Aided Education, ICISCAE 2019*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019, pp. 521–528. ISBN: 9781728130668. DOI: 10.1109/ICISCAE48440.2019.221688.
- [39] Q. Guo, Y. Zheng, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, and V. T. Rozumenko. "Passive HF doppler radar for oblique-incidence ionospheric sounding." In: *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019 - Proceedings*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019, pp. 88–93. ISBN: 9781728138824. DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879807.
- [40] M. Deumal, C. Vilella, J.C. Socoro, R.M. Alsina, and J.L. Pijoan. "A DS-SS signaling based system proposal for low SNR HF digital communications." In: *10th IET International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques (IRST 2006)*. Vol. 2006. IEE, 2006, pp. 128–132. ISBN: 0 86341 659 4. DOI: 10.1049/cp:20060251. URL: [http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp\\_20060251](http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp_20060251).
- [41] M. Hervás, J.L. Pijoan, R.M. Alsina-Pagès, M. Salvador, and D. Badia. "Single-carrier frequency domain equalisation proposal for very long haul HF radio links." In: *Electronics Letters* 50.17 (Aug. 2014), pp. 1252–1254. ISSN: 0013-5194. DOI: 10.1049/el.2014.1184. URL: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el.2014.1184>.



- [42] P. Bergadà, R. M. Alsina-Pagès, J. L. Pijoan, M. Salvador, J. R. Regué, D. Badia, and S. Graells. "Digital transmission techniques for a long haul HF link: DSSS versus OFDM." In: *Radio Science* 49.7 (July 2014), pp. 518–530. ISSN: 00486604. DOI: [10.1002/2013RS005203](https://doi.org/10.1002/2013RS005203). URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/2013RS005203>.
- [43] Pau Bergadà, Marc Deumal, Carles Vilella, Joan Regué, David Altadill, and Santi Marsal. "Remote Sensing and Skywave Digital Communication from Antarctica." In: *Sensors* 9.12 (Dec. 2009), pp. 10136–10157. ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s91210136](https://doi.org/10.3390/s91210136). URL: <http://www.mdpi.com/1424-8220/9/12/10136>.
- [44] M. Hervás, R. M. Alsina-Pagès, J. L. Pijoan, M. Salvador, and D. Badia. "Advanced modulation schemes for an Antarctic Long Haul HF Link Performance comparison between SC-FDE, OFDMA and SC-FDMA in a hostile environment." In: *Telecommunication Systems* 62.4 (Aug. 2016), pp. 757–770. ISSN: 1018-4864. DOI: [10.1007/s11235-015-0110-x](https://doi.org/10.1007/s11235-015-0110-x). URL: <http://link.springer.com/10.1007/s11235-015-0110-x>.
- [45] Matthew J. Angling, Paul S. Cannon, Nigel C. Davies, Tricia J. Willink, Vivianne Jodalen, and Bengt Lundborg. "Measurements of Doppler and multipath spread on oblique high-latitude HF paths and their use in characterizing data modem performance." In: *Radio Science* 33.1 (Jan. 1998), pp. 97–107. DOI: [10.1029/97RS02206](https://doi.org/10.1029/97RS02206). URL: <http://doi.wiley.com/10.1029/97RS02206>.
- [46] N C Davies, T J Willink, M J Angling, and P S Cannon. "Initial Results from WHISPER; a Wideband HF Ionospheric Sounder for Propagation Environment Research." In: 2001. URL: <https://researchportal.bath.ac.uk/en/publications/initial-results-from-whisper-a-wideband-hf-ionospheric-sounder-fo>.
- [47] *Solar Cycle progression | Solar activity | SpaceWeatherLive.com*. URL: <https://www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/solar-cycle> (visited on 07/06/2018).
- [48] R. M. Alsina-Pagès, M. Hervás, D. Altadill, J. Calduch, and E. Blanch. "Vertical and oblique ionospheric soundings performance comparison over the 12,760 km transequatorial HF link between Antarctica and Spain." In: *Radio Science* 52.4 (Apr. 2017), pp. 498–510. DOI: [10.1002/2016RS006232](https://doi.org/10.1002/2016RS006232). URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/2016RS006232>.
- [49] A. G. Ads, P. Bergadà, J. R. Regué, R. M. Alsina-Pagès, J. L. Pijoan, D. Altadill, D. Badia, and S. Graells. "Vertical and oblique ionospheric soundings over the long haul HF link between Antarctica and Spain." In: *Radio Science* 50.9 (Sept. 2015), pp. 916–930. DOI: [10.1002/2015RS005773](https://doi.org/10.1002/2015RS005773). URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/2015RS005773>.
- [50] Ben A. Witvliet and Rosa Ma Alsina-Pagès. "Radio communication via Near Vertical Incidence Skywave propagation: an overview." In: *Telecommunication Systems* 66.2 (Oct. 2017), pp. 295–309. ISSN: 1018-4864. DOI: [10.1007/s11235-017-0287-2](https://doi.org/10.1007/s11235-017-0287-2). URL: <http://link.springer.com/10.1007/s11235-017-0287-2>.



- [51] Ben A Witvliet, Albert J Westenberg, Erik van Maanen, George J Petersen, Mark J Bentum, Cornelis H Slump, and Roel Schiphorst. *Abstract submitted 2014-Oct-31 Near Vertical Incidence Skywave (NVIS) Antenna and Propagation Research in The Netherlands*. Tech. rep. 2014. URL: <https://research.utwente.nl/en/publications/near-vertical-incidence-skywave-nvis-antenna-and-propagation-rese>.
- [52] Marcus C. Walden. "High-Frequency Near Vertical Incidence Skywave Propagation: Findings associated with the 5 MHz Experiment." In: *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 58.6 (2016), pp. 16–28. ISSN: 10459243. DOI: [10.1109/MAP.2016.2609798](https://doi.org/10.1109/MAP.2016.2609798).
- [53] Sarah Lasroma Manalu, Gamantyo Hendrantoro, and Achmad Mauludiyanto. "Design of measurement system for HF MIMO NVIS channel." In: *Proceedings - 2017 4th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering, ICITACEE 2017*. Vol. 2018-January. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017, pp. 300–305. ISBN: 9781538639467. DOI: [10.1109/ICITACEE.2017.8257722](https://doi.org/10.1109/ICITACEE.2017.8257722).
- [54] Ben A. Witvliet, Erik van Maanen, George J. Petersen, Albert J. Westenberg, Mark J. Bentum, Cornelis H. Slump, and Roel Schiphorst. "Near Vertical Incidence Skywave Propagation: Elevation Angles and Optimum Antenna Height for Horizontal Dipole Antennas." In: *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 57.1 (Feb. 2015), pp. 129–146. ISSN: 1045-9243. DOI: [10.1109/MAP.2015.2397071](https://doi.org/10.1109/MAP.2015.2397071). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7047674/>.
- [55] B.A. Witvliet. "Near vertical incidence skywave." PhD thesis. Enschede, The Netherlands: University of Twente, Dec. 2015. ISBN: 9789036539388. DOI: [10.3990/1.9789036539388](https://doi.org/10.3990/1.9789036539388).
- [56] M. Hervás, J. L. Pijoan, R. M. Alsina-Pagès, M. Salvador, and D. Altadill. "Channel sounding and polarization diversity for the NVIS channel." In: *Proceedings Nordich HF conference* August (2013).
- [57] Ben A. Witvliet, Erik Van Maanen, George J. Petersen, Albert J. Westenberg, Mark J. Bentum, Cornelis H. Slump, and Roel Schiphorst. "Measuring the Isolation of the Circularly Polarized Characteristic Waves in NVIS Propagation [Measurements Corner]." In: *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 57.3 (2015), pp. 120–145. ISSN: 15584143. DOI: [10.1109/MAP.2015.2445633](https://doi.org/10.1109/MAP.2015.2445633).
- [58] Paul Bechet, Simona Miclaus, Antoniu Miclaus, and Cornel Balint. "Experimental analysis of noise level and channels availability for high frequency OFDM data transmission in NVIS propagation conditions." In: *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Vol. 2016-November. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016, pp. 844–849. ISBN: 9781509014163. DOI: [10.1109/EMCEurope.2016.7739206](https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2016.7739206).
- [59] N. V. Ryabova, D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, and A. A. Elsukov. "Processing Multicarrier Phase Coded Signals with OFDM on the USRP Platform for NVIS Sounding of HF Radio Channels." In: *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2020*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. ISBN: 9781728160726. DOI: [10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166059](https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166059).

- [60] Hung Yi Lo, James S. Lehnert, and Phuong Tran. "Performance analysis for HF communication with dominant noise source." In: *2018 IEEE 39th Sarnoff Symposium, Sarnoff 2018*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. ISBN: 9781538661543. DOI: [10.1109/SARNOF.2018.8720461](https://doi.org/10.1109/SARNOF.2018.8720461).
- [61] MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico - MATLAB & Simulink. URL: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html> (visited on 01/29/2020).
- [62] Global AI semiconductor market size 2017-2022 | Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/947057/ai-semiconductor-market-size-in-the-us/> (visited on 01/20/2020).
- [63] Global AI-driven hardware market by category 2018-2025 | Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/1003895/worldwide-artificial-intelligence-hardware-market-revenues/> (visited on 01/20/2020).
- [64] MYS-7Z020-C-S MYIR | Mouser Spain. URL: [https://www.mouser.es/ProductDetail/MYIR/MYS-7Z020-C-S?q\\_s=lc20%252BfHJVPVYkfw1p0BT4UA%3D%3D](https://www.mouser.es/ProductDetail/MYIR/MYS-7Z020-C-S?q_s=lc20%252BfHJVPVYkfw1p0BT4UA%3D%3D) (visited on 01/20/2020).
- [65] AD-FMCDQAQ2-EBZ User Guide [Analog Devices Wiki]. URL: <https://wiki.analog.com/resources/eval/user-guides/ad-fmcdaq2-ebz?s%5B%5D=fmcdaq2> (visited on 01/20/2020).
- [66] AD-FMCJESDADC1-EBZ Evaluation Board | Analog Devices. URL: <https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/Eval-AD-FMCJESDADC1-EBZ.html#eb-overview> (visited on 01/20/2020).
- [67] Xilinx Zynq-7000 SoC ZC706 Evaluation Kit. URL: <https://www.xilinx.com/products/boards-and-kits/ek-z7-zc706-g.html> (visited on 01/20/2020).
- [68] Xilinx Zynq-7000 SoC ZC702 Evaluation Kit. URL: <https://www.xilinx.com/products/boards-and-kits/ek-z7-zc702-g.html> (visited on 01/20/2020).
- [69] Red Pitaya. URL: <https://www.redpitaya.com/> (visited on 06/04/2019).
- [70] Xilinx and Inc. *Zynq-7000 SoC First Generation Architecture*. Tech. rep. 2012. URL: [www.xilinx.com](http://www.xilinx.com).
- [71] Cortex-A9 - an overview | ScienceDirect Topics. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/cortex-a9> (visited on 01/21/2020).
- [72] Joaquim Porte Jiménez. *Desenvolupament d'una plataforma de baix cost per a sensors remots amb tecnologia NVIS*. Barcelona : Universitat Ramon Llull, 2017, 1 recurs en línia (90 pàgines). URL: [http://ccuc.csuc.cat/record=b6998252~-}S23\\*cat](http://ccuc.csuc.cat/record=b6998252~-}S23*cat).
- [73] Ravi Kishore Kodali, Lakshmi Bopppana, and Seetarami Reddy Kondapalli. "DDC and DUC filters in SDR platforms." In: *2013 15th International Conference on Advanced Computing Technologies (ICACT)*. Rajampet, India: IEEE, Sept. 2013, pp. 1–6. ISBN: 978-1-4673-2818-0. DOI: [10.1109/ICACT.2013.6710526](https://doi.org/10.1109/ICACT.2013.6710526). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6710526/>.
- [74] DUC/DDC Compiler. URL: [https://www.xilinx.com/products/intellectual-property/duc\\_ddc\\_compiler.html](https://www.xilinx.com/products/intellectual-property/duc_ddc_compiler.html) (visited on 01/21/2020).

- [75] Devarpita Sinha and Sanjay Kumar. "FIR filter compensator for CIC filter suitable for software defined radio." In: *IEEE WCTFTR 2016 - Proceedings of 2016 World Conference on Futuristic Trends in Research and Innovation for Social Welfare*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. ISBN: 9781467392143. DOI: [10.1109/STARTUP.2016.7583915](https://doi.org/10.1109/STARTUP.2016.7583915).
- [76] V. Elamaran, R. Vaishnavi, A. Maxel Rozario, Slitta Maria Joseph, and Aylwin Cherian. "CIC for decimation and interpolation using Xilinx system generator." In: *International Conference on Communication and Signal Processing, ICCSP 2013 - Proceedings*. 2013, pp. 622–626. ISBN: 9781467348669. DOI: [10.1109/iccsp.2013.6577129](https://doi.org/10.1109/iccsp.2013.6577129).
- [77] Sherin A. Thomas and K. Anusudha. "Comparative analysis for various parametric attributes for an optimized DUC/DDC." In: *Proceedings of the International Conference on Inventive Computing and Informatics, ICICI 2017*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018, pp. 206–209. ISBN: 9781538640319. DOI: [10.1109/ICICI.2017.8365339](https://doi.org/10.1109/ICICI.2017.8365339).
- [78] Y. N. Santhosh, Namita Palacha, and Cyril Prasanna Raj. "Design and VLSI implementation of interpolators/decimators for DUC/DDC." In: *Proceedings - 3rd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, ICETET 2010*. 2010, pp. 755–759. ISBN: 9780769542461. DOI: [10.1109/ICETET.2010.72](https://doi.org/10.1109/ICETET.2010.72).
- [79] Xilinx and Inc. *XAPP1018, Designing Efficient Wireless Digital Up and Down Converters Leveraging CORE Generator and System Generator*. Tech. rep. 2007. URL: [www.xilinx.com](http://www.xilinx.com).
- [80] *Digital Up and Down Conversion for Family Radio Service - MATLAB & Simulink - MathWorks España*. URL: <https://es.mathworks.com/help/dsp/examples/digital-up-and-down-conversion-for-family-radio-service.html> (visited on 01/21/2020).
- [81] *Designing Digital Down Conversion Systems Using CIC and FIR Filters*. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/programmable/support/support-resources/design-examples/intellectual-property/dsp/exm-digital-down-conv-cic-fir.html> (visited on 01/21/2020).
- [82] Xilinx and Inc. *Xilinx XAPP1113 Designing Efficient Digital Up and Down Converters for Narrowband Systems, Application Note*. Tech. rep. 2008. URL: [www.xilinx.com](http://www.xilinx.com).
- [83] J Porte, J. L. Pijoan, J. M. Masó, D Badia, A Zaballos, and R. M Alsina-Pagès. "Advanced HF communications for remote sensors in Antarctica." In: *Antartica - A Key To Global Change*. 1st. IntechOpen, 2019.
- [84] Bonn Elektronik. *Bonn Elektronik Power amplifier 9kHz-40Ghz*. URL: <https://allice.de/wp-content/uploads/2017/03/Bonn-Katalog-Web.pdf>.
- [85] Joaquim Porte. "[TFG]: Estudi canal comunicació NVIS Barcelona - Cambrils." Barcelona, 2016, p. 82. URL: [https://esecretary.salle.url.edu/zona\\_autentica/memoriesTFC/10360\\_GK\\_2016.pdf](https://esecretary.salle.url.edu/zona_autentica/memoriesTFC/10360_GK_2016.pdf).

