

Máster Universitario en Electrónica y Telecomunicación Aplicadas (META)



Trabajo Fin de Máster

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

Autor: David Garcia Santana
Tutor(es): Dr. Aurelio Vega Martínez

Fecha: Septiembre 2023

Máster Universitario en Electrónica y Telecomunicación Aplicadas (META)



Trabajo Fin de Máster

**Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones
inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce**

HOJA DE FIRMAS

Alumno: David Garcia Santana Fdo.:

Tutor: Dr. Aurelio Vega Martínez Fdo.:

Fecha: Septiembre 2023

Máster Universitario en Electrónica y Telecomunicación Aplicadas (META)



Trabajo Fin de Máster

**Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones
inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce**

HOJA DE EVALUACIÓN

Calificación:

Presidente

Fdo.:

Secretario

Fdo.:

Vocal

Fdo.:

Fecha: Septiembre 2023

AGRADECIMIENTOS

En estas primeras líneas quiero transmitir mi más sincero agradecimiento a todos aquellos que me han ayudado y apoyado a lo largo de esta etapa de mi vida.

Para comenzar, quiero agradecer a mis padres y mi familia por haberme apoyado en todos los momentos que me han llevado a completar este trabajo.

Por otro lado, debo hacer una mención especial para algunos profesores, como Roberto Esper-Chaín Falcón, Sunil Lalchand Khemchandani y Javier Del Pino Suárez. Sin duda, estos son grandes maestros de los cuales he tenido la suerte de poder aprender.

Por supuesto, también mi tutor Aurelio Vega Martínez ha sido fundamental para mí y, con su ayuda, he podido hacer mucho más que escribir estas palabras.

RESUMEN

Este TFM se centra en el estudio, diseño e implementación de un prototipo de Dispositivo IoUT dirigido a futuras aplicaciones subacuáticas. El objetivo de explorar la viabilidad de la combinación de tecnología de comunicación inalámbrica que permita, en futuras aplicaciones, alcanzar una solución tan compacta y duradera como se considere necesario.

Inicialmente, se exploró la integración de dos tecnologías de comunicación inalámbrica: la comunicación por campo cercano o NFC, y la comunicación por luz visible o VLC. La primera opción se escogió por su eficiencia en la transmisión de datos y energía a corta distancia, mientras que VLC se consideró por su capacidad para transmitir datos a través de la luz visible.

La implementación de dicho prototipo se ha basado en la adquisición de datos, su posterior transmisión, y en la recarga inductiva. No obstante, durante el estudio del dispositivo IoUT se llegó a la conclusión de que también es necesario el estudio, diseño e implementación de un segundo prototipo, denominado estación base.

Este segundo dispositivo se plantea para que pueda leer los datos adquiridos por el primer prototipo, presentarlos en consola para la disposición de los usuarios y transferir energía. De manera que, un dispositivo independiente de éste y capaz de recolectar la energía transferida, pueda recargarse inductivamente.

El primer prototipo consiste en un Dispositivo IoUT implementado mediante la integración de varias plataformas de desarrollo de STMicroelectronics y un LED. Las plataformas integradas permiten el control del prototipo e incluyen la tecnología NFC requerida para operar como etiqueta o tag dinámico. El LED es el requisito indispensable para la tecnología VLC planteada para este prototipo, ya que representa el papel del transmisor de datos mediante luz visible.

Por otra parte, el segundo prototipo o estación base, se ha implementado siguiendo un planteamiento similar al del prototipo anterior, dispone de varias placas de desarrollo que integran la capacidad de control y NFC, necesarias para la lectura de los datos y la transferencia de energía. La tecnología VLC que integra, es un prototipo desarrollado por el estudiante para un receptor de luz visible especializado para la frecuencia de trabajo de este proyecto.

El software requerido para implementar las funciones descritas para ambos prototipos se ha basado en las herramientas y recursos suministrados por STMicroelectronics, con el fin de demostrar la facilidad para implementar los proyectos de ejemplo con los que se han implementado estos prototipos.

En resumen, este TFM ha logrado diseñar, desarrollar e implementar con éxito dos prototipos interconectados que forman un sistema IoUT funcional. Aunque inicialmente se consideraron las tecnologías NFC y VLC para la comunicación, finalmente se optó por integrar únicamente NFC debido a los problemas técnicos encontrados con la tecnología VLC.

Esta solución ofrece un ecosistema efectivo para la adquisición, transmisión y presentación de datos, así como la recarga inductiva de los dispositivos de adquisición de datos, lo que contribuye al avance de las aplicaciones de IoT, IoUT y la optimización de la eficiencia energética.

Abstract

This Master's thesis focuses on the study, design, and implementation of a prototype IoUT Device aimed at future underwater applications. The objective is to explore the feasibility of combining wireless communication technology to achieve a solution that is as compact and durable as needed for future applications.

Initially, the integration of two wireless communication technologies was explored: Near Field Communication (NFC) and Visible Light Communication (VLC). NFC was chosen for its efficiency in transmitting data and energy over short distances, while VLC was considered for its capacity to transmit data through visible light.

The implementation of the prototype is based on data acquisition, subsequent transmission, and inductive charging. However, during the study of the IoUT Device, it was concluded that the study, design, and implementation of a second prototype, named the base station, are also necessary.

This second device is designed to read the data acquired by the first prototype, display it on the console for user access, and transfer energy. This way, an independent device capable of collecting transferred energy can be inductively recharged.

The first prototype consists of an IoUT Device implemented by integrating various STMicroelectronics development platforms and an LED. The integrated platforms enable prototype control and include the required NFC technology to operate as a dynamic NFC tag. The LED is essential for the VLC technology envisioned for this prototype, serving as the transmitter of data using visible light.

On the other hand, the second prototype or base station has been implemented following a similar approach to the previous prototype. It includes multiple development boards that integrate control and NFC capabilities necessary for data reading and energy transfer. The VLC technology it integrates is a prototype developed by the student, specialized for the working frequency of this project.

The software required to implement the functions described for both prototypes is based on tools and resources provided by STMicroelectronics, demonstrating the ease of implementing example projects that have been used to implement these prototypes.

In summary, this thesis has successfully designed, developed, and implemented two interconnected prototypes forming a functional IoUT system. While NFC and VLC technologies were initially considered for communication, the final decision was to integrate only NFC due to technical challenges with VLC.