- [86] Maxim Ignatenko and Dejan S. Filipovic. "On the Design of Vehicular Electrically Small Antennas for NVIS Communications." In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 64.6 (June 2016), pp. 2136–2145. DOI: [10.1109/TAP.2016.2547018](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2547018). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7442093/>.
- [87] F. Orga, M. Hervas, and R. M. Alsina-Pages. "Flexible Low-Cost SDR Platform for HF Communications: Near vertical incidence skywave preliminary results." In: *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 58.6 (2016), pp. 49–56. ISSN: 1558-4143. DOI: [10.1109/MAP.2016.2609800](https://doi.org/10.1109/MAP.2016.2609800).
- [88] LDI, Lowell Digisonde International (*Digisonde.com*). URL: <http://digisonde.com/> (visited on 01/30/2020).
- [89] Michael Pezzopane and Carlo Scotto. "Automatic scaling of critical frequency foF2 and MUF(3000)F2: A comparison between autoscala and artist 4.5 on rome data." In: *Radio Science* 42.4 (2007). ISSN: 00486604. DOI: [10.1029/2006RS003581](https://doi.org/10.1029/2006RS003581).
- [90] Chunhua Jiang, Guobin Yang, Zhengyu Zhao, Yuannong Zhang, Peng Zhu, and Hengqing Sun. "An automatic scaling technique for obtaining F2 parameters and F1 critical frequency from vertical incidence ionograms." In: *Radio Science* 48.6 (2013), pp. 739–751. ISSN: 00486604. DOI: [10.1002/2013RS005223](https://doi.org/10.1002/2013RS005223). URL: <https://doi.org/10.1002/2013RS005223>.
- [91] Marco Pietrella and Loredana Perrone. "Instantaneous space-weighted ionospheric regional model for instantaneous mapping of the critical frequency of the F2 layer in the European region." In: *Radio Science* 40.1 (2005), n/a–n/a. ISSN: 00486604. DOI: [10.1029/2003RS003008](https://doi.org/10.1029/2003RS003008). URL: <http://doi.wiley.com/10.1029/2003RS003008>.
- [92] MIL-STD-188-110D. "DEPARTMENT OF DEFENSE INTERFACE STANDARD: INTEROPERABILITY AND PERFORMANCE STANDARDS FOR DATA MODEMS." In: (2017). URL: [http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0100-0299/MIL-STD-188-110D\\_55856/](http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0100-0299/MIL-STD-188-110D_55856/).
- [93] MIL-STD-188-110B. *DEPARTMENT OF DEFENSE INTERFACE STANDARD INTEROPERABILITY AND PERFORMANCE STANDARDS FOR DATA MODEMS*. Tech. rep. 2000.
- [94] Solomon W. Golomb. "Shift register sequences - A retrospective account." In: *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Vol. 4086 LNCS. Springer Verlag, 2006, pp. 1–4. ISBN: 3540445234. DOI: [10.1007/11863854\\_1](https://doi.org/10.1007/11863854_1). URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/11863854\\_{\\\_}1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/11863854_{\_}1).
- [95] Kenneth Davies. *Ionospheric Radio*. The Institution of Engineering and Technology, Michael Faraday House, Six Hills Way, Stevenage SG1 2AY, UK: IET, Jan. 1990. ISBN: 9780863411861. DOI: [10.1049/PBEW031E](https://doi.org/10.1049/PBEW031E). URL: <http://digital-library.theiet.org/content/books/ew/pbew031e>.
- [96] John K. Walker and V. P. Bhatnagar. "Ionospheric absorption, typical ionization, conductivity, and possible synoptic heating parameters in the upper atmosphere." In: *Journal of Geophysical Research* 94.A4 (1989), p. 3713. ISSN: 0148-0227. DOI: [10.1029/ja094ia04p03713](https://doi.org/10.1029/ja094ia04p03713).
- [97] L. F. McNamara. *Radio amateurs guide to the ionosphere*. Krieger Pub, 1994, p. 166. ISBN: 0894648047.

- [98] J. K. (John Keith) Hargreaves. *The solar-terrestrial environment : an introduction to geospace—the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere, and magnetosphere*. Cambridge University Press, 1992, p. 420. ISBN: 0521427371.
- [99] Raymond Wang, Nihar Jindal, Thomas Bruns, Ahmad R.S. Bahai, and Donald C. Cox. “Comparing RLS and LMS adaptive equalizers for nonstationary wireless channels in mobile ad hoc networks.” In: *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*. Vol. 3. 2002, pp. 1131–1135. ISBN: 0780375890. DOI: [10.1109/PIMRC.2002.1045204](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2002.1045204).
- [100] Ferran Orga, Marcos Hervás, and Rosa Ma Alsina-Pages. “Flexible Low-Cost SDR Platform for HF Communications: Near vertical incidence skywave preliminary results.” In: *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 58.6 (Dec. 2016), pp. 49–56. DOI: [10.1109/MAP.2016.2609800](https://doi.org/10.1109/MAP.2016.2609800). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7605405/>.
- [101] S. Antoniou, L. Christofi, P.R. Green, and G.F. Gott. “High rate data transmission in the mid-latitude NVIS HF channel.” In: *IEE Proceedings - Communications* 153.2 (2006), p. 272. ISSN: 13502425. DOI: [10.1049/ip-com:20050124](https://doi.org/10.1049/ip-com:20050124). URL: [https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-com\\_20050124](https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-com_20050124).
- [102] J. M. Maso. “[TFM]: Estudio de modulaciones digitales de baja potencia y anchos de banda variable en la Antártida.” PhD thesis. LaSalle Ramon Llull, 2019, p. 97.
- [103] AEMET. *Jornada sobre las actividades de AEMET en la Antártida - State Meteorological Agency - AEMET - Spanish Government*. 2019. URL: [http://www.aemet.es/en/noticias/2019/02/jornada\\_antartida](http://www.aemet.es/en/noticias/2019/02/jornada_antartida) (visited on 06/04/2019).
- [104] *Low-Island-location-map - Low Island (South Shetland Islands) - Wikipedia*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Low\\_Island\\_\(South\\_Shetland\\_Islands\)#/media/File:Low-Island-location-map.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Low_Island_(South_Shetland_Islands)#/media/File:Low-Island-location-map.png) (visited on 05/03/2019).
- [105] *Livingston-Greenwich-map-no-photos.jpg (7824×3164)*. URL: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ea/Livingston-Greenwich-map-no-photos.jpg> (visited on 05/03/2019).
- [106] Josep M. Masó. “[TFG]: Modulaciones para sensores remotos con tecnología NVIS.” PhD thesis, p. 88.
- [107] J. Porte, J. L. Pijoan, J. M. Masó, D. Badia, A. Zaballos, and R. M. Alsina-Pagès. “Advanced HF communications for remote sensors in Antarctica.” In: *Antartica - A Key To Global Change*. 1st. IntechOpen, 2019.
- [108] Josep Maso, Joaquim Porte, Joan Lluís Pijoan, and David Badia. “Internet of things communications for remote sensors in Antarctica using NVIS.” In: *HF Nordic*. Fårö, Sweden, 2019.
- [109] Josep M. Maso, Joaquim Porte, Joan L. Pijoan, and David Badia. “Study of NVIS Channel for USN Protocol Definition in Antarctica.” In: *Electronics* 9.6 (2020), p. 1037. ISSN: 2079-9292. DOI: [10.3390/electronics9061037](https://doi.org/10.3390/electronics9061037). URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/6/1037>.



- [110] CooperAcción. *Seminario nacional comunidades altoandinas, inclusión social y actividades extractivas*. URL: <http://cooperaccion.org.pe/publicaciones/seminario-nacional-comunidades-altoandinas-inclusion-social-y-actividades-extractivas/> (visited on 10/25/2018).
- [111] Marta Miret Badia. “[TFG]: Digital emergency Communications for the isolated High-Andean communities in Valle Sagrado.” 2019, p. 92. URL: [https://eseecretary.salle.url.edu/zona\\_autentica/memoriesTFC/14469\\_gc\\_2018.pdf](https://eseecretary.salle.url.edu/zona_autentica/memoriesTFC/14469_gc_2018.pdf).
- [112] Guillem Garrofé Montoliu. “[TFG]: Receptor de comunicacions NVIS en temps real i disseny d’una xarxa de comunicacions per les comunitats remotes del Valle Sagrado.” 2019, p. 115.
- [113] Carleen Maitland and Jon M. Peha. “Wireless Network Recovery Following Natural Disaster: Puerto Rico after Hurricane Maria.” In: Washington, D.C., Mar. 2018, p. 26. URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3142393](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3142393).
- [114] Dan Chen, Zhixin Liu, Lizhe Wang, Minggang Dou, Jingying Chen, and Hui Li. “Natural disaster monitoring with wireless sensor networks: A case study of data-intensive applications upon low-cost scalable systems.” In: *Mobile Networks and Applications* 18.5 (2013), pp. 651–663. ISSN: 1383469X. DOI: [10.1007/s11036-013-0456-9](https://doi.org/10.1007/s11036-013-0456-9).
- [115] Giuseppe. Parise, Luigi Martirano, and Luigi. Parise. “Electric Infrastructures Equalized to Strategic for Disaster Recovery in Emergencies.” In: *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. IEEE, June 2018, pp. 1–5. ISBN: 978-1-5386-5186-5. DOI: [10.1109/EEEIC.2018.8494378](https://doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8494378). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8494378/>.
- [116] Hui Gao, Yulong Shen, and Bin Yang. “D2D Communication for Disaster Recovery in Cellular Networks.” In: *2017 International Conference on Networking and Network Applications (NaNA)*. IEEE, Oct. 2017, pp. 292–295. ISBN: 978-1-5386-0604-9. DOI: [10.1109/NaNA.2017.50](https://doi.org/10.1109/NaNA.2017.50). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8247153/>.
- [117] Joaquim Porte, Alan Briones, Josep M. Maso, Carlota Pares, Agustín Zaballos, and Joan Lluís Pijoan. “[Submitted]: Heterogeneous wireless IoT architecture for natural disaster monitorization.” In: *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* ().
- [118] Joaquim Porte, Alan Briones, Josep Maria Maso, Carlota Pares, Agustin Zaballos, and Joan Lluís Pijoan. “Heterogeneous wireless IoT architecture for natural disaster monitorization.” In: *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking* 2020.1 (2020), p. 184. ISSN: 16871499. DOI: [10.1186/s13638-020-01793-3](https://doi.org/10.1186/s13638-020-01793-3). URL: <https://jwcn-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/s13638-020-01793-3>.
- [119] Thingsquare. *Contiki: The Open Source Operating System for the Internet of Things*. 2014. URL: <http://www.contiki-os.org> (visited on 04/18/2019).
- [120] Eric Ries. “The Lean Startup: Ebook.” In: (2011), p. 320. ISSN: 00479624. DOI: [23](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1669v3). arXiv: [arXiv:1011.1669v3](https://arxiv.org/abs/1011.1669v3).

- [121] *Programa de aceleración | La Salle*. URL: <http://technovabarcelona.com/empreendedor/aceleradora/> (visited on 01/21/2020).
- [122] *Ayudas de Industria del Conocimiento para el año 2019. Modalidad B. Ayudas Producte . Agencia de Gestión de Ayudas Universitarias y de Investigación*. URL: <http://agaur.gencat.cat/es/beques-i-ajuts/convocatories-per-temes/04-21667-IdC-2019-PRODUCTE> (visited on 04/12/2020).
- [123] *XIoT*. URL: <https://xiot.kickoffpages.com/> (visited on 02/10/2020).
- [124] *Los astrónomos se rebelan contra los 12.000 nuevos satélites de Elon Musk | Tecnología | EL PAÍS*. URL: [https://elpais.com/tecnologia/2019/06/14/actualidad/1560505253\\_254987.html](https://elpais.com/tecnologia/2019/06/14/actualidad/1560505253_254987.html) (visited on 01/15/2020).
- [125] *Arranca el plan de Elon Musk de conectar al mundo a Internet por satélites | Tecnología | EL PAÍS*. URL: [https://elpais.com/tecnologia/2019/05/15/actualidad/1557927104\\_174045.html](https://elpais.com/tecnologia/2019/05/15/actualidad/1557927104_174045.html) (visited on 01/15/2020).

## ANEXO I

DESIGN, IMPLEMENTATION, AND TEST OF AN SDR FOR  
NVIS COMMUNICATIONS.





*J. Porté, J. M. Maso, J. L. Pijoan, and D. Badia. "Design, implementation, and test of an SDR for NVIS communications." In: International Journal of Circuit Theory and Applications 47.9 (Sept. 2019), pp. 1502–1512. issn:0098-9886. doi:10.1002/cta.2670.*

Descripción: Esta publicación muestra las primeras conclusiones del estudio realizado en esta tesis. Se definen los primeros parámetros del canal ionosférico y las primeras conclusiones en el diseño de la capa física del enlace NVIS. Se realizan los primeros análisis del estudio, que nos permiten obtener las conclusiones iniciales sobre las características de la señal más adecuadas para el entorno de comunicación. Por otra parte, se describe brevemente el hardware diseñado.

Aportación: La aportación del coautor Joaquim Porté y autor de esta tesis en la publicación de este artículo, es el diseño, la implementación y el estudio del enlace, el desarrollo del hardware y la investigación llevada a cabo entre el enlace Barcelona-Cambrils. Escritura y revisión de las diferentes etapas en la publicación del artículo.





## RESEARCH ARTICLE

WILEY

# Design, implementation, and test of an SDR for NVIS communications

Joaquim Porte<sup>ID</sup> | Josep Maso | Joan Lluís Pijoan<sup>ID</sup> | David Badia<sup>ID</sup>

GRITS — Research Group in Internet Technologies and Storage, La Salle—Universitat Ramon Llull, C/Quatre Camins 30,08022,Barcelona, Spain

**Correspondence**

Joan Lluís Pijoan, LaSalle Ramon Llull, GRITS, Spain, Barcelona.  
Email: joanlluis.pijoan@salle.url.edu

**Funding information**

Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación, Grant/Award Number: CTM2015-68902-R

**Summary**

Although many physical layer solutions have appeared for remote sensors and Internet of things during the recent years, none of them is suited to very remote sensors in areas away from any mobile operator coverage. In that case, a solution on the basis of near vertical incidence skywave (NVIS) with reflection in the ionosphere may be very attractive. Using NVIS, no line of sight is needed and the coverage is much bigger than any other system operating in either the very high frequency (VHF) or ultra high frequency (UHF) band. In this paper, we present a new transmission scheme for very remote sensors using the NVIS transmission technique.

**KEYWORDS**

FPGA, HF, ionosphere, NVIS, software radio, Zynq

## 1 | INTRODUCTION

Traditionally, high-frequency (HF) communications have been used for long distances links using frequencies below the maximum usable frequency (MUF) for a given distance and antennas with low elevation angles. Using the oblique propagation, the wave can reach up to 3,000 km per hop, so a nearly global coverage can be achieved with a limited amount of hops depending on the status of the ionosphere.<sup>1</sup>

The vertical propagation has been mainly used for the study of the total electron content of the different layers of the ionosphere carried out by the sounding stations throughout the world. That is a key information from the geophysical point of view, as well as for those communication systems that are strongly influenced by the ionosphere, as the satellite radionavigation systems (GPS, Galileo) and the HF communication links.<sup>2</sup>

Recently, there is a growing interest in the near vertical incidence skywave (NVIS) communications, since they provide coverage in a surface of approximately 200 to 250 km radius, by means of waves transmitted nearly vertically at frequencies below the critical frequency of the F2 layer, typically between 3 and 10 MHz. In this kind of transmission, no line of sight is needed, and the coverage is much bigger than any other system operating in either the very high frequency (VHF) or ultra high frequency (UHF) band.

NVIS communications are an excellent choice for civil applications in several cases. First, in case of natural disasters when any other communication system fails. The Indian Ocean Tsunami of 2004 and the flooding of New Orleans after Hurricane Katrina in 2005 are excellent examples of the key role of HF communications with vertical incidence.<sup>3,4</sup> The recent increase in the number of violent and terrorist acts in Europe has resulted in a renewed interest of western countries for secure and robust communications.<sup>5</sup> In developing countries, a lot of people live far away from the nearest city without any communication infrastructure. Many humanitarian projects are being developed by non-government organizations

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© 2019 The Authors International Journal of Circuit Theory and Applications Published by John Wiley & Sons Ltd.

(NGOs) in terms of voice and e-mail communications, as well as e-health and educational initiatives.<sup>6</sup> Until not long ago, the antennas used for HF communications were large in size, especially for the lower part of the HF band (3–10 MHz). There has been a significant effort in the research of compact HF antennas, with gains not lower than  $-20$  dB that can be used for NVIS implementations, under the premise that a large antenna with a positive gain is placed at the other side of the link.<sup>7–9</sup>

This fact opens the door for NVIS communications to be applied to remote sensing applications, since a sensor is usually a compact device, working in a low-rate low-power scenario. In that case, the concept of Internet of Things (IoT) can be extended to devices located in areas without any telecommunication infrastructure. Currently, the main solutions for IoT<sup>10</sup> are Sigfox, LoraWan, and NB-IoT. Although the coverage of these networks is large (tens of kilometers), there is no global coverage in remote areas. In that case, satellite and HF communications are the only feasible solutions. Satellite solutions are usually too expensive and may not work under heavy weather conditions, such as snow and rain. On the other hand, HF communications operate at low, medium, and high bit rates (up to 62 kbps), with high transmission power (up to 250 W) using commercial equipment.<sup>11,12</sup>

The concept of NVIS applied to remote sensors for remote IoT applications needs a new physical layer able to transmit low data rate with the minimum power consumption and compact and lossy antennas.

Most of the projects<sup>13,14</sup> carried out in the Antarctica need to install data loggers in remote places. These places have complicated access for scientists and it may take some days or even weeks to get this data. In the case of Antarctic stations that are only open during the Antarctic summer, some sensors should be operational the rest of the year and send their data to the station.

In this document, we propose the best modulation scheme for the application of NVIS communications for sensors located at a distance of up to 250 km from the data collection center without line of sight and low consumption platform and low bit rate (adapted for this type of applications). In particular, we propose a compact NVIS platform for RIoT that establishes an NVIS sensor network in Antarctica capable of sending information to the Spanish Antarctic Station.<sup>15</sup> The proposed platform based on SDR allows us to have flexibility in the development of the system to achieve low energy consumption.

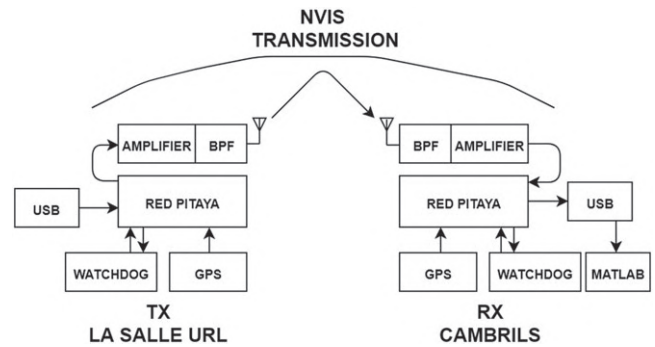
Obviously, this can be also applied to any other unattended sensor placed in zones without mobile telephony coverage, as well as for the rescue of injured people in remote places. This extends the concept of Internet of Things (IoT) to very remote sensors.<sup>16</sup>

This paper is organized as follows. In Section 1, a general description of the system is presented. In Section 3, a detailed description of the hardware implementation is given. The performed tests to select the proper power and modulation are described in Section 4, and the results are presented in Section 5. Finally, Section 6 contains the conclusions and future steps.

## 2 | SYSTEM DESCRIPTION

Up to now, most of the sensors installed by the Spanish scientific community in Antarctica have been placed close to the stations, because that makes data collection and data transmission easier. The research project “Optimized HF transmission for Near Vertical Incidence Skywave (NVIS) links for remote sensors in Antarctica (ENVISERA)”<sup>15</sup> is a step forward for the communication capabilities of Spanish scientists in Antarctica. The main goal is the design of a sensors network able to transmit their data from very remote places (even in the continent) to the Antarctic Station Juan Carlos I. This network will use the NVIS that allows the communication between nodes up to 200 km away using vertical reflection in the ionosphere in the HF band (3–30 MHz). As both the transmitted and received signal come from the upper part of the atmosphere, no line-of-sight is needed and you can have any obstacle without any loss of the signal. Then, every single node can behave as a repeater if necessary, so large areas can be covered, provided that the distance between two contiguous nodes is less than 200 km. The transmitted power for each node is low, and that improves the autonomy of the system. The sensor network will also allow bit-rates up to tens of kbps, good enough for most of the sensors for the transmission of data and medium/high quality digital voice.

A sensors network like this makes the area of influence of the Antarctic stations wider, and makes new experiments no possible until now feasible. It also has straightforward applications in case of natural disasters and terrorism attacks, where HF networks using NVIS are the most agile and economic solution to communicate the affected area with other parts of the country.



**FIGURE 1** Block diagram of the TX/RX system

### 3 | DESCRIPTION OF THE TEST BED

The block diagram of the system can be seen in Figure 1. The tests were performed between our premises in Barcelona (41° 24' 33.62" N, 2° 7' 48.82" E) and a field laboratory in Cambrils (41° 4' 57.22" N, 1° 4' 4.61" E) placed 96 km away. The frequency was selected after a detailed analysis of the ionograms from the Ebre Observatory in Roquetes,<sup>17</sup> situated 80 km from Cambrils. As referred in Lavers,<sup>18</sup> we selected the optimum transmission frequency as:

$$f_{TX} = 0.85 \times f_{oF2}, \quad (1)$$

where  $f_{oF2}$  is the average of the critical frequency of the F2 layer along the previous 15 days. The results showed in this paper were obtained at  $f_{TX} = 5.4$  MHz. In future developments, the sensor and the data collection center will implement some kind of automatic link establishment (ALE)<sup>12</sup> strategy in order to select the best frequency automatically.

Two horizontal half-wave dipoles antennas were installed at both ends of the link between two 8 m high masts. The final height was adjusted through NEC simulation<sup>19</sup> to maximize the gain at 90° vertical elevation. The final value was close to  $\frac{\lambda}{10}$ , so around 6 m.

At the receiver side, the signal is filtered and amplified 30 dB, with a low noise amplifier before the ADC. It should be noted that the presence of strong interfering signals come from the short wave stations, which can easily saturate the receiver if not properly filtered.

As the system is intended to be software-defined radio at low cost, the core of the transceiver is a Red Pitaya platform based on a Zynq SoC architecture of Xilinx. The Zynq-7000 All Programmable SoC (AP SoC) family integrates the software programmability of an ARM-based processor (the Processing System PS) with the hardware programmability of an FPGA (the programmable logic, PL).

The Red Pitaya platform<sup>20</sup> allows us to develop the hardware in a very agile way for different purposes. First, we programmed the platform to test the NVIS channel. After that, we tested the behavior of several modulations under different values of the transmission power. Finally, we implemented the optimal physical layer in real-time operation. The upper part named as FPGA is the PL, which takes care of all the fast digital signal processing. The lower part named SO is the processing system (PS), which includes the operating system, the configuration files, and the management of peripherals. The two entities share access to the RAM memory through the direct memory access (DMA)<sup>24</sup> device. The DMA is also in charge of the communication among the layers that exchange the data between the ADC and DAC converters.

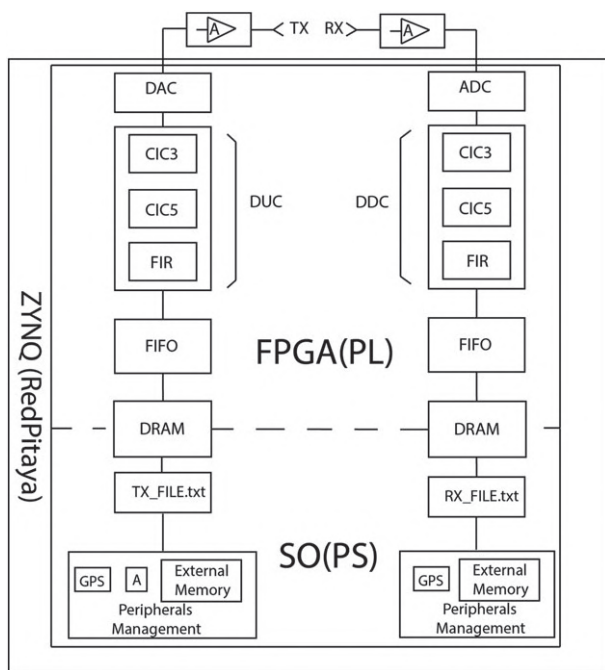
A phase locked loop<sup>23</sup> (PLL) is used to synchronize all the different parts of the hardware design, while implementing the local oscillator for the up and down conversion of the radiofrequency signal. As the operating system (OS) and hardware (FPGA) share the same peripherals<sup>24</sup> (DDR RAM), an agile reconfiguration of the transceiver can be carried out. In particular, the center frequency, the transmission power, and the power range of the received signal are the most critical parameters that are changed dynamically. The USB port is used by the RP to control the GPS, the power amplifier, and the external memory via a USB hub. The GPS is used for time synchronization purposes, although is not strictly necessary, the power amplifier can be switched on and off and returns the current output forward and reverse power. The external memory is used for storing the received data for further analysis.

#### 3.1 | Up and down converters

The RP has a couple of analog inputs and digital outputs of 14 bits and 125 Msps that we will use for MIMO and diversity applications. While in the analog inputs there is one ADC per channel, there is only one DAC that has to be multiplexed and synchronized for the two outputs. The digital up converter (DUC) and the digital down converter (DDC) perform the conversion from a base band signal to an RF signal and vice versa.<sup>25</sup>

**TABLE 1** Power consumption performance of different CIC stages configuration

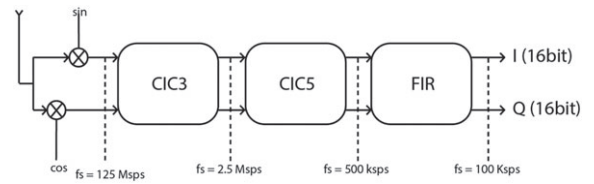
Out Freq Sampling, kHz/seg	RTotal	R CIC 3	R CIC 5	BW	Alias Rejection Response, dB	Power Consume, W
100	1250	50	25	20	-74	-
200	625	125	5	20	-85	-
500	250	25	10	20	-80	-
500	250	50	5	20	-96	1.888
500	250	50	5	30	-93	1.888
500	250	50	5	40	-91, 5	1.888
500	250	50	5	45	-87.6	1.888
500	250	125	2	20	-96	2.35
500	250	125	2	30	-93	2.35
500	250	50	5	40	-92	2.35
500	250	50	5	45	-91	2.35



**FIGURE 2** System design

In order to improve the performance of the DDC and DUC, we need to test some possible configurations, changing the order of the CIC's filters and the oversampling factor<sup>26</sup> in each state. The alias rejection of the CIC filters<sup>27</sup> has to be coupled with the LSB of the ADC converters, in this case, -87 dBm. Finally, the values of the total filter response have to be below the alias rejection. In Table 1, we can see all the tested configuration values for the CIC filters, the bandwidth, and the alias rejection. The main part of the FPGA power consumption comes from the CICs stages. From Table 1, it follows that the R factor of each stage mainly affects the power consumption, while the alias rejection is dependent on the bandwidth. In the cases where the alias rejection response does not fall within the necessary margins for a good performance (less than -87 dB), the power consumption is not calculated. The block diagram of the complete designed system can be seen in Figure 2.

The selected configuration is shown in Figure 3. The first cascaded integrator comb (CIC) filter performs the down-sampling with a factor 50 from the original 125 Msps to 2.5 Msps. It is a third-order filter with a minimum alias rejection of 87 dB for a signal of bandwidth up to 100 kHz. The second CIC filter performs the down-sampling with a factor of 5 from 2.5 Msps to 500 kcps, with a fifth-order filter. Finally, the raised cosine filter (RCF) is an FIR filter of 79 coefficients, with a down-sampling factor of 5 and a bandwidth of 30 KHz, which compensates the distortion caused by the CIC filters in the pass-band and perform the down-sampling from 500 to 100 kcps. We decided to limit both the bandwidth and the slope of the filter in order to minimize the energy consumption. In those conditions, the average current consumption of the hardware is of 1.88 W and of the full ZYNQ system design is 0.85 A with a current peak of 1 A for a supply voltage of 5.00V (4.25 W).



**FIGURE 3** Filters for the digital down converter

**TABLE 2** Performed tests

N-Test	M-PSK	M-FSK	TX Power, W
0-test	2-PSK	2-FSK	100 W
1-test	4-PSK	4-FSK	100 W
2-test	2-PSK	2-FSK	24 W
3-test	4-PSK	4-FSK	24 W
4-test	2-PSK	2-FSK	6 W
5-test	4-PSK	4-FSK	6 W
6-test	2-PSK	2-FSK	3 W
7-test	4-PSK	4-FSK	3 W
8-test	2-PSK	2-FSK	1.5 W
9-test	4-PSK	4-FSK	1.5 W
10-test	2-PSK	2-FSK	0.7 W
11-test	4-PSK	4-FSK	0.7 W

### 3.2 | RF amplifier

The class C amplifier can achieve high efficiency values (90%-100%) so it is commonly used in those applications that do not need a linear amplification. This kind of amplifier is particularly suitable for constant envelope modulations such as FSK or BPSK. However, in our work we wanted not only to improve the power efficiency but also to find the best modulation (FSK, PSK, and QAM) suited to the NVIS channel. For that reason, our platform had to be able to test both constant and not constant envelope modulations, so we needed a linear amplifier. Finally, we selected a Class A amplifier that allow us to perform all the tests shown in Table 2. The amplifier was a BLWA 0103-250, from BONN Elektronik GmbH, with a maximum transmission power of 250 W and a maximum efficiency of 30% (Alsina et al<sup>21</sup>). The main features of the amplifier are described in<sup>22</sup>

### 3.3 | The application

The application has to control all the peripherals shown in Figure 1 for both transmission and reception. The GPS, the power amplifier and hard drive are external devices while the DMA and the shared registers are implemented in the PL part.