This solution offers an effective ecosystem for data acquisition, transmission, presentation, and inductive charging of data acquisition devices, contributing to the advancement of IoT, IoUT applications, and energy efficiency optimization.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	12
1.1	ANTECEDENTES	12
1.2	OBJETO DEL TRABAJO.....	14
1.3	PETICIONARIO	15
1.4	ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	15
2	ESTADO DEL ARTE	16
2.1	VLC	16
2.2	NFC.....	17
2.3	STMICROELECTRONICS.....	18
2.3.1	MICROCONTROLADOR	18
2.3.2	ST25 NFC / RFID TAGS & READERS	19
2.3.3	STM32CUBE.....	24
2.4	SW4STM32.....	25
2.5	KICAD 7.0	26
3	ESTUDIO DE LA SOLUCIÓN HARDWARE	27
3.1	ESTUDIO DE LAS COMUNICACIONES VLC	28
3.1.1	TRANSMISOR VLC.....	29
3.1.2	RECEPTOR VLC	30
3.2	ESTUDIO DE LAS COMUNICACIONES NFC.....	41
3.2.1	LECTOR NFC – NUCLEO-L476RG & X-NUCLEO-NFC05A1.....	41
3.2.2	TAG DINÁMICO NFC – NUCLEO-L053R8 & X-NUCLEO-NFC07A1.....	43
3.3	SOLUCIÓN HARDWARE PROPUESTA.....	45
3.3.1	PROTOTIPO DE LA ESTACIÓN BASE	45
3.3.2	PROTOTIPO DEL DISPOSITIVO IOUT	49
4	ESTUDIO DE LA SOLUCIÓN SOFTWARE	52
4.1	ESTUDIO DEL SOFTWARE PARA LA ESTACIÓN BASE.....	52
4.1.1	ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DEL LECTOR NFC	53
4.1.2	ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DEL RECEPTOR VLC	59
4.2	ESTUDIO DEL SOFTWARE PARA EL DISPOSITIVO IoUT	61
4.2.1	ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DEL TAG DINÁMICO NFC	62
4.2.2	ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE LAS TRANSMISIONES VLC.....	68
4.3	SOLUCIÓN SOFTWARE PROPUESTA	72
4.3.1	SOLUCIÓN SOFTWARE DE LA ESTACIÓN BASE.....	72
4.3.2	SOLUCIÓN SOFTWARE DEL DISPOSITIVO IOUT	74
5	PRUEBAS REALIZADAS	76
5.1	PRUEBAS SOBRE VLC	76
5.1.1	PRUEBAS FUERA DE AGUA DULCE	77
5.1.2	PRUEBAS BAJO AGUA DULCE.....	79
5.2	PRUEBAS SOBRE NFC.....	81
5.2.1	PRUEBAS DE COMUNICACIÓN MEDIANTE NFC	83
5.2.2	PRUEBAS DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE NFC	85
6	PRESUPUESTO.....	89
6.1	RECURSOS HARDWARE	89
6.2	RECURSOS SOFTWARE.....	89
6.3	RECURSOS HUMANOS.....	90
6.4	COSTE TOTAL	90
7	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	91
7.1	CONCLUSIONES	91
7.2	TRABAJOS FUTUROS	91

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas
para seguimiento de peces en agua dulce

7.2.1	DISEÑO MÁS COMPACTO DEL DISPOSITIVO IOUT	92
7.2.2	INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN QUE GESTIONE LA RECARGA INDUCTIVA.	93
7.2.3	DISEÑO MÁS COMPACTO DEL RECEPTOR VLC	94
7.2.4	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SOFTWARE ESPECÍFICO	95
8	BIBLIOGRAFÍA	96

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: Arquitectura básica para IoUT [2].....	12
Ilustración 2: Coeficiente de absorción de radiación electromagnética a varias longitudes de onda [4]..	13
Ilustración 3: Principio físico de la transmisión de datos entre dos interfaces NFC [6].....	13
Ilustración 4: Esquema del sistema final de este TFM.	15
Ilustración 5: Ilustración del espectro en el dominio de la modulación [12].....	16
Ilustración 6: Denegación de acceso a las especificaciones de la plataforma de NFC FORUM [16]	17
Ilustración 7: Algunos tags NFC en comparación con monedas y botones (NFC Forum, 2023).....	18
Ilustración 8: NUCLEO-L053R8 [25].....	19
Ilustración 9: NUCLEO-L476RG [27].....	19
Ilustración 10: Productos de la familia ST25 [29].....	20
Ilustración 11: Diagrama de bloques del ST25R3911B [30].....	21
Ilustración 12: Diagrama de bloques funcional del X-NUCLEO-NFC05A1 [31]	21
Ilustración 13: Placa de expansión X-NUCLEO-NFC05A1 [31].....	22
Ilustración 14: Diagrama de bloques del ST25DVxxKC [32].....	22
Ilustración 15: Diagrama de bloques funcional del X-NUCLEO-NFC07A1 [33]	23
Ilustración 16: Esquema de los dispositivos ST25DVxxKC [22].	23
Ilustración 17: X-NUCLEO-NFC07A1.....	23
Ilustración 18: STM32CubeMX [35].	24
Ilustración 19: STM32CubeIDE [36].	25
Ilustración 20: Ventana principal del SW4STM32.....	25
Ilustración 21: Ejemplo de PCB en KiCad 7.0 [40]	26
Ilustración 22: Ventana principal de KiCad 7.0.	26
Ilustración 23: Diagrama de bloques del dispositivo IoUT	27
Ilustración 24: Diagrama de bloques de la estación base	28
Ilustración 25: Esquema de los prototipos finales	28
Ilustración 26: Espectro visible de los LED blancos [41].....	29
Ilustración 27: Forma simple de operar un LED [41].....	29
Ilustración 28: Simulación de la respuesta del receptor VLC en LTSpice XVII.....	31
Ilustración 29: Ilustración 24: Simulación de la respuesta en frecuencia del receptor VLC	32
Ilustración 30: Simulación de la respuesta en frecuencia del receptor VLC a la frecuencia de trabajo. ..	32
Ilustración 31: TEMD5510FX01 [42]	33
Ilustración 32: Sensibilidad espectral relativa del TEMD5510FX01 [42].	34
Ilustración 33: Esquemático de la etapa de recepción de luz.....	34
Ilustración 34: Esquemático de la configuración del TIA OPA381	35
Ilustración 35: Esquemático del filtro paso bajo RC.	35
Ilustración 36: Simulación de la primera etapa de recepción VLC	36
Ilustración 37: Esquemático de la primera etapa de recepción VLC.....	36
Ilustración 38: Ganancia de lazo cerrado vs frecuencia del AD8601 [44]	37
Ilustración 39: Diseño ideal de un AO de lazo cerrado con realimentación negativa	37
Ilustración 40: Simulación de la segunda etapa de recepción VLC.....	38
Ilustración 41: Esquemático de la segunda etapa de recepción VLC	38
Ilustración 42: Capacidad operativa del LMV331 [45].....	39
Ilustración 43: Ejemplo de diseño de un oscilador de señal cuadrada [45]	39
Ilustración 44: Simulación de la tercera etapa de recepción VLC.....	40
Ilustración 45: Esquemático de la tercera etapa de recepción VLC	41
Ilustración 46: Inserción del X-NUCLEO-NFC05A1 en el NUCLEO-L476RG [31]	41
Ilustración 47: Implementación física del lector NFC.....	43
Ilustración 48: Inserción del X-NUCLEO-NFC07A1 en el NUCLEO-L053R8 [33]	43
Ilustración 49: Implementación física del tag dinámico NFC	44
Ilustración 50: Esquemático del receptor VLC en KiCad 7.0	45
Ilustración 51: PCB del receptor VLC en KiCad 7.0	46
Ilustración 52: Sustrato para la fabricación del receptor VLC	46