As the transmissions are launched at regular intervals, the Linux tool Crontab is used to execute the application. The program reads the configuration file and updates the time reference from the GPS. Then it programs the FPGA to start transmission or reception, even if the buffers are empty. After that, the DMA is configured to move data from the RAM to the FIFO or vice versa and, in case of transmission, the power amplifier is activated. Finally, when all the data have been transmitted or received, the FPGA is blocked until the next program execution.

As we explain in Section 1, the power amplifier is a up to 250 W class A linear amplifier, able to test any proposed modulation. In case of using a constant envelop modulation, it could be replaced by a class C amplifier with a remarkable increase of the efficiency. This a key issue for unattended solar-powered sensors. We chose up to 100 W as an initial value to perform all the tests, but, as it will be explained later, the output power could be reduced significantly.

## 4 | DESCRIPTION OF THE TESTS

Because of their very low power consumption, the battery of the remote sensors usually supplies little power. In order to not increase the requirements of the battery significantly, the transmission system using NVIS has to be power efficient. The tests performed are designed to optimize the required power for bit rates lower than 4.65 kbps, which cover the major part of remote sensing applications. The tests compare the performance of simple modulations, ie, M-FSK and QAM, to find out the best modulation to be used with low transmission power. As you can see in Table 2, several modulations



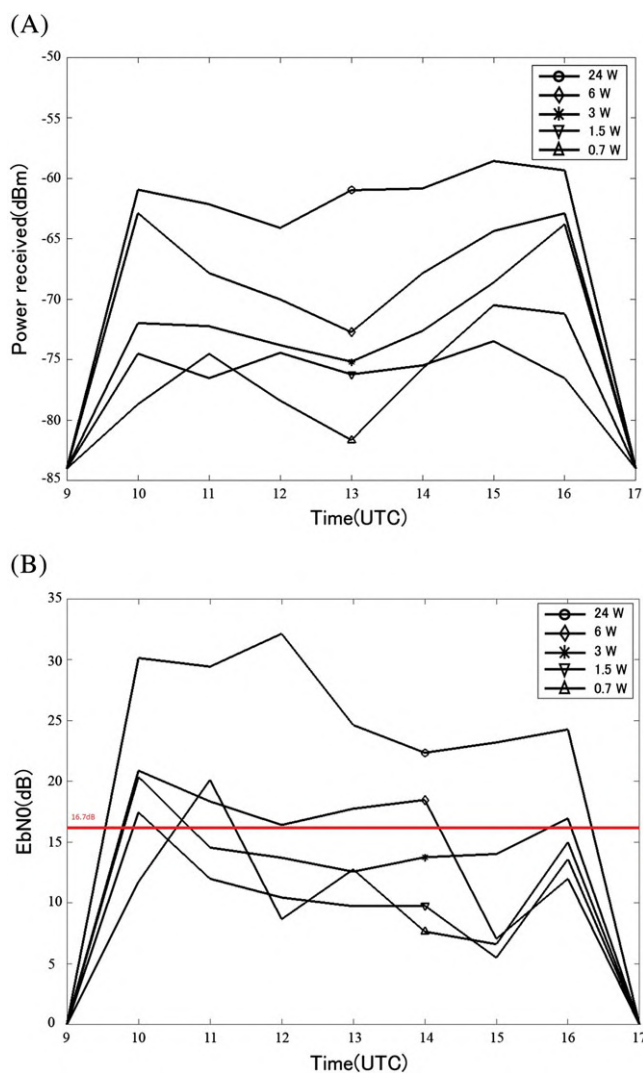
have been tested for different power levels ranging from 790 mW to 100 W. The tests start every 4 minutes, so 12 tests are sent every hour. The duration for each test is adjusted so as the same amount of bits is sent for each modulation. The occupied bandwidth is 2.3 kHz to be consistent with the most common HF standards.<sup>28</sup> The results presented in Section 5 are derived from a 2-month survey between October and December 2017. As we have only performed the transmissions during the day, the system only can use a single frequency.

## 5 | RESULTS

In this section, we introduce the results from the measurement survey. First, the variation of the received power and the bit error rate (BER) as a function of the time of day. Second, the variation of BER as a function of the measured ratio between the bit energy  $E_b$  and the noise spectral density  $N_0$ . Finally, the statistics of the received BER are presented in terms of cumulative density function.

### 5.1 | Time variation

The NVIS communication channel shows strong time variations depending on the time of the day and the season of the year. Although estimating the range of frequencies that may work well for a given time of the year is not easy, there is always a long time window, around 6 hours, during day and night where the link may be established without changing the frequency. In Figure 4A, you can see the average variation of the received power as a function of the time of the day and the transmitted power for a BPSK modulation. For every hour, the transmitted power ranges from 100 W (50 dBm) to 790 mW (29 dBm) as detailed in Table 2. For a fixed frequency, there are always 6 hours of channel availability between



**FIGURE 4** Time variation (A) Received power for BPSK (B) Eb/No [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

10 AM to 16 PM. The received power ranges from  $-60$  to  $-80$  dBm, so a total loss of 105 dB is introduced by the channel. It is important to note that the received power increases at both the beginning and the end of the day, while it decreases around 1 PM.

In Figure 4B, you can see the average variation of the  $E_b/N_0$  as a function of the time of the day and the transmitted power for a BPSK modulation. For a transmitted power of 24 W, the values range between 25 and 30 dB, and for a transmitted power of 6 W, the values of  $E_b/N_0$  are around 20 dB most of the time. The  $E_b/N_0$  also decreases at certain hours, and increases at both the beginning and the end of the day.

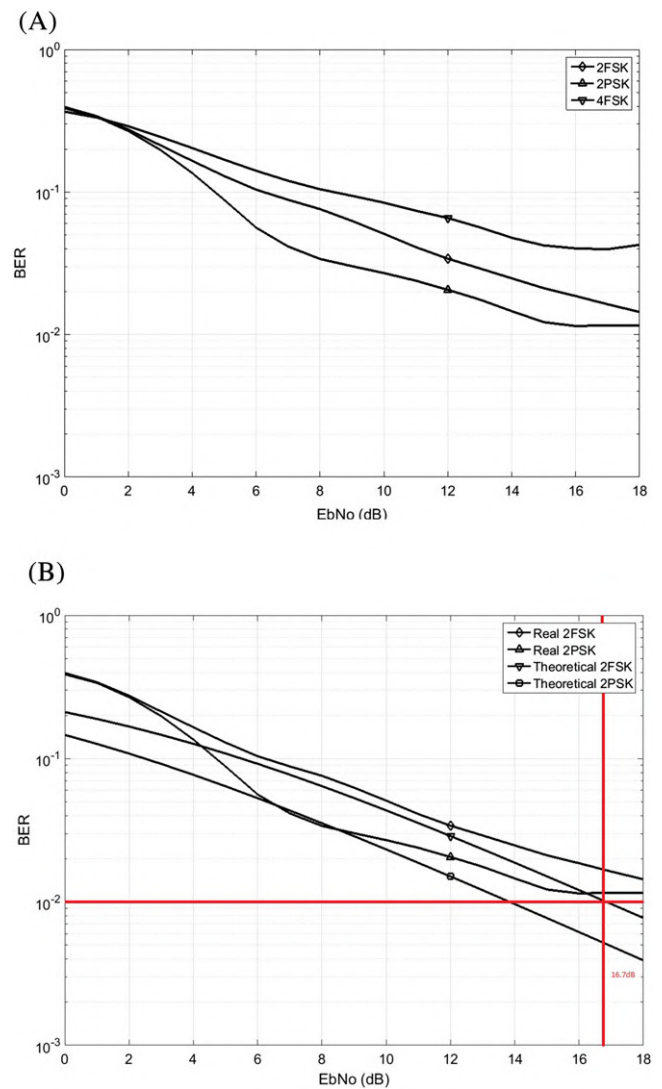
During the night, the layer F2 is deionized, and the critical frequency decreases. If you want to transmit information during the night, you need to change the band and install a lower frequency antenna.

### 5.2 | BER versus $E_bN_0$

In this section, we evaluate the ratio bit energy  $E_b$  over noise power spectral density ( $N_0$ ). This ratio is measured in every transmission interval using (2d). The bandwidth has been limited to 3 kHz by a digital filter and the sampling frequency  $f_m$  is 100 ksps.

As the NVIS channel shows multipath at some parts of the day and a high doppler spread as we can see in Orga et al,<sup>29</sup> the recursive least squares (RLS) equalizer has been adopted for all the modulation schemes, as suggested in Wang et al.<sup>30</sup>

$$P_S = \frac{\sum_{f=f_m/2-BW/2}^{f_m/2+BW/2} X_S(f)^2}{BW} \tag{2a}$$



**FIGURE 5** Bit error rate (BER) vs  $E_bN_0$  (A) BPSK, BFSK, 4FSK (B) Comparison with theoretical values [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

$$P_N = \frac{\sum_{f=f_m/2-BW/2}^{f_m/2+BW/2} X_N(f)^2}{BW} \tag{2b}$$

$$SNR = \frac{P_S - P_N}{P_N} \tag{2c}$$

$$E_b/N_{0dB} = SNR_{dB} + BW_{dB} - E_{b,dB}. \tag{2d}$$

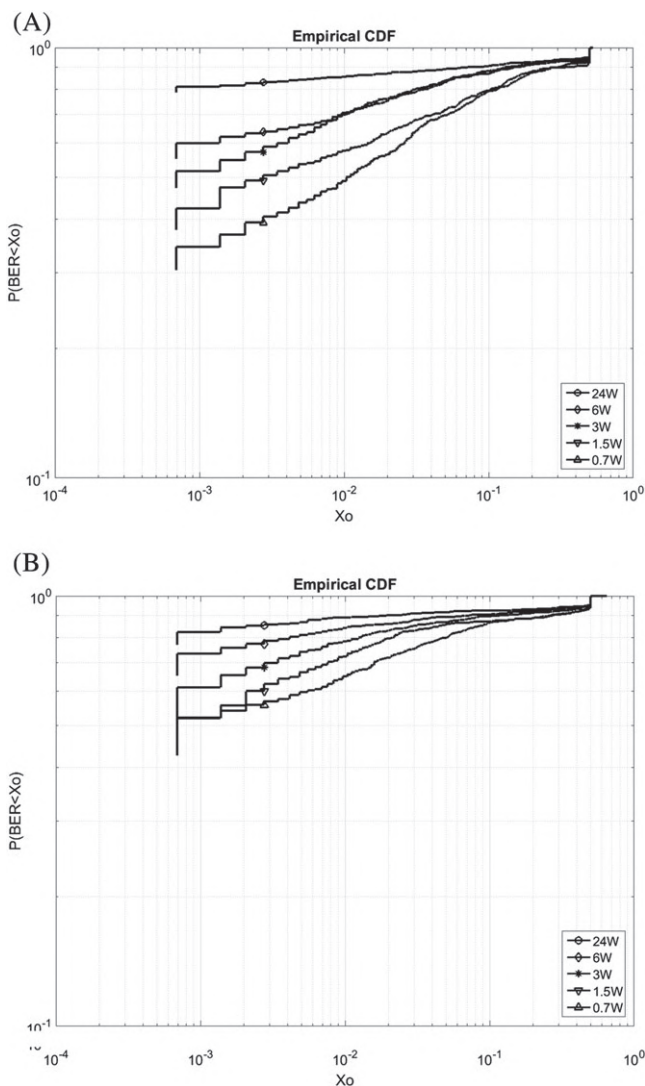
The results can be seen in Figures 5A,B. For weak received signals, the performance of all modulations is similar. For a BER of  $10^{-1}$ , an  $E_b/N_0$  around 5, 6, and 8 dB is needed for BPSK, BFSK, and 4PSK, respectively.

In the range of  $E_b/N_0$ , between 8 and 12 dB, BPSK performs better than BFSK, with a difference of 4 dB for a given BER.

For higher values of  $E_b/N_0$  around 18 dB, BPSK and BFSK curves get closer at BER values around  $10^{-2}$ . We also have compared the measured performance with theoretical performance of these modulations in a Rayleigh channel scenario. The results can be seen in Figure 5B. The differences are because of the occurrence of strong fading in the middle of the packet. As we can see during the transmission, the channel presents a mixture of *Good*, *Moderate*, and *Poor* conditions, as defined in Antoniou et al.<sup>11</sup> The measured BER values fit quite well with the theoretical values for the poor and moderate channel model.

### 5.3 | CDF function

For a deeper analysis of the performance of phase versus frequency modulations independent of the transmitted power and the received  $E_b/N_0$ , the statistics of the BER have been evaluated.



**FIGURE 6** Cumulative density function (CDF) function A, FSK B, PSK

In Figure 6A,B, the cumulative density function (CDF) of the BER for BFSK and BPSK is evaluated as a function of the transmitted power. For BFSK, the probability of having a BER less than  $10^{-3}$  is higher than 0.81 for a transmitted power of 24 W. For a transmitted power of 6 W, this probability decreases to 0.6. For BPSK, the probability of having a BER less than  $10^{-3}$  is higher than 0.82 for a transmitted power of 24 W. For a transmitted power of 6 W, this probability decreases to 0.73 and the value is 0.5 for a transmitted power of 3 W.

We also note that 4FSK should perform better, since it concentrates all the power in a single subcarrier for any given time. However, the bandwidth needs to be larger so the orthogonality between subcarriers is preserved. For a given bandwidth and bit-rate, BPSK and BFSK perform much better.

Considering these results, we conclude that a transmitted power up to 6 W with BPSK modulation performed with the RLS equalizer is enough for remote sensors using NVIS communications. We have to consider that no error code correcting (ECC) has been used. If an ECC were used, the BER probability would approach to zero most of the time.

## 5.4 | Power consumption

In order to optimize the power consumption, we have to choose the minimum transmission power to ensure a BER of  $10^{-2}$ , along a significant time window. From Figure 5B, we can state that an  $E_b/N_0$  greater than 16 dB is needed for a BPSK. For a transmission power of 6 W, we can achieve an  $E_b/N_0$  greater than 16 dB from 10 to 14 UTC, while the time interval is increased from 10 to 16 UTC if we transmit more than 12 W (see Figure 4B).

In the receiver front-end, the LNA is running most of the time so the optimization of its power consumption is a quite critical issue. As the received expected power is near to the LSB of the Red Pitaya ADC converters (around  $-85$  dBm) for the worst case, we set a minimum fading margin of 24 dB to ensure a correct demodulation of the received signal. The LNA ZFL-500LN+ from mini-circuits<sup>31</sup> offers a gain of  $24 + -0.5$  dBs with a power consumption of 0.9 W. The power consumption of the FPGA, ARM, and the peripherals is 1.88 W, 2.4 W, and 1.72 W, respectively, making a total of 6 W. In reception mode, we have to add the consumption of the LNA, so the total is 7 W. In transmission mode, if we assume a C-class amplifier of 15 W with a 90% of efficiency, the consumption of the RF power amplifier will be 17 W. As the LNA is always running, we have to add the consumption of both amplifiers, so the total is 24 W.

## 6 | CONCLUSIONS

In this paper, the feasibility of the application of NVIS communications to a remote sensing scenario has been investigated. Although the system is intended to be installed in remote sensors around the Spanish Antarctic Station, the system fits in any deployment with sensors located hundreds of km away from the hub without any available communication infrastructure. A new low-cost hardware using a commercial software radio platform has been implemented. We would like to note that, up to our knowledge, no similar developments have been made with the Red Pitaya platform in terms of complexity and communication speed between the PS and the PL.

The SDR approach has allowed us to use the same hardware platform for both channel sounding, modulation testing and the final implementation of the modem. The implementation of the system on a ZYNQ platform (FPGA + ARM processor) makes it possible to design accurately the CIC filters, peripherals management, and RF amplifier in a single hardware with a low power consumption.

On the basis of the study of the variation of the received power and  $E_b/N_0$ , we have established a daily time window of about 6 hours for a fixed frequency. That is a key issue in order to optimize the antenna for narrowband, since the higher the antenna gain, the lower the transmitted power.

A test bed has been put into operation in a 100 km NVIS link in order to select the best modulation for low values of transmission power. BPSK modulation is the best choice because of its trade-off between BER performance and the efficiency of the power amplifier. We have determined that the use of BPSK with a transmission power less than 10 W guarantees the proper demodulation of the sensor data. As the BPSK is a constant envelope modulation, we can use a class-C amplifier with a power consumption lower than 15 W.

Our work proposes a design basis for scalable SDR platforms for very low power consumption, which can be applied not only for remote sensors, but also in emergencies, rescue of people, and communication in developing countries.

The following steps are the definition of a complete physical layer for remote sensing using NVIS communications. That includes the frame design, equalization, coding, and frequency selection. A new test bed will be installed around the Spanish Antarctic Station Juan Carlos I to study the behavior of NVIS communications at high latitudes. The NVIS nodes

will collect data from nearby sensors and send it to the central node at the Antarctic Station. A network of NVIS nodes with routing protocols will extend the area of influence of the Antarctic Stations beyond the 250 km of a single hop.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was funded by the Ministry of Economy and Competitiveness and the European Regional Development Fund under the contract CTM2015-68902-R (MINECO/FEDER). The authors would also like to thank Marcos Hervas for his outstanding help in the hardware development and Rosa Maria Alsina for her advice in some technical issues about signal processing.

## ORCID

Joaquim Porte  <https://orcid.org/0000-0002-0510-2730>

Joan Lluís Pijoan  <https://orcid.org/0000-0002-1796-8216>

David Badia  <https://orcid.org/0000-0002-4792-8688>

## REFERENCES

- Davies K. *Ionospheric Radio*. London: IET; 1990.
- Rovira-Garcia A, Juan JM, Sanz J, Gonzalez-Casado G. A worldwide ionospheric model for fast precise point positioning. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*. 2015;53(8):4596-4600.
- Bodson D. When the lines go down. *IEEE Spectr*. 1992;29(3):40-44.
- Comfort LK. Cities at risk: hurricane Katrina and the drowning of New Orleans. *Urban Aff Rev*. 2006;41(4):501-516.
- European commission. Secure societies—protecting freedom and security of Europe and its citizens. [http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2018-2020/main/h2020-wp1820-security\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2018-2020/main/h2020-wp1820-security_en.pdf) Accessed July 22, 2018.
- Ayeni V, Milward-Oliver G, Maitland. *Fixing the Missing Link*. London: Bradford on Avon; 2005.
- Ignatenko M, Filipovic DS. On the design of vehicular electrically small antennas for NVIS communications. *IEEE Trans Antennas Propag*. 2016;64(6):2136-2145.
- Richie JE, Joda T. HF antennas for NVIS applications mounted to helicopters with tandem main rotor blades. *IEEE Tr EMC*. 2003;45(2):444-448.
- Vlasic R, Sumic D. An optimized shipboard HF loop antenna for NVIS. In: 50th International Symposium; 2008; Zadar Croatia.
- Lauridsen M, Nguyen H, Vejlgard B, Kovacs IZ, Mogensen P, Sorensen M. Coverage comparison of GPRS, NB-IoT, LoRa, and SigFox in a 7800 km<sup>2</sup> area. In: IEEE 85th Vehicular Technology Conference VTC2017-Spring; 2017; Sydney Australia.
- Antoniou S, Christofi L, Green PR, Gott GF. High rate data transmission in the mid-latitude NVIS HF channel. *IEEE Pro Comm*. 2006;153(2):272-278.
- Nelson RW, Butikofer BG, Lahart JA, Church DH. Wideband HF and 4G ALE near vertical incidence skywave test results. In: MILCOM 2015 - 2015 IEEE Military Communications Conference; 2015; Tampa FL USA.
- Navarro F, Otero J, Macheret Yu, Vasilenko EV, Lapazaran JJ, Ahlström AP, Machi F. Radioglaciological studies on Hurd Peninsula Glaciers, Livingston Island, Antarctica. *Ann Glaciol*. 2009;50(51):17-24.
- AEMET, State Meteorology Agency. [http://www.aemet.es/en/noticias/2019/02/jornada\\_antartida](http://www.aemet.es/en/noticias/2019/02/jornada_antartida) Accessed April, 2019.
- Porte J, Pijoan JL, Maso J, Badia D, Zaballos A, Alsina-Pages R. Antarctica—a key to global change, ed. *Advanced HF Communications for Remote Sensors in Antarctica* (pp. 21-39). London: IntechOpen; 2018.
- Abraham S, Beard J, Manijacob R. Remote environmental monitoring using Internet of Things (IoT). In: Global Humanitarian Technology Conference (GHTC); 2017; San Jose CA.
- Lowell Digisonde International. [www.digisonde.com](http://www.digisonde.com). Accessed July, 2018.
- Lavers C. *Reeds Introductions: Essential Sensing and Telecommunications for Marine Engineering Applications*. New York: Bloomsbury Publishing PLC; 2017.
- Witvliet BA, Van Maanen E, Westenberg AJ, Bentum MJ, Slump CH, Schiphorst R. Near vertical incidence skywave propagation: elevation angles and optimum antenna height for horizontal dipole antennas. *IEEE Ant*. 2015;57(1):1-18.
- RedPitaya, StemLabs. <https://www.redpitaya.com/>. Accessed April, 2019.
- Alsina-Pages R, Hervas M, Orga F, Pijoan J, Badia D, Altadill D. Physical layer definition for a long-haul HF Antarctica to Spain radio link. *Remote Sens*. 2016;8(5):380.
- Bonn Catalog, Bonn Elektronik. <https://alice.de/wp-content/uploads/2017/03/Bonn-Katalog-Web.pdf>. Accessed April, 2019.
- Makarevich AL, Kinash AN, Tokar MS, Chubarov VA. Performance analysis of PLL components in digital synchronization systems for high-speed applications. *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*; 2018; Minsk, Belarus.
- Shanehsazzadeh F, Sadeh Sadri M. Area and performance evaluation of central DMA controller in Xilinx embedded FPGA designs. In: *Electrical Engineering (ICEE)*; 2017; Tehran, Iran.

25. Kodali R, Bopppana L, Kondapalli S. DDC and DUC filters in SDR platforms. In: 15th International Conference on Advanced Computing Technologies(ICACT); 2013; Rajampet, India.
26. Sinha D, Kumar S. CIC filter for sample rate conversion in software defined radio. In: World Conference on Futuristic Trends in Research and Innovation for Social Welfare (Startup Conclave) (IEEE); 2015; Coimbatore, India.
27. Dolecek GJ. Two-stage cosine filter-based decimator with improved aliasing rejection. In: 2017 New Generation of CAS (NGCAS); 2017; Genova, Italy.
28. MIL-STD-188-110A, B and C. Interoperability and performance standards for data modems; 2011.
29. Orga F, Hervas M, Alsina-Pages R. Flexible low-cost SDR platform for HF communications, near vertical incidence skywave preliminary results. *IEEE Antennas Propag.* 2016;58(6):49-56.
30. Wang R, Jindal N, Bruns T, Bahai ARS, Cox DC. Comparing RLS and LMS adaptive equalizers for nonstationary wireless channels in mobile ad hoc networks. In: The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications; 2002; Lisboa, Portugal.
31. Minicircuits, Low Current, General Purpose Amplifier, 0.1 to 500 MHz. <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=ZFL-500LN%2B>. Accessed May, 2019.

**How to cite this article:** Porte J, Maso J, Pijoan JL, Badia D. Design, implementation and test of an SDR for NVIS communications. *Int J Circ Theor Appl.* 2019;47:1502–1512. <https://doi.org/10.1002/cta.2670>



## ANEXO II

### SENSING SYSTEM FOR REMOTE AREAS IN ANTARCTICA





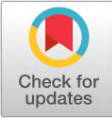
*Joaquim Porté, Josep M. Maso, Joan Lluís Pijoan, and David Badia. "Sensing system for remote areas in Antarctica." In: Radio Science (2020), 2019RS006920. issn: 0048-6604. doi: 10.1029/2019RS006920. url: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019RS006920>..*

Descripción: Con los primeros resultados del enlace entre Barcelona-Cambrils y de la primera publicación, se concluye con esta publicación el diseño del enlace NVIS óptimo para entornos de comunicaciones remotas. En esta se presenta el análisis del estudio realizado durante la Campaña española antártica 2018-2019 en la Base Juan Carlos I. En dicho análisis se muestran las mejoras tanto del protocolo como del diseño de la trama y sus características.

Aportación: La aportación del coautor Joaquim Porté y autor de esta tesis en la publicación de este artículo es el rediseño del formato de la trama, el diseño y la implementación de las mejoras del software, y la definición del banco de pruebas.

Adquisición de los datos e instalación del sistema durante la campaña antártica. Análisis de los datos, escritura y revisión de las diferentes etapas en la publicación del artículo.





## RESEARCH ARTICLE

10.1029/2019RS006920

## Sensing System for Remote Areas in Antarctica

Joaquim Porte<sup>1</sup> , Josep M. Maso<sup>1</sup>, Joan Lluís Pijoan<sup>1</sup> , and David Badia<sup>1</sup><sup>1</sup>Research Group in Internet Technologies and Storage (GRITS), La Salle Ramon Llull, Barcelona, Spain

## Special Section:

Advances in Electromagnetics, Photonics, Signal Processing, and Communication Technology

## Key Points:

- IoT network communications study for small HF antennas based on low power transmission
- Study of narrowband modulations varying its power transmission and bandwidth
- QAM is the best modulation for low-power transmission with NVIS system on Antarctica environment

## Correspondence to:

J. L. Pijoan,  
joanlluis.pijoan@salle.url.edu

## Citation:

Porte, J., Maso, J. M., Pijoan, J. L., & Badia, D. (2020). Sensing system for remote areas in Antarctica. *Radio Science*, 55, e2019RS006920. <https://doi.org/10.1029/2019RS006920>

Received 9 JUL 2019

Accepted 2 FEB 2020

Accepted article online 5 FEB 2020

**Abstract** Every year, the number of Internet of Things devices is growing exponentially. The current Internet of Things technology to support the connectivity of such a huge number of devices is limited by the coverage of the base stations deployed. In case of remote areas without coverage of any operator, the use of a satellite connection is such a high-cost option. The only alternative option for very remote sensor is high frequency (HF) communications with ionospheric reflection. The HF band (3–30 MHz) with Near Vertical Incidence Skywave allows a large coverage area (up to 250 km) without the need of line of sight. The HF radio links usually need higher power transmissions with larger antennas supported by a mast. In this paper, we explore a new transmission scheme for low-power transmissions, which is equivalent to use small and low gain HF antennas. We study the performance of several digital modulations using different bandwidths and transmission power. The field tests have been done around the Spanish Antarctic Base at Livingston Island to ensure the availability of the system even in polar areas where the behavior of the ionosphere is quite different from lower latitudes. However, the proposed physical layer fits well with any other remote location that requires low power data communication.

## 1. Introduction

Every year, the number of Internet of Things (IoT) connected devices is increasing constantly. In 2019, the number of IoT devices are about 26.66 billion, and it is expected to increase exponentially up to 75.44 billion in 2025 Statista - Internet of Things - Number of connected devices worldwide 2015-2025, n.d.). Some radio technologies for communicating this exorbitant number of devices have emerged; however, the coverage areas (offered by Sigfox, Lora, Neul, etc) are quite limited (Lauridsen et al., 2017).

In case of remote sensors, which are far (more than 10 km) from the nearest base station, the only alternatives without line of sight are satellites and high frequency (HF) communications. Other solutions such as repetition of the signal following the orography will solve the problem. However, this solution has a high economic cost. The main drawbacks of satellite connections are the high costs of the service and the operator dependency. Moreover, the coverage area of satellites is limited at polar locations, since the geostationary satellites usually do not have line of sight, and it required a network of polar satellites.

As an alternative to the satellite connection, a radio link in the HF band (3–30 MHz; Davies, 1990) can be established. HF communications do not need line of sight between the transmitter and the receiver. The wave is reflected by the upper layers of the atmosphere, which are ionized by the ultraviolet radiation coming from the sun. Depending on the angle of incidence in the ionosphere, two types of communication can be achieved. In the case of long-distance communications (DX), the incidence angle is lower than 70°, and we can cover a distance of 3000 km per hop. In practice, we can communicate with any part of the world using four or five hops (Vilella et al., 2009). In the case of an incidence angle between 70° and 90°, we refer to Near Vertical Incidence Skywave (NVIS) communications, with only one reflection achieving a radio coverage up to 250 km (see Figure 1), assuming 350 km as the maximum height of the ionosphere, (Witvliet & Alsina-Pagès, 2017). In Figure 2, we can see a hypothetical scenario with the different radio technologies for remote IoT.

Antarctica is one of the most remote and isolated places in the world. Many research activities are developed in the scientific bases distributed throughout the continent among the year (AEMET, 2019). Most of the scientific studies are based on data collected from sensors. Some of them are far from the base, and the downloading of the data has to be made manually. In that context, the data transmission is only possible using satellite links or HF radio communications. The services of the most common satellite operators (Iridium, Inmarsat, Thuraya, etc) are usually expensive and need line of sight.

©2020. The Authors.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

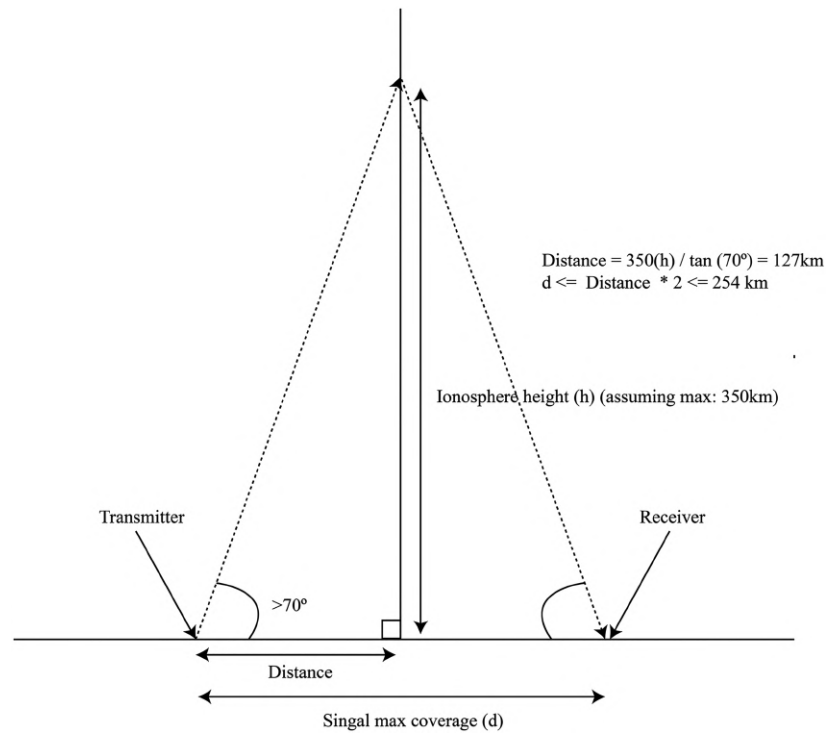


Figure 1. NVIS signal propagation coverage.