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

Ilustración 53: Circuito impreso del receptor VLC	47
Ilustración 54: Máscara del prototipo del receptor VLC	47
Ilustración 55: Prototipo del receptor VLC	48
Ilustración 56: Conexiones del NUCLEO-L476RG	48
Ilustración 57: Prototipo de estación base	49
Ilustración 58: Conexiones del NUCLEO-L053R8	50
Ilustración 59: Prototipo del Dispositivo IoUT	50
Ilustración 60: Planteamiento del diagrama de flujo para la estación base	53
Ilustración 61: Directorios disponibles en el pack de expansión software X-CUBE-NFC5	54
Ilustración 62: Selección de una carpeta de trabajo para el proyecto de ejemplo de X-CUBE-NF5 para SW4STM32	54
Ilustración 63: Acceso al proyecto de ejemplo incluido en X-CUBE-NFC5	55
Ilustración 64: Importación del proyecto de ejemplo "STM32L476RG_NUCLEO_PollingTagDetectNdef"	55
Ilustración 65: Compilación del proyecto de ejemplo "STM32L476RG_NUCLEO_PollingTagDetectNdef"	56
Ilustración 66: Inicialización del NUCLEO-L76RG y el X-NUCLEO-NFC05A1	57
Ilustración 67: Bucle de ejecución del fichero "main.c"	57
Ilustración 68: Creación de una nueva consola de conexión	57
Ilustración 69: Configuración de la conexión remota con el prototipo desde la consola de SW4STM32	58
Ilustración 70: Configuración de una nueva conexión mediante puerto serie	58
Ilustración 71: Consola para la revisión de los mensajes de ejecución	59
Ilustración 72: Implementación del manejador de la interfaz SPI2 del NUCLEO-L476RG	59
Ilustración 73: Parámetros de configuración de la interfaz SPI2 del NUCLEO-L476RG	60
Ilustración 74: Implementación del código necesario para la recepción de datos VLC mediante la interfaz SPI2	61
Ilustración 75: Planteamiento del diagrama de flujo para el Dispositivo IoUT	61
Ilustración 76: Acceso a los proyectos de ejemplo incluidos en STM32CubeMx	63
Ilustración 77: Selección del proyecto de ejemplo "NDEF_URI"	63
Ilustración 78: Creación del proyecto de ejemplo "NDEF_URI" para implementar las operaciones NFC	64
Ilustración 79: Configuración del pack de expansión software X-CUBE-NFC7 en el STM32L053R8Tx	64
Ilustración 80: Pack de expansión software "FREERTOS"	65
Ilustración 81: Configuración de los relojes del sistema en el proyecto de ejemplo "NDEF_URI"	66
Ilustración 82: Fichero "main.c" del proyecto de ejemplo "NDEF_URI"	67
Ilustración 83: Fichero "app_nfc7.c" del proyecto de ejemplo "NDEF_URI"	68
Ilustración 84: Sección "Connectivity" de la ventana del STM32CubeMx	69
Ilustración 85: Configuración del modo de funcionamiento de la interfaz SPI1 del NUCLEO-L053R8	69
Ilustración 86: Opciones de configuración de la interfaz SPI1 del NUCLEO-L053R8	70
Ilustración 87: Parámetros de configuración de la interfaz SPI1 del NUCLEO-L053R8	71
Ilustración 88: Código planteado para las transmisiones SPI basadas en la interrupción controlada por el NVIC.	71
Ilustración 89: Activación de la interrupción para la interfaz SPI1 del NUCLEO-L053R8	72
Ilustración 90: Diagrama de flujo final de la estación base	73
Ilustración 91: Diagrama de flujo final del dispositivo IoUT	74
Ilustración 92: Consumo del prototipo del dispositivo IoUT según el STM32CubeIDE	76
Ilustración 93: Prueba de recepción VLC hasta la tercera etapa de recepción.	78
Ilustración 94: Prueba de recepción desde la segunda etapa hasta la salida del receptor VLC.	79
Ilustración 95: Preparación de la prueba para evaluar la capacidad de comunicación VLC bajo agua dulce.....	80
Ilustración 96: Evaluación de la capacidad de comunicación VLC bajo agua dulce	80
Ilustración 97: Prueba de la correcta ejecución de la Estación Base	81
Ilustración 98: Prueba de la correcta ejecución del Dispositivo IoUT	82
Ilustración 99: Prueba de funcionamiento de los prototipos alimentados externamente	82
Ilustración 100: Distancia mínima de comunicación NFC documentada.....	83

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

Ilustración 101: Prueba de comunicación NFC al acercar las antenas de los prototipos.....	84
Ilustración 102: Distancia máxima de comunicación NFC documentada	84
Ilustración 103: Datos obtenidos por el lector NFC al acercar el tag dinámico NFC con el jumper en EH	85
Ilustración 104: Resultados de la recolección de energía a la distancia mínima documentada.....	85
Ilustración 105: Resultados de la recolección de energía a la distancia máxima documentada	86
Ilustración 106: Resultados de la recolección de energía situando las antenas perpendicularmente entre ellas.....	87
Ilustración 107: Peor registro de recolección de energía desplazando horizontalmente la antena del Dispositivo IoUT sobre el lector NFC.....	87
Ilustración 108: Mejor registro de recolección de energía desplazando horizontalmente la antena del Dispositivo IoUT sobre el lector NFC.....	88
Ilustración 109: PCB para la integración compacta del ST25DVxxKC.....	92
Ilustración 110: Antena milimétrica para el tag dinámico NFC	93
Ilustración 111: Diseño más compacto del receptor VLC.....	94

Dispositivo IoT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas
para seguimiento de peces en agua dulce

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I: Conexiones entre el NUCLEO-L476RG y el X-NUCLEO-NFC05A1	42
Tabla II: Conexiones entre el NUCLEO-L053R8 y el X-NUCLEO-NFC07A1	44
Tabla III: Conexiones de la interfaz USART2 del NUCLEO-L476RG	56
Tabla IV: Conexiones de la interfaz SPI2 del NUCLEO-L476RG	60
Tabla V: Conexiones de la interfaz I2C1 del NUCLEO-L053R8	65
Tabla VI: Conexiones de la interfaz SPI1 del NUCLEO-L053R8	70
Tabla VII: Presupuesto de recursos hardware	89
Tabla VIII: Presupuesto de recursos software	89
Tabla IX: Presupuesto de recursos humanos	90
Tabla X: Presupuesto total.....	90

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas
para seguimiento de peces en agua dulce

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas
para seguimiento de peces en agua dulce

Lista de acrónimos

AO	Amplificador Operacional
API	Interfaz de Programación de Aplicaciones
BSP	Paquete de Soporte para Placa
CE	Electrónica de Consumo
CLK	Reloj
EEPROM	Memoria de Solo Lectura Programable Borrable Eléctricamente
EH	Recolección de energía
GPO	Salida de Propósito General
GPIO	Entrada/Salida de Propósito General
HAL	Capa de Abstracción de Hardware
I ² C	Circuitos Integrados Interconectados
IDE	Entorno de Desarrollo Integrado.
IMU	Unidad de Medición Inercial
IoT	Internet de las Cosas
IoUT	Internet de las Cosas Submarinas
ISO	Organización Internacional de Normalización
IUMA	Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada
LED	Diodo Emisor de Luz
MAC	Control de Acceso al Medio
MISO	Entrada del Maestro y salida del Esclavo
MOSI	Salida del Maestro y entrada del Esclavo
MCU	Unidad de Microcontrolador
META	Máster en Electrónica y Telecomunicación Aplicadas
MLME	Entidad de Gestión de Capa MAC
NDEF	Formato de Intercambio de Datos NFC
NFC	Comunicación de Campo Cercano
NSS	Selección de Esclavo Negativa
NVIC	Controlador de Interrupción Vectorial Anidado
OWC	Comunicaciones Ópticas Inalámbricas

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas
para seguimiento de peces en agua dulce

OWPAN	Red Óptica de Área Personal Inalámbrica
PC	Computadora personal
IRQ	Interrupción
PCB	Placa de Circuito Impreso
PHY	Capa Física
PLME	Entidad de Gestión de Capa Física
RF	Radio Frecuencia
RFAL	Capa de Abstracción de Radio Frecuencia
RTOS	Sistema Operativo en Tiempo Real
SCL	Reloj del sistema
SCLK	Señal de reloj
SDA	Datos serie
SPI	Interfaz Periférica en Serie
TFM	Trabajo de Fin de Máster
TFT	Trabajo de Fin de Título
TIA	Amplificador de Transimpedancia
UART	Receptor/Transmisor Asíncrono Universal
ULPGC	Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
URI	Identificador de Recurso Uniforme
USART	Receptor y Transmisor Serie Universal Sincrónico y Asíncrono
USB	Bus Serie Universal
VLC	Comunicaciones de luz visible

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas
para seguimiento de peces en agua dulce

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

En [1], [2] se desarrolla el valor del Internet de las Cosas (IoT) para explorar y monitorear la superficie terrestre de la Tierra, pero también se desarrolla la importancia del Internet de las Cosas Subacuáticas (IoUT). Este último se considera una de las tecnologías revolucionarias actuales, no solo en el caso de la exploración oceánica, sino también para el mantenimiento de la biodiversidad.

En el contexto de la electrónica de consumo (CE), la tecnología IoUT está recibiendo mucha atención. Actualmente, existen dispositivos submarinos inteligentes en redes IoUT, como drones y cámaras autónomas, que pueden ser controlados y accedidos digitalmente desde cualquier ubicación en la costa o mar adentro. Muchas empresas de todo el mundo están fabricando dispositivos electrónicos que se adaptan gradualmente al paradigma IoUT.

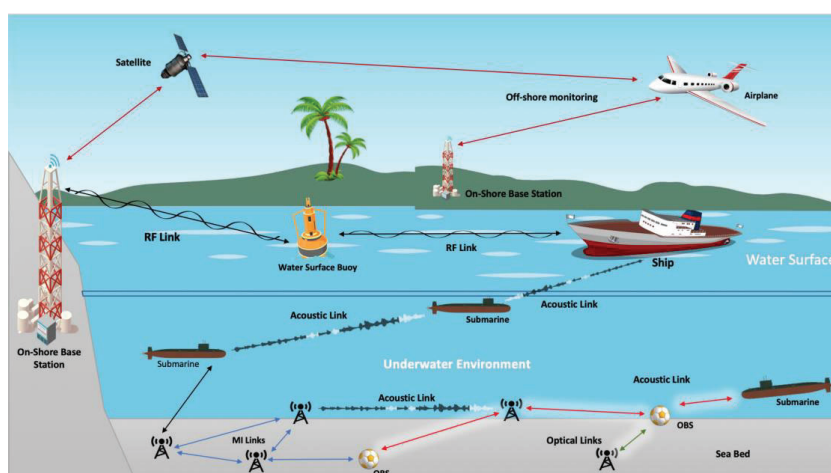


Ilustración 1: Arquitectura básica para IoUT [2]

En este trabajo de fin de máster se estudia, diseña e integra un prototipo de dispositivo IoUT capaz de implementar múltiples medios de comunicación con un prototipo de la estación base, en la que el dispositivo IoUT puede ser recargado inalámbricamente.