If we want to use HF communications for remote sensors, there are two key factors to be taken into account: First, the power consumption of the system, to increase the autonomy of the batteries and reduce the size as much as possible. Second, the size of the antenna, since we are dealing with wavelengths up to 100 m. For instance, a typical half-wave dipole at 4 MHz can reach 30 m and needs a mast of at least 12 m high. If a smaller antenna is installed, it will introduce some losses, which the receiver will have to handle with.

In this paper, we present a solution for a new physical layer for NVIS communications under two different hypotheses. First, in the case of limited transmission power (or lossy antennas) for battery powered systems, we find the best modulation scheme with a transmission power around 1 W. That will allow us to install small antennas, whenever the losses remain below 15 dB. Second, in the case of equipment connected to the mains, we try to maximize the bit rate using the best combination of modulation and bandwidth for a given transmission power.

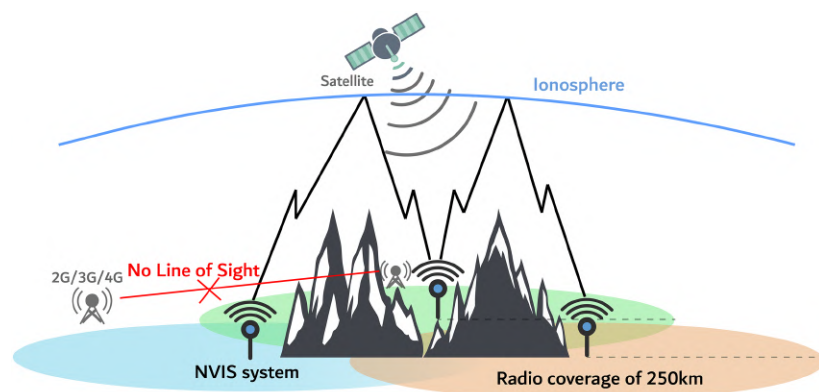


Figure 2. NVIS technology.



Figure 3. NVIS communications at Livingston Island.

The performance tests were carried out during the 2018–2019 Spanish Antarctic campaign in Livingston Island. We established an NVIS testbed from a remote location of the Spanish Antarctic Base Juan Carlos I. The remote node was placed at Rocky Glacier, 5.7 km away from the base. In Figures 3 and 4, we can see the node location and the elevation profile between the two nodes. The testbed was intended to study both the channel response and the physical layer in non-real-time mode, as well as the operation of the system in real-time.

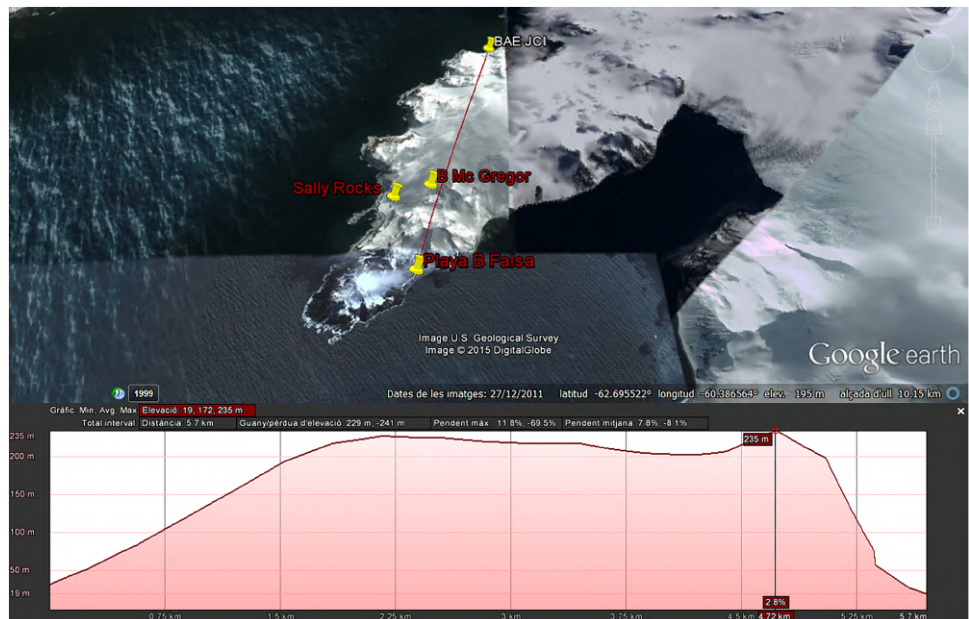


Figure 4. Elevation profile from the base to Rocky Glacier.



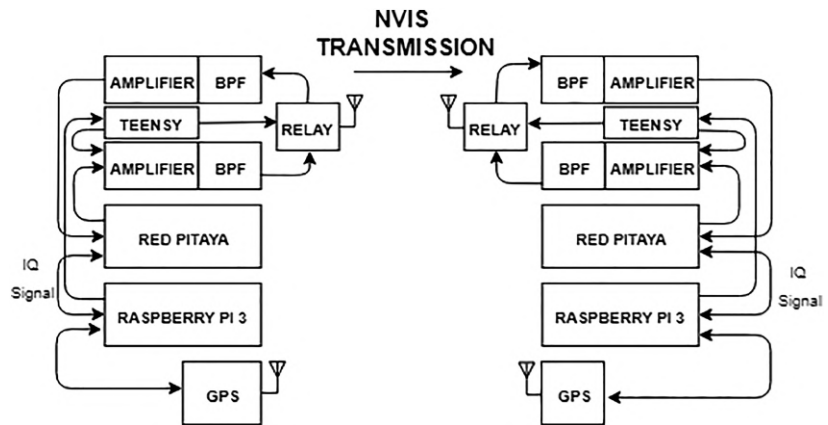


Figure 5. Schematic of the developed system.

This paper is organized as follows. In section 2, a description of the system is presented. In section 3, we detail the test bench and the frame distribution of every transmission. In section 4, the results obtained of the different tests are presented. Finally, section 6 contains the conclusions.

## 2. System Description

The main goal of the testbed is to test the influence of the transmission power, carrier frequency, hour of the day, bandwidth, and modulation scheme in the performance of an NVIS link. For that purpose, we need a complete reconfigurable software-defined radio platform.

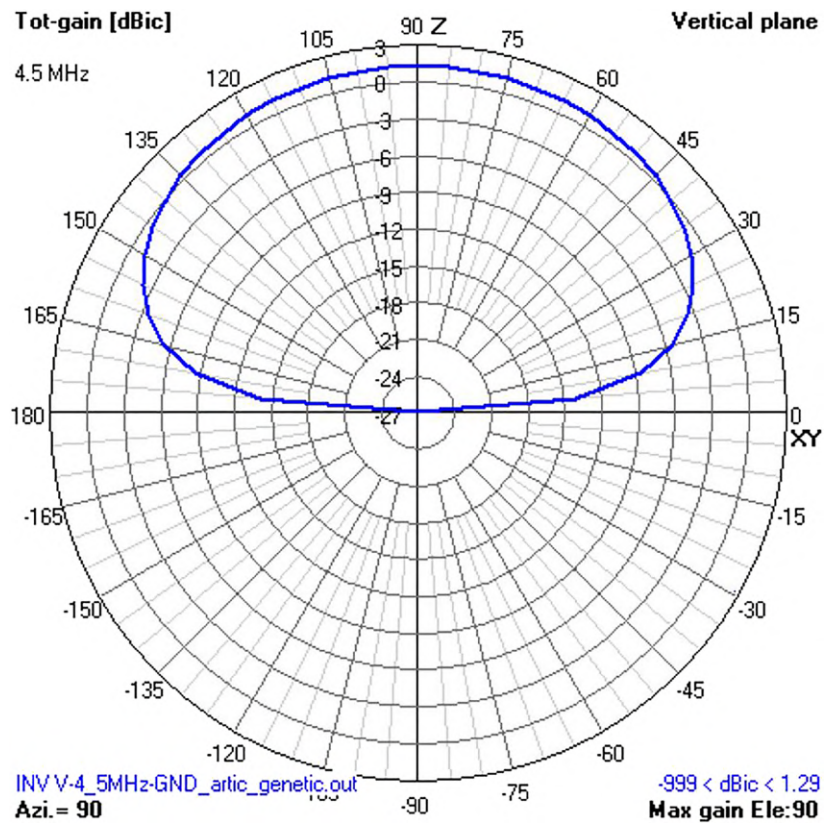


Figure 6. Radiation diagram of V-inverted at permafrost soil.

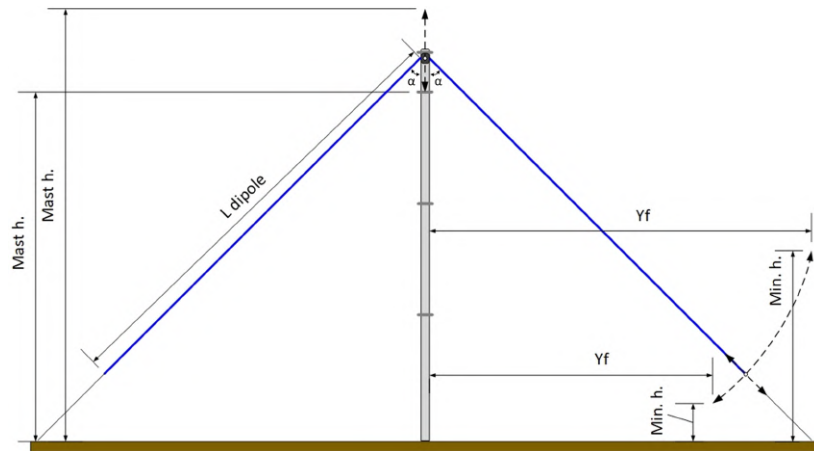


Figure 7. Dimensions of the inverted-V antenna.

### 2.1. Hardware Description

The hardware platform (see Figure 5) is based on available devices in the market, but all the programming code has been developed by our group in order to transmit and receive any kind of signal in both real-time and non-real-time (Porte, Maso, et al., 2019). It can also be programmed as a radio modem in real-time as we can see at Maso et al. (2019). Moreover, it allows optional GPS synchronization to help the timing adjust for the testing mode.

The hardware can be programmed to act as either a transmitter or a receiver. The system is composed principally by a Red Pitaya platform (Red Pitaya, n.d.) and a Raspberry Pi 3 together with some peripherals described below. The Red Pitaya platform is the core of the system, essentially composed by a Zynq 7010 chip. This chip is an Advanced RISC Machine (ARM) + Field-Programmable Gate Array (FPGA) and includes two analog to digital converters and two digital to analog converters. It is in charge in upsampling the baseband signals and downsampling the HF signal carrier (Kodali et al., 2013). A Linux operative system is running in the ARM, and it is programmed in C code, while the FPGA is programmed directly in VHDL code. This architecture allows the ARM and the FPGA to communicate in a very efficient way and to have a full control of all the parameters of the transmission.

On the other hand, the Raspberry Pi 3 is the microprocessor that interacts with the rest of the peripherals. This platform is also used with a Linux operative system and has been programmed in C code. It is connected to the Red Pitaya using an Ethernet connection and to the GPS, a Teensy module, and an external hard drive using a serial port. In reception mode, the Raspberry receives the HF signal after being downconverted to baseband and stores the IQ samples in the hard drive. In transmission mode, a crontab is set up to decide the hour and minute when every test frame has to be transmitted. In the right moment, the Raspberry sends the IQ frames via serial to the Red Pitaya and a message to the Teensy module. The Teensy is a microcontroller in charge of the control of the signal amplifier and the antenna relay. When it receives a message from Raspberry Pi 3 to go to TX mode, it switches on the amplifier and commutes the antenna relay to the power amplifier. The GPS module, endowed with an external GPS antenna, provides time-synchronization between transmitter and receiver for sounding proposes.

**Table 1**  
*Optimum Dimensions of the Inverted-V Antenna*

Soil type	Optimization algorithm	Gain (dBi)	SWR	Impedance ( $\Omega$ )	Mast h. (m)	Min h. (m)	Yf (m)
Ideal	Evolve	6.8	1.96	$25.6 + 3.2j$	11.01	2.00	12.39
Rural	Evolve	3.8	1.05	$47.7 + 0.4j$	10.81	1.87	12.39
Permafrost	Evolve	1.3	1.27	$63.3 - 1.0j$	13.08	2.00	11.51



**Table 2**  
*Power Transmission Tests*

Order of modulation	Power transmission	Minute
2,4,8,16,32	1 W	05,06,07,08,09
2,4,8,16,32	3 W	15,16,17,18,19
2,4,8,16,32	6 W	25,26,27,28,29
2,4,8,16,32	12 W	35,36,37,38,39
2,4,8,16,32	24 W	45,46,47,48,49
2,4,8,16,32	6 W	55,56,57,58,59

Regarding the amplifiers, the system is composed by an Low Noise Amplifier for the receiving HF signal and a power amplifier for the transmitting HF signal from Red Pitaya. The maximum transmission power amplifier is limited to 250 W, but the tests have been done at much lower values.

## 2.2. Antenna

A small HF antenna will present negative gains from  $-5$  to  $-10$  dBi. Instead of using such type of antenna, we will test our platform using a low power signal transmission, from 1 to 24 W, which values are very

low compared to others HF transceivers of the market (“HF 3000|Thales Group, n.d.”; R&S®M3SR Series4100 Software Defined Radios|System Components|Rohde & Schwarz, n.d.), where the power transmission of these products is from 20 to 400 W.

For the modulation tests, we chose an inverted-V antenna as the best option as we can see in Porte, Pijoan, et al. (2019). This antenna is easy to install, as it only needs one central mast and has a gain of around 2 dB. As indicated above, in NVIS, the maximum of the radiation diagram of the antenna has to be between  $70^\circ$  and  $90^\circ$  to maximize the efficiency. In Figure 6, we can see how the simulation of an inverted-V over permafrost soil meets the specification.

As the size of the antenna is directly related to the wavelength, we have to decide first the transmission frequency. For vertical incidence, the optimum frequency is selected as 85% of the critical frequency of the F2 layer ( $f_oF2$ ). The critical frequency is highly dependent on the season and the solar activity. After checking the historical records of the Ebre Observatory (Ionogrames de Livingston, n.d.) and Lowell Digisonde International (LDI, Lowell Digisonde International Station List (Digisonde.com), n. d.), we found out an average  $f_oF2$  of about 5.3 MHz, so a transmission frequency of 4.3 MHz was selected. The size of the antenna has been calculated as  $L = c/4f$ , resulting a branch length of 15.63 m. Other factors such as the mast height and the angle of aperture of the branches are key to achieve the optimum gain (see Figure 7). The height of the mast will configure the height of the antenna beyond the ground; this distance can create variations of the gain antenna because of reflections of the electromagnetic wave with the ground. By the other hand, the angle of aperture of the branches of the antenna also variates the antenna radiation diagram and the gain. These parameters have to be adjusted via simulation for a given type of soil (Witvliet et al., 2015). In Table 1, we can see the optimum values of the antenna dimensions for different types of soil.