En [3], [4] se argumenta que, en la actualidad, se están considerando enlaces ópticos para comunicaciones submarinas de alta velocidad a cortas distancias ($\ll 100$ m). Para predecir el rendimiento de estos enlaces, se requiere un sólido entendimiento de cómo las propiedades ópticas inherentes del agua afectan la señal óptica codificada. Particularmente, el impacto de la dispersión debido a partículas del medio subacuático, entre muchas otras.

Dada la naturaleza dinámica de los entornos submarinos, el conocimiento de la dependencia angular de la luz dispersada hacia adelante es otra característica fundamental para determinar los requisitos de apuntamiento y seguimiento, así como la relación señal-ruido general para VLC.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

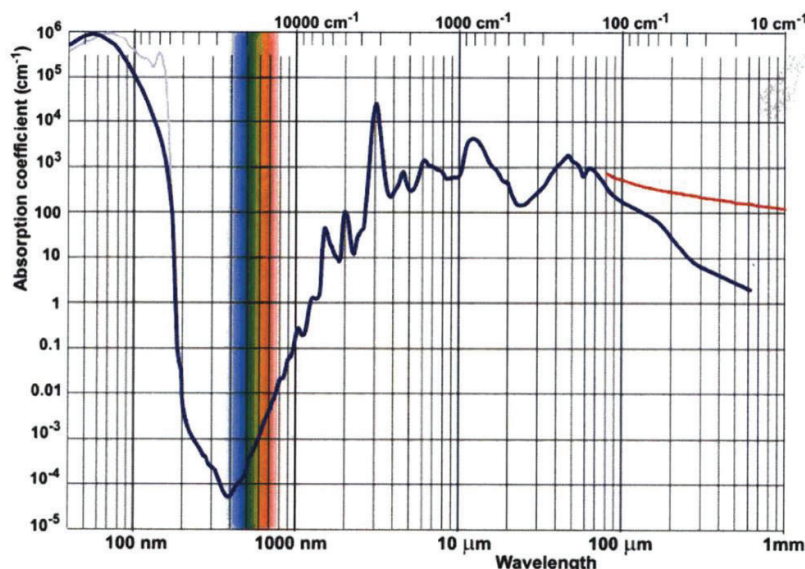


Ilustración 2: Coeficiente de absorción de radiación electromagnética a varias longitudes de onda [4]

En este trabajo se estudia un sistema de comunicación VLC para permitir la comunicación inalámbrica entre el dispositivo IoUT, bajo agua dulce, y la estación base, en tierra. El medio subacuático seleccionado ha sido agua dulce por ser uno de los entornos submarinos menos agresivos con la propagación de la luz.

No se pretende la implementación de un prototipo electrónico concreto, sino que se estudian las posibilidades de la implantación de este sistema para demostrar su funcionalidad e indicar los posibles campos de aplicación del prototipo.

En [5], [6] se encuentra mucha información sobre los sistemas RFID. No obstante, la comunicación de campo cercano (NFC) no es un sistema RFID, sino una interfaz inalámbrica de datos entre dispositivos, similar al infrarrojo o al Bluetooth. Sin embargo, esta tecnología tiene varias características relacionadas con los sistemas RFID.

La transmisión de datos entre dos interfaces NFC utiliza campos magnéticos alternantes en el rango de frecuencia de 13.56 MHz. El rango máximo de comunicación para la transmisión de datos NFC es relativamente reducido (típicamente de 20 cm) y puede permitir la transferencia inalámbrica de energía.

La siguiente ilustración representa el principio físico de la transmisión de datos entre dos interfaces NFC. En general, las transmisiones NFC tienen un transmisor de 13.56 MHz y un receptor de la misma frecuencia que están conectados alternativamente a la antena.

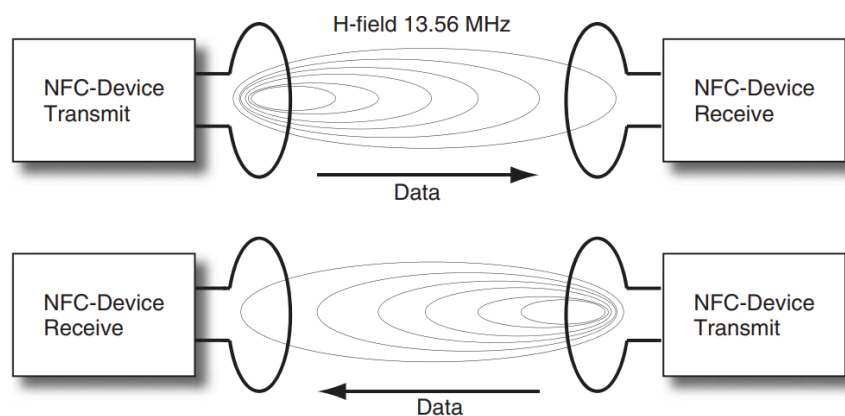


Ilustración 3: Principio físico de la transmisión de datos entre dos interfaces NFC [6]

Para la comunicación entre dos interfaces NFC, una de ellas puede asumir diferentes funciones,

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

la de un iniciador NFC (dispositivo maestro o “reader”) o un objetivo NFC (dispositivo esclavo o “tag”).

En este proyecto, también se utiliza esta tecnología para el estudio de la comunicación entre el dispositivo IoUT y la estación base, estando ambos juntos y fuera del agua. De esta manera, se pretende conseguir un medio de comunicación robusto entre ambos elementos que, además, permita la recarga inductiva del dispositivo IoUT.

Cabe destacar que, en este TFM no se tenido en cuenta una fuente de alimentación determinada, se diseña el dispositivo IoUT de manera que sea lo más compacto posible y que consuma lo mínimo e indispensable para que realice las funciones con las que se ha desarrollado para este proyecto.

Por otro lado, en [7]–[10] se disponen algunas referencias sobre la experiencia del grupo de investigación del IUMA en la fabricación de dispositivos para peces, utilizando técnicas de diseño vanguardistas para implementar dispositivos compactos de bajo consumo y capacidad de comunicación inalámbrica.

1.2 OBJETO DEL TRABAJO

El objetivo final de este TFM es obtener un dispositivo IoUT capaz de comunicarse inalámbricamente dentro y fuera de agua dulce. Los objetivos planteados para este proyecto son los siguientes:

- **O1.** Estudio del arte de tecnologías para el diseño e implementación de los sistemas de comunicación, selección de la tecnología final y la familia de microcontroladores a emplear.
- **O2.** Diseño del software necesarios para establecer el protocolo de comunicaciones estudiado.
- **O3.** Pruebas de funcionamiento de los sistemas de comunicaciones implementados en los prototipos finales.
- **O4.** Estudio del sistema de alimentación por inducción electromagnética de la tecnología NFC del proyecto.
- **O5.** Estudio del consumo energético del sistema final para su optimización.
- **O6.** Estudio y diseño del software necesarios para optimizar el consumo energético del dispositivo IoUT final.
- **O7.** Pruebas de funcionamiento del sistema de alimentación implementado en el dispositivo final.
- **O8.** Evaluar y documentar el trabajo realizado.

Para este trabajo, el dispositivo final es un prototipo constituido por un conjunto de placas de prueba que permitirán evaluar las prestaciones del diseño y demostrar los objetivos cumplidos.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

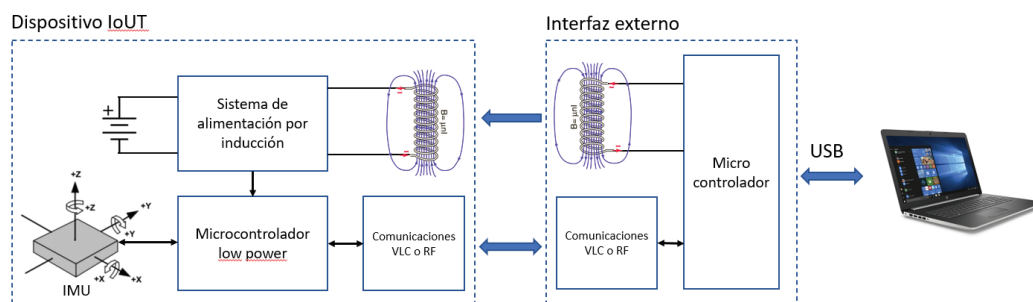


Ilustración 4: Esquema del sistema final de este TFM.

1.3 PETICIONARIO

El peticionario de este trabajo de fin de título es el Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada (IUMA) de la ULPGC con el fin de evaluar la asignatura Trabajo de Fin de Máster incluida en el plan de estudios del Máster en Electrónica y Telecomunicación Aplicadas (META).

1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

En este primer apartado se detallan los antecedentes que han conllevado la elaboración de este trabajo. Además, incluye el propósito de este TFM y sus objetivos.

En el segundo apartado se introducen los aspectos teóricos de las tecnologías que se utilizan en este proyecto para implementar las funciones que realizan los prototipos finales.

El tercer apartado va dirigido a describir el proceso del diseño del hardware. Para ello, se contempla el diseño de los prototipos desde la selección de componentes, hasta la fabricación de los prototipos y su integración con el resto de los elementos en los que se basa este TFM.

En el cuarto apartado se argumenta el diseño de la solución software para este proyecto. Con este fin, se contemplan los recursos necesarios para desarrollar la solución adoptada en este trabajo, las pautas que se han seguido y el código utilizado.

En el quinto apartado se describen las pruebas que se han realizado para comprobar la operatividad de los prototipos y las distintas tecnologías que implementan.

El sexto apartado incluye el presupuesto de este TFM basado en los recursos hardware, software y humanos requeridos para completar este trabajo.

En el séptimo apartado se expresan las conclusiones a las que se ha llegado tras completar el proyecto y se incluyen algunas opciones para trabajos futuros que mejoren el diseño final.

2 ESTADO DEL ARTE

En este apartado se describen las tecnologías de comunicación y de control que se pretenden implementar en este proyecto. Además, se introducen las herramientas de desarrollo software y hardware requeridas para este trabajo.

2.1 VLC

Un buen resumen de las comunicaciones mediante luz visible se encuentra disponible en [11], donde se comenta la revolución que ha surgido a partir de la iluminación de estado sólido. De esta revolución surgieron los LED, los cuales destacan debido a su eficiencia energética extremadamente alta. Además, los LED tienen otras ventajas, como una vida útil más larga, menor generación de calor y una mejora en la reproducción del color sin utilizar sustancias químicas dañinas.

Otro beneficio de los LED es que son capaces de cambiar a diferentes intensidades de luz a alta velocidad. Esta funcionalidad ha dado lugar a una nueva tecnología de comunicación, conocida como comunicación de luz visible o VLC. Con esta tecnología las luminarias LED se pueden utilizar para la transferencia de datos a alta velocidad, aunque para ello es necesario disponer de un receptor capaz de transformar la radiación lumínica en una corriente eléctrica interpretable por la electrónica existente, como puede ser un fotodetector.

No obstante, la tecnología VLC implica un conocimiento adecuado de las propiedades de la capa física del canal de comunicación de luz visible, los métodos de modulación posibles y las técnicas de comunicación implementables, entre otros conocimientos.

En [12] se encuentra el estándar del IEEE para las comunicaciones mediante luz visible. Este estándar define una capa física (PHY) y una subcapa de control de acceso al medio (MAC) para comunicaciones ópticas inalámbricas (OWC) de corto alcance en medios ópticamente transparentes utilizando longitudes de onda de luz desde 10 000 nm hasta 190 nm.

El estándar es capaz de ofrecer tasas de datos suficientes para admitir servicios multimedia de audio y video, y también considera la movilidad del enlace óptico, la compatibilidad con diversas infraestructuras de luz, los impedimentos debidos al ruido e interferencia de fuentes como la luz ambiental, y una subcapa MAC que se adapta a las necesidades únicas de los enlaces visibles, así como a las otras longitudes de onda de luz objetivo.

También se acomodan comunicaciones ópticas para cámaras donde los dispositivos transmisores incorporan fuentes de luz emisora y los receptores son cámaras digitales con lente y sensor de imagen. Además, el estándar cumple con las regulaciones de seguridad ocular aplicables.