The whole system (filters, matching networks) was optimized to operate at 4.3 MHz, which is the best frequency during the day. For night hours, the frequency should decrease, and a longer antenna should be used.

## 2.3. Amplifier

Although the linearity of the power amplifier is required for nonconstant envelope modulations, we wanted a linear amplifier to be able to test any kind of modulation. We installed an amplifier model BLWA 0103-250 from the manufacturer BONN in Holzkirchen, Germany (Bonn Elektronik, n.d.), a class-A amplifier, which can deliver up to 250 W for an input power lower than 0 dBm. It can be controlled through an RS232 serial port, managed by the Teensy platform.

For the final prototype of the system, another type of power amplifier should be used, depending on the modulation selected. For constant envelope modulations such as frequency shift keying (FSK) and phase shift keying (PSK), a class C amplifier is the best option.

## 3. Tests Performed

In this section, we describe the tested combinations of power values and modulation scheme. We also detail the frame design to ensure that the channel coherence bandwidth is respected in each of the tests (Hervás et al., 2013).

**Table 3**  
*Bandwidth Transmission Tests*

Order of modulation	Bandwidth transmission	Minute
2,4,8,16,32	5 KHz	05,06,07,08,09
2,4,8,16,32	10 KHz	15,16,17,18,19
2,4,8,16,32	16.66 KHz	25,26,27,28,29
2,4,8,16,32	25 KHz	35,36,37,38,39
Other tests	Other tests	45,46,47,48,49
Other tests	Other tests	55,56,57,58,59

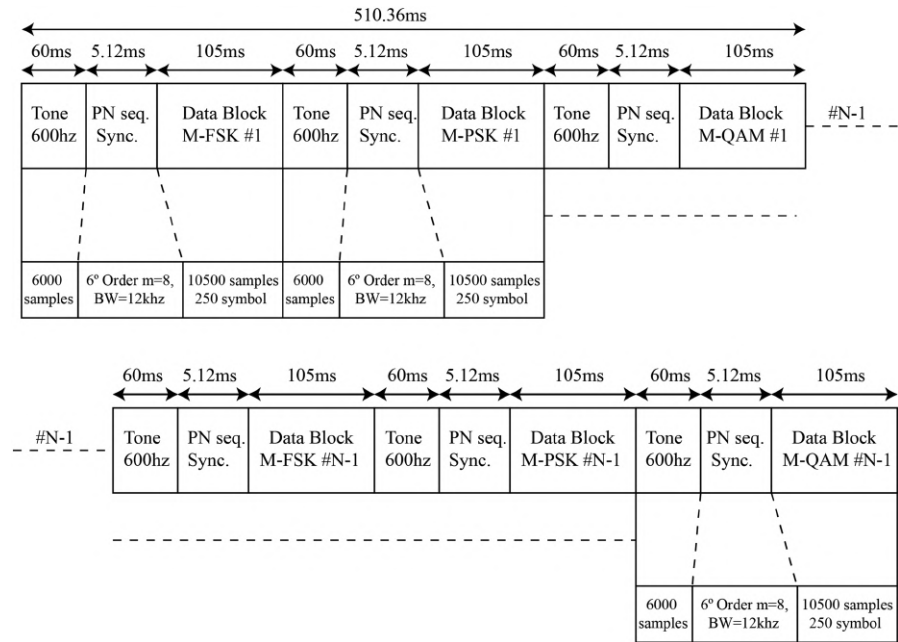


Figure 8. Frame design.

### 3.1. Test Bench

The entire set of tests has been classified in two groups (see Tables 2 and 3). In both groups, the PSK, quadrature amplitude modulation (QAM), and FSK modulations are tested, with a number of constellation symbols ranging from 2 to 32. In the first group, the bandwidth is fixed to 2.38 KHz, and the transmission power varies from 1 to 24 W for every modulation so the bit rate ranges from 2.38 to 11.9 kbps. In 1 hour, we perform 30 different tests as we can see in Table 2. In the second group, transmission power is fixed to 24 W, and the bandwidth varies from 2.38 to 25 KHz (see Table 3). In this case, the bit rate varies from 5 to 125 kbps.

Every group of transmissions has been working every hour for 15 days. The total amount of transmitted bits has been 16 and 20.1 MB for the first and the second groups, respectively. The second group involves more data transmitted due to the increase of bandwidth.

### 3.2. Frame Design

The structure of the frame is shown in Figure 8. Every test is composed by 50 packets ( $N = 50$ ) that include three different types of modulation. Each modulation is preceded by a tone of 600 Hz and a PN sequence. The tone is used for frequency synchronization to mitigate the effect of both the Doppler shift of the channel and the mismatch between the transmitter and receiver clocks. The PN sequence is a sixth-order m-sequence used for time synchronization, so a correlation has to be performed in real-time continuously at the receiver. The length of the frame has to be consistent with the coherence time of the channel (Proakis, 1995). Taking the most restrictive coherence time for the ordinary wave as 1.46 s (corresponding to a Doppler spread of 0.6816 Hz; Hervás et al., 2013), we set the length of the packet to 510.36 ms. In this interval, we make the test of three modulations (PSK, QAM, and FSK) with the same order of modulation, power transmission, and bandwidth. Hence, each modulation is tested under the same channels conditions.

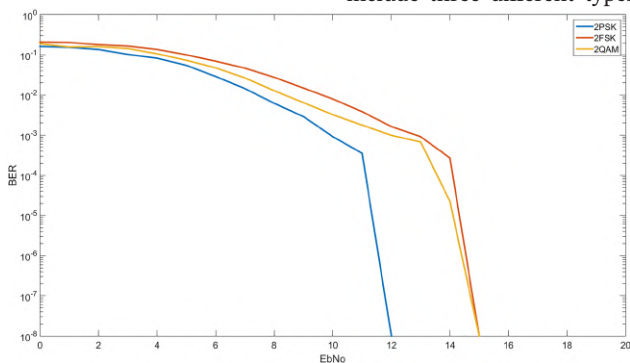


Figure 9. BER vs  $E_b/N_0$  for second-order modulations.

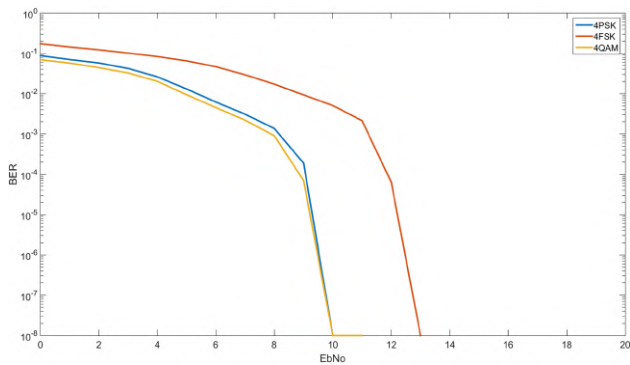


Figure 10. BER vs  $E_b/N_0$  for fourth-order modulations.

## 4. Results

In this section, we introduce the most relevant results of the tests performed in terms of modulation, bandwidth, and transmission power. All the data were collected during the 2018–2019 Spanish Antarctic Campaign at Livingston Island, particularly from 1 February to 2 March 2019.

### 4.1. Power Transmission Tests

First of all, we measured the real relationship between the bit error rate (BER) and bit energy to noise power spectral density ( $E_b/N_0$ ) of the received frames. The  $E_b/N_0$  of the signal received is calculated as:

$$(\text{SNR}) = \frac{E_b \cdot R_b}{B \cdot N_0}, \quad (1)$$

$$\frac{E_b}{N_0} = (\text{SNR}) \cdot \frac{B}{R_b}, \quad (2)$$

$$\frac{E_b}{N_0} (\text{dB}) = (\text{SNR}) (\text{dB}) + 10 \cdot \log_{10}(B) - 10 \cdot \log_{10}(R_b). \quad (3)$$

The received SNR is calculated in postprocessing,  $R_b$  is the bit/rate of the signal (it must vary according to the modulation order of each test), and  $B$  is the noise bandwidth where we measure the received BER, in this case, 5 KHz (the baseband signal BW is limited to 5 KHz). Finally, the BER is calculated comparing the transmitted and received bits from a total of 25 Mb for each trace.

In Figure 9, we can see the comparison between a second-order PSK, FSK, and QAM modulations. Due to the number of transmitted bits, our system is not able to measure BER values lower than  $10^{-8}$ . We can see that QAM and PSK are more robust than FSK because of a given  $E_b/N_0$ . The difference between 2PSK and 2QAM is shown Figure 9. In 2PSK, both symbols are located on the real axis, while in 2QAM are located in the IQ plane. For a given bit energy, the real and complex components of the 2QAM are lower, so the performance is poorer. In order to achieve a BER of  $10^{-3}$ , an  $E_b/N_0$  of 10 dB is enough for 2PSK.

In Figure 10, we can see the comparison of fourth-order modulations. In this case, QAM and PSK modulations remain more robust than the FSK. 4QAM and 4PSK have exactly the same constellation so they behave in the same way. In order to achieve a BER of  $10^{-3}$ , an  $E_b/N_0$  of 8 dB is enough for 4PSK and 4 QAM.

For modulation orders higher than four, the received symbols are very weak for being demodulated correctly. In Figures 11 and 12, we can see the measured  $E_b/N_0$  as a function of time of day for a transmission power of 24 W. The ionosphere reflected the signal mainly from 12:00 UTC to 19:00 UTC, so the link was available during a time window of 7 hours each day. If we look at the  $E_b/N_0$  values, we can see values from

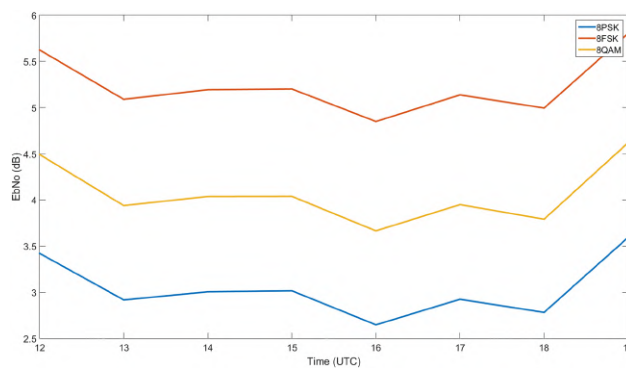


Figure 11.  $E_b/N_0$  vs time for eighth-order modulations.

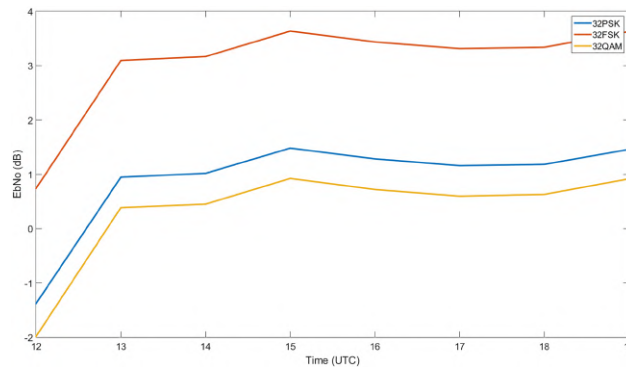


Figure 12.  $E_b/N_0$  vs time order 32 modulations.

3 to 5 dB for eighth-order modulations and from 0 to 3 dB to 32nd-order modulations. None of these values is enough to guarantee a proper demodulation of the data.

Now, we are going to study the probability to have a given BER value. For that purpose, we will make use of the cumulative distribution function (CDF) of the BER, that is, the probability of achieving a BER lower than a given value. From Figures 13–18, the axis Y shows us the probability  $P(\text{BER} < X_0)$  to obtain a BER less or equal than the value  $X_0$  of axis X. For example, the probability  $P(\text{BER} < X_0)$  if  $X_0 = 0.01$  is 90%, so we can assert that the 90% of the packets transmitted have a BER lower than 0.01. In Figure 13, we can see the CDF of a second-order modulation PSK, QAM, and FSK for a transmission power of 24 W. We can observe that the PSK and QAM have a probability of 95.2% and 95.4%, respectively, to achieve a BER lower than 0.004, while the probability is 92.8% for the FSK modulation.

In Figure 14, we can see the probability in case of a power transmission of 2 W. In this case, we can see that there is not a great difference between the three modulations. PSK and QAM modulations have a probability of 94.3% and 94.4% to achieve a BER lower than 0.004, respectively, in front of FSK with a probability of 93.8%.

In the case of a power transmission of 24 W for fourth-order modulations (see Figure 15), the probability for 4FSK decreases to 77.3%. The 4PSK and 4QAM have a similar behavior with a probability of 91.1% and 92.8%, respectively.

On the other hand, Figure 16 shows the CDF for a transmission power of 2 W. In this case, we can see PSK and QAM modulations still outperform FSK with a probability of 90.1% and 91.1%, respectively. For the FSK modulation the probability to have a BER lower than 0.004 decreases to 80%.

Based on the results obtained, we can conclude that a 4QAM can be used with a transmission power of 2 W, since we will have a probability about 90% to have a BER lower than 0.004. This is good enough to take into account the improvement due to the error correcting codes and the retransmissions of the frames. If we use

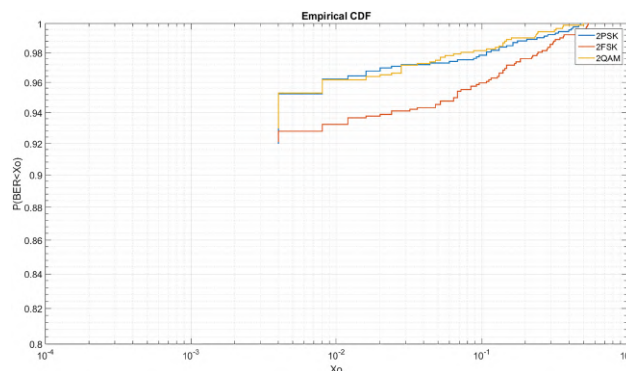


Figure 13. CDF of second-order modulations for 24 W.

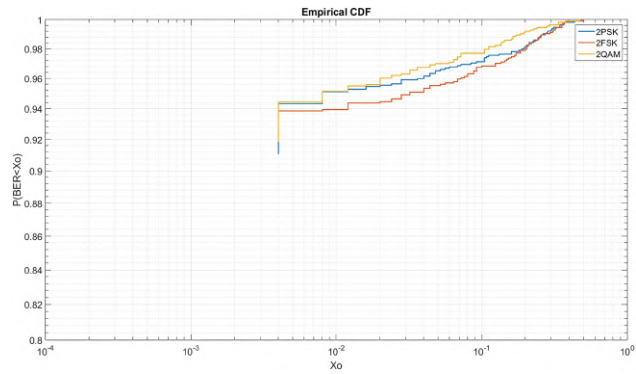


Figure 14. CDF of order two modulations for 2 W.

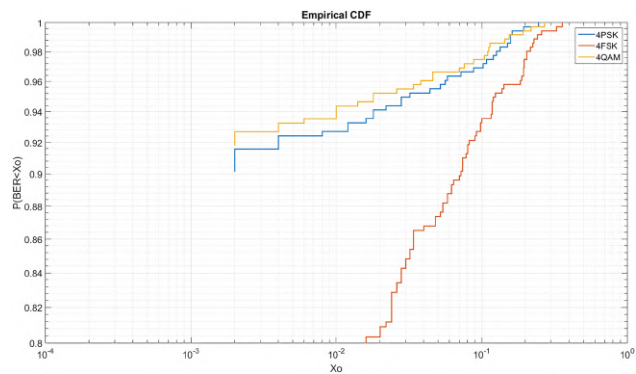


Figure 15. CDF of fourth-order modulations for 24 W.

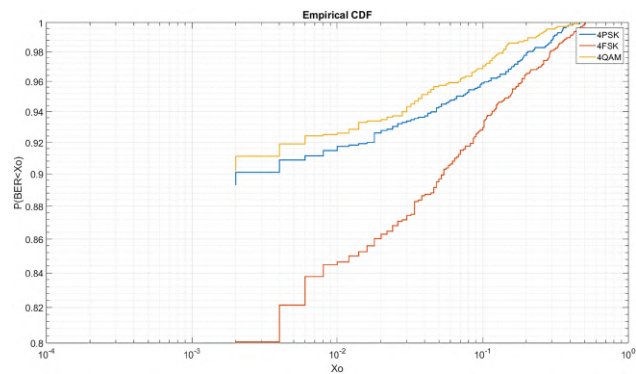


Figure 16. CDF of fourth-order modulations for 2 W.

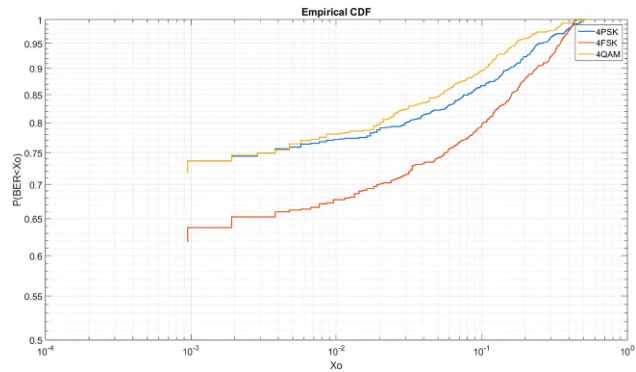


Figure 17. CDF of fourth-order modulations for BW = 5 KHz.



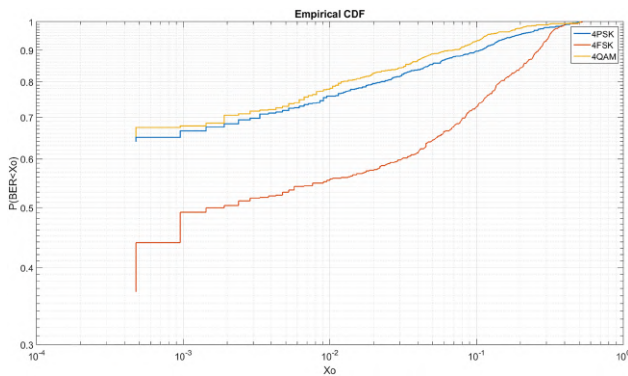


Figure 18. CDF of fourth-order modulations for BW = 10 KHz.

2PSK instead, there is a slight increase of the probability up to 94%, but the bit rate is halved. If we use a transmission power of 24 W, we could also use a simpler modulation such as 2FSK with the same performance.

#### 4.2. Bandwidth Transmission Tests

The previous tests have been performed using a standard baseband bandwidth of 2.3 KHz. We have also tested the use of higher bandwidths out of standard. For a given modulation scheme, the bit rate is directly proportional to the bandwidth, so we can reach bit rates up to 18.4 Kbps for a 10 KHz bandwidth.

In Figure 17, we can see the CDF of the BER of fourth-order modulations for a bandwidth of 5 KHz with a transmission power of 24 W. The probability to have a BER lower than 0.001 is 73.7% for both 4PSK and 4QAM, while it is 63.8% for the FSK modulation.

The same test for a bandwidth of 10 KHz is shown in Figure 18. Here, the probability to have a BER lower than 0.001 is around 66% for both 4PSK and 4QAM, in front of 43.9% for the FSK modulation.

Although the probabilities are lower when we use higher bandwidths, we have to take into account that the bit rate is increased in a larger proportion, so the overall performance is better. If our application needs higher throughputs, we could also use greater bandwidths without increasing the power consumption.

### 5. Conclusions

In this paper, we have introduced a new solution for remote sensors using the NVIS communication technique. We have explored the influence of the type of modulation, the transmission power, and the bandwidth for an NVIS link between sensors located around the Spanish Antarctic Base in Livingston Island.

For low power consumption sensors, for a transmission power of 2 W, we recommend the use of the standard bandwidth of 2.3 KHz with either a 4QAM or 2PSK modulation That yields to 4.6 or 2.3 kbps with a probability around 90% to have a BER lower than 0.004 prior to any correcting code.

For sensors with higher power consumption (i.e., 24 W), we could also use the standard bandwidth with simpler modulations such as 2FSK, such a simpler amplifier could be used. If we need higher bit rates without increasing the power, we could also increase the bandwidth up to 5 KHz. In that case, we could use a 4QAM with a probability around 73.7% to have a BER lower than 0.001 for a bit rate of 9.2 kbps.

We have also defined a frame structure for NVIS communications. The frame includes a preamble for frequency and time synchronization, as well as a maximum length for each data block.

The tests prove the feasibility of NVIS for sensors located up to 250 km away from the central node, without the need of any telecom operator, and it is an interesting alternative to satellite for places without infrastructures and complicated terrain.

As we can see, the results obtained show us the specifications to achieve the robust transmission for low transmissions of sensors out of the standards. In case of an equalized 4QAM or 4PSK of 2 W and 2.4 KHz bandwidth, as we have seen, 90% of the packets transmitted have a BER lower than 0.004 in a 12.500 symbols frame and 25.000 bits. In the worst case scenarios, we will have 100 bit errors. If we apply an interleaving method and an FEC convolutional code with a rate code 1/2 as the standard MIL-STD-188-110B shows (MIL-STD-188-110B, 2000), we will improve the probability of a BER less than 0.001 to a 94%. The application of FEC will reduce the bitrate to 2.4 Kbps, this is enough for the transmission of sensor data.

The results obtained during the Antarctic campaign have been implemented for a real-time transmission of sensor data to the Spanish Antarctic Base. The implemented system did not use code correcting and interleaving methods, and a 24 W power transmission and 2.4 KHz bandwidth were used. More information about the implementation done can be found at Maso et al. (2019). In a future line of the real-time implementation of the system, a real-time ionospheric sounding, interleaving and FEC methods will be implemented in the same platform.

This work performs a study of the greatest physical layer definition for remote areas using NVIS communication. In such places, the consumption of power is one of the most critical issues in a telecommunication system design. Most of the current products in the market have a RF signal output power from 20 to 1500 W HF 3000/Thales Group, n.d.; R&S®M3SR Series4100 Software Defined Radios/System Components/Rohde & Schwarz, n.d.). In these kinds of areas, the system should be powered by batteries, which are too large. Comparing the results shown in this paper with the most commonly used international standards (MIL-STD-188-110B, 2000; MIL-STD-188-110D, 2017; North Atlantic Treaty Organization (NATO), 2009; STANAG 4539, n.d.), we obtain a better performance for the case of very low power consumption and without applying any interleaving method or an FEC convolutional code.

Compared to others scientific works, we can assume that the performance, in terms of BER achieved, in our system is much better than the one described in similar previous works. In the PhD thesis (Wilson, 2012), we can see a BER of  $10^{-2}$  for an  $E_b/N_0$  of 11 dBm, with a 2-QAM and a power signal transmission of 5 W. Finally, in Saraç et al. (n.d.), we can find a real time implementation of the standard STANAG 4539 (STANAG 4539, n.d.) that achieves the minimum performance of the standard but without improving it.

#### Acknowledgments

This work was funded by the Ministry of Economy and Competitiveness and the European Regional Development Fund under the contract CTM2015-68902-R (MINECO/FEDE) and RTI2018-097066-B (MINECO/FEDER). The data used to develop our study and generate all the figures can be obtained online in <https://doi.org/10.5281/zenodo.3523219> and in <http://doi.org/10.5281/zenodo.3523281>.

#### References

- AEMET (2019). Jornada sobre las actividades de AEMET en la Antártida - State Meteorological Agency—AEMET—Spanish Government. Retrieved June 4, 2019, from [http://www.aemet.es/en/noticias/2019/02/jornada\\_antartida](http://www.aemet.es/en/noticias/2019/02/jornada_antartida)
- Bonn Elektronik (n.d.). Bonn Elektronik Power amplifier 9 kHz-40GHz. Retrieved from <https://allice.de/wp-content/uploads/2017/03/Bonn-Katalog-Web.pdf>
- Davies, K. (1990). Ionospheric Radio. The Institution of Engineering and Technology, Michael Faraday House, Six Hills Way, Stevenage SG1 2AY, UK: IET. <https://doi.org/10.1049/PBEW031E>
- Hervás, M., Pijoan, J. L., Alsina-Pagès, R. M., Salvador, M., & Altadill, D. (2013). Channel sounding and polarization diversity for the NVIS channel. Proceedings Nordich HF Conference, (August).
- HF 3000/Thales Group (n.d.). Retrieved October 24, 2019, from <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/defence/hf-3000-skyfst>
- Ionogrames de Livingston (n.d.). Retrieved July 6, 2018, from <http://www.obsebre.url.edu/ca/ionogrames-de-livingston>
- Kodali, R. K., Boppana, L., & Kondapalli, S. R. (2013). DDC and DUC filters in SDR platforms. In *2013 15th International Conference on Advanced Computing Technologies (ICACT)* (pp. 1–6). Rajampet, India: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICACT.2013.6710526>
- Lauridsen, M., Nguyen, H., Vejlgård, B., Kovacs, I. Z., Mogensen, P., & Sorensen, M. (2017). Coverage Comparison of GPRS, NB-IoT, LoRa, and SigFox in a 7800 km<sup>2</sup> Area. In *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)* (pp. 1–5). Sydney, NSW, Australia: IEEE. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2017.8108182>
- LDI, Lowell Digisonde International Station List (Digisonde.com) (n.d.). Retrieved July 6, 2018, from <http://www.digisonde.com/station-list.html>
- Maso, J., Porte, J., Pijoan, J. L., & Badia, D. (2019). Internet of things communications for remote sensors in Antarctica using NVIS. In *HF Nordic*. Fårö, Sweden.
- MIL-STD-188-110B (2000). Department of defense interface standard interoperability and performance standards for data modems.
- MIL-STD-188-110D (2017). Department of defense interface standard: Interoperability and performance standards for data modems. Retrieved from [http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0100-0299/MIL-STD-188-110D\\_55856/](http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0100-0299/MIL-STD-188-110D_55856/)
- North Atlantic Treaty Organization (NATO) (2009). STANAG 5066: The Standard for Data Applications over HF Radio. Retrieved from <https://www.isode.com/whitepapers/stanag-5066.html>
- Porte, J., Maso, J. M., Pijoan, J. L., & Badia, D. (2019). Design, implementation, and test of an SDR for NVIS communications. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 47(9), 1502–1512. <https://doi.org/10.1002/cta.2670>
- Porte, J., Pijoan, J. L., Maso, J. M., Badia, D., Zaballos, A., & Alsina-Pagès, R. M. (2019). Advanced HF communications for remote sensors in Antarctica. In *Antarctica—A Key To Global Change* (1st ed.). IntechOpen.
- Proakis, J. G. (1995). *Digital communications*. New York: McGraw-Hill.
- R&S®M3SR Series4100 Software Defined Radios/System Components/Rohde & Schwarz (n.d.). Retrieved October 24, 2019, from [https://www.rohde-schwarz.com/es/producto/m3srseries4100-productos-secundarios\\_63489-9903.html](https://www.rohde-schwarz.com/es/producto/m3srseries4100-productos-secundarios_63489-9903.html)
- Red Pitaya (n.d.). Retrieved June 4, 2019, from <https://www.redpitaya.com/>
- Saraç, S., Kara, F., & Vural, C. (n.d.). Real-Time Implementation of STANAG 4539 High-Speed HF Modem. In *World Academy of Science, Engineering and Technology* (p. 6).
- STANAG 4539 (n.d.). North Atlantic Treaty Organization. Retrieved from <https://www.rapidm.com/standard/stanag-4539/>
- Statista - Internet of Things - Number of connected devices worldwide 2015-2025 (n.d.). Retrieved May 22, 2019, from <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>
- Vilella, C., Miralles, D., Altadill, D., Acosta, F., Solé, J. G., Torta, J. M., & Pijoan, J. L. (2009). Vertical and oblique ionospheric soundings over a very long multihop HF radio link from polar to midlatitudes: Results and relationships. *Radio Science*, 44, RS2014. <https://doi.org/10.1029/2008RS004001>
- Wilson, J. M. (2012). A low power HF communication system. Retrieved from <https://www.escholar.manchester.ac.uk/api/datastream?publicationPid=uk-ac-man-scw:156816&datastreamId=FULL-TEXT.PDF>
- Witvliet, B. A., & Alsina-Pagès, R. M. (2017). Radio communication via Near Vertical Incidence Skywave propagation: an overview. *Telecommunication Systems*, 66(2), 295–309. <https://doi.org/10.1007/s11235-017-0287-2>
- Witvliet, B. A., van Maanen, E., Petersen, G. J., Westenberg, A. J., Bentum, M. J., Slump, C. H., & Schiphorst, R. (2015). Near Vertical Incidence Skywave Propagation: Elevation Angles and Optimum Antenna Height for Horizontal Dipole Antennas. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 57(1), 129–146. <https://doi.org/10.1109/MAP.2015.2397071>

ANEXO III

EDUCATION AND E-HEALTH FOR DEVELOPING  
COUNTRIES USING NVIS COMMUNICATIONS.





*J. Porté, J. Maso, J. L. Pijoan, M. Miret, D. Badia, and J. Jayasinghe. "Education and e-health for developing countries using NVIS communications." In: 2018 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC). 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/R10-HTC.2018.8629842.*

Descripción: En esta publicación se describe y valida una de las posibles aplicaciones del estudio y la implementación realizada en esta tesis. Se presenta una herramienta de comunicación sin necesidad de operador telefónico ni repetidores. Esta solución, con un radio de cobertura de hasta 250 km, se presenta como una gran alternativa de comunicación para la transmisión de datos en países en vías de desarrollo para aplicaciones de educación y sanidad. Este documento describe la validación de la tecnología en Pampallacta (Perú), una aldea altoandina sin cobertura móvil, del 15 de julio al 30 de julio de 2018.

Aportación: Diseño y adaptación del estudio realizado para las comunicaciones en zonas remotas a este nuevo entorno de comunicación. Adquisición de los datos e instalación en Pampallacta. Análisis de los datos, escritura y revisión de las diferentes etapas en la publicación del artículo.



El intervalo de páginas de 115 a 119 se ha extraído por conflicto de confidencialidad