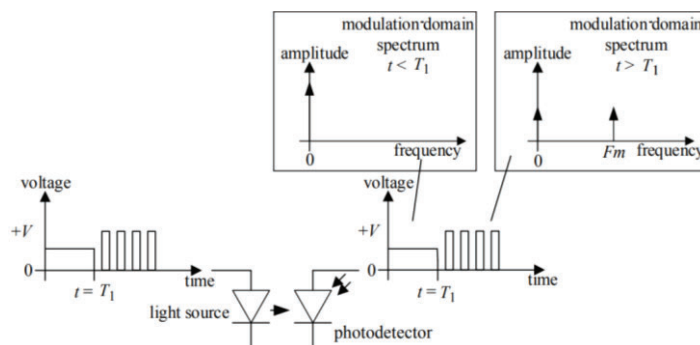


Ilustración 5: Ilustración del espectro en el dominio de la modulación [12]

En la Ilustración 5 se refleja una transmisión de datos típica entre un transmisor de luz (como un

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

LED) y un receptor de luz (un fotodetector o un sensor de cámara). Sin embargo, el estándar IEEE 802.15.7 no tiene en cuenta el medio en el que se realizan las transmisiones de luz.

En [13]–[15] se encuentran varios estudios sobre los medios de agua dulce y sus efectos sobre diferentes tipos de comunicación (acústicos, RF u ópticos). Sin embargo, dado que en este proyecto se pretende implementar comunicaciones ópticas bajo agua dulce utilizando los mínimos recursos posibles, es necesario estudiar la capacidad de transmisión de datos mediante VLC del dispositivo IoUT.

2.2 NFC

La Comunicación de Campo Cercano (NFC por sus siglas en inglés) nació como un subconjunto especializado de la tecnología RFID de 13.56 MHz en 2002. Esta tecnología fue inicialmente utilizada para el control de acceso y tarjetas de pago en el transporte público, su integración en otro tipo de tarjetas y teléfonos inteligentes está impulsando un rápido crecimiento no solo en el ámbito de los pagos inalámbricos, sino también como un enlace de radio siempre activo para emparejamiento sencillo, lectura de diagnóstico y programación de parámetros entre otras opciones.

Por otra parte, en [16] se encuentran todas las especificaciones, entre otros documentos, de la tecnología NFC. No obstante, estos recursos no están disponibles para cualquier usuario, ya que para poder acceder a las especificaciones de NFC de esta plataforma es necesario pagar por dichos documentos. En la siguiente ilustración se puede observar que, el alumno registrado como estudiante de la ULP GC, no puede acceder a estos recursos de la plataforma de NFC FORUM:

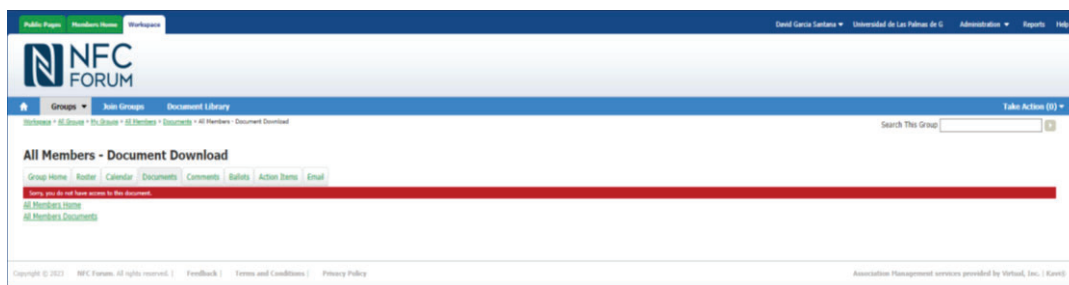


Ilustración 6: Denegación de acceso a las especificaciones de la plataforma de NFC FORUM [16]

A pesar del impedimento anterior, en [17]–[21] se encuentran múltiples publicaciones de interés, junto a las mencionadas anteriormente, de las que se puede obtener la información necesaria como para implementar la tecnología NFC necesaria para este proyecto.

Además, en [22] la compañía STMicroelectronics proporciona una buena descripción de esta tecnología y otros recursos disponibles gratuitamente para cualquier usuario que visite su plataforma online. Esto se debe a que esta compañía es una de las pioneras en tecnología RFID y NFC, ofreciendo una amplia gama de productos de alta frecuencia para RFID/NFC, cubriendo todas las necesidades de aplicaciones NFC.

Los dispositivos que oferta dicha compañía incluyen etiquetas NFC/RFID, etiquetas NFC dinámicas, lectores NFC/RFID y controladores NFC, incluyendo elementos de seguridad para aplicaciones NFC seguras y otras soluciones.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce



Ilustración 7: Algunos tags NFC en comparación con monedas y botones (NFC Forum, 2023)

STMicroelectronics es uno de los principales proveedores de esta tecnología y dispone de una cartelera de productos bastante completa. Por ello, en este proyecto se utilizan algunos de sus productos, descritos más adelante.

2.3 STMICROELECTRONICS

Como se introducía anteriormente, STMicroelectronics dispone de una gran variedad de productos diseñados para temas como la movilidad inteligente, la gestión de la energía y potencia, IoT y la conectividad, herramientas de diseño y herramientas de desarrollo.

En [23] se encuentra la ventana principal de la plataforma de la compañía. Ésta proporciona información sobre la compañía, incluyendo sus productos, esfuerzos de sostenibilidad, eventos próximos y oportunidades laborales, entre otros recursos.

En este proyecto se han utilizado varias plataformas de desarrollo y otros dispositivos de STMicroelectronics para las tareas de control y comunicación. Los productos utilizados en el desarrollo de este trabajo se describen más adelante.

2.3.1 MICROCONTROLADOR

En este trabajo se pretende estudiar el prototipo de un dispositivo IoUT y de una estación base capaces de comunicarse entre ellos. Además, cada uno deberá controlar sus recursos y funciones para la aplicación planteada en este proyecto.

Por tanto, en este TTF se ha decidido utilizar las placas de desarrollo mencionadas más adelante. Dichas plataformas han sido seleccionadas, principalmente, por sus buenas prestaciones de bajo consumo, lo que las hace idóneas para este tipo de aplicaciones.

- En [24] se encuentra toda la información relacionada con el STM32L053R8. Este microcontrolador se incluye en el NUCLEO-L053R8 disponible en [25]. Este núcleo es una placa de desarrollo que se utiliza en este TFM para controlar el dispositivo IoUT.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

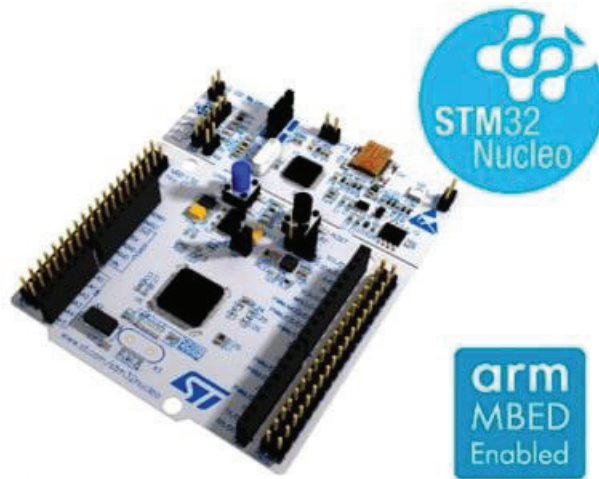


Ilustración 8: NUCLEO-L053R8 [25].

De este modo, el núcleo seleccionado es el responsable del control de la alimentación, la adquisición de datos, las comunicaciones VLC, las comunicaciones y la recarga inductiva mediante NFC para el prototipo del dispositivo IoUT.

- En [26] se disponen diversos recursos sobre el STM32L476RG. Este microcontrolador se encuentra en el NUCLEO-L476RG disponible en [27]. Dicho producto es una placa de desarrollo que se requiere en este proyecto para controlar la estación base y sus funciones. Las cuales consistirán en recopilar los datos provenientes del dispositivo IoUT, recargarlo inductivamente y presentar los datos para el usuario.

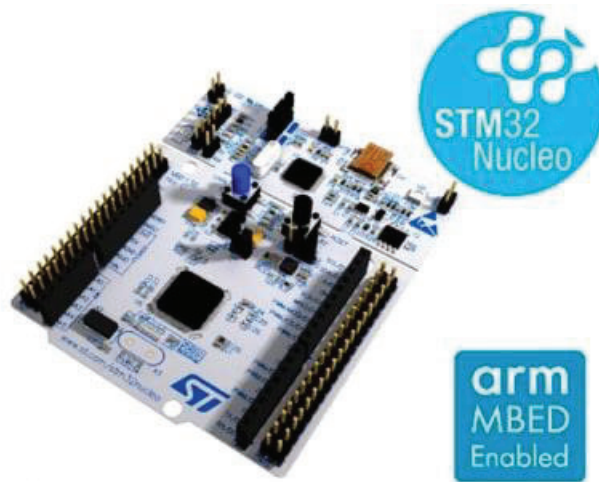


Ilustración 9: NUCLEO-L476RG [27].

Los microcontroladores mencionados en este subapartado pertenecen a la compañía mencionada al comienzo de este apartado. Los microcontroladores de la familia STM32Lx destacan, entre otros aspectos, por su reducido tamaño, sus altas prestaciones y su bajo consumo. Los núcleos que los integran ofrecen una plataforma de desarrollo que facilita el uso y test de las funciones configuradas desde la programación hasta la integración hardware.

2.3.2 ST25 NFC / RFID TAGS & READERS

En [28] se encuentra la serie de productos ST25 de STMicroelectronics. Estos son dispositivos que permiten la comunicación sin contacto utilizando tecnología de semiconductores avanzada. Con interfaz de alta frecuencia de 13.56 MHz, estos tags se basan en estándares como ISO 14443 Type A, ISO 15693, NFC Forum Type 4 y Type 5. Dichos dispositivos se utilizan en varias

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

industrias para mejorar la eficiencia en procesos como seguimiento de inventario y gestión de acceso.

Los tags y readers NFC, también conocidos como etiquetas y lectores de comunicación inalámbrica de corto alcance, son dispositivos que permiten la transferencia de datos sin contacto físico entre dispositivos.

Esta tecnología se basa en la interacción entre un tag o etiqueta, que es un chip integrado en una pequeña antena, y un lector NFC, que es un dispositivo que puede leer y escribir información en los tags.

En [29] se encuentra una presentación donde se explica brevemente qué son los productos de la familia ST25. En la siguiente ilustración se presentan los 3 tipos de productos disponibles en la comunicación NFC:

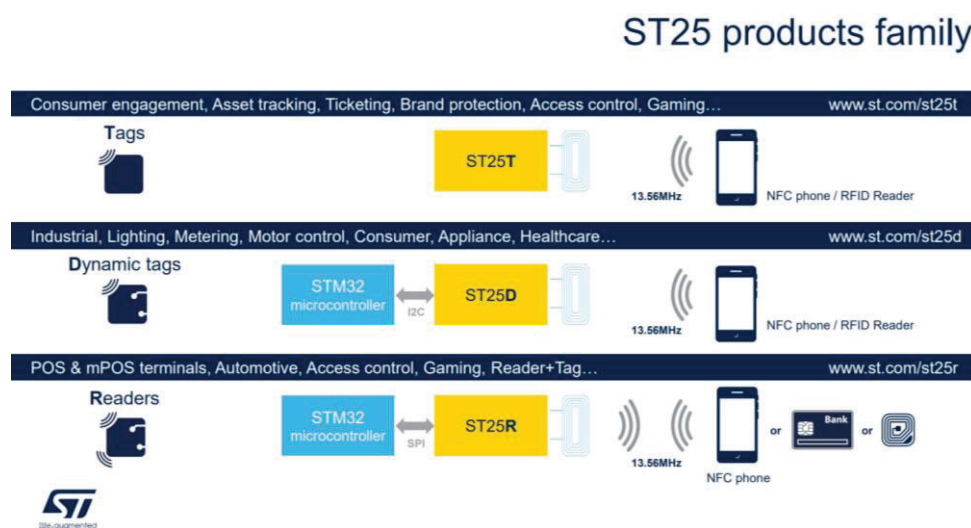


Ilustración 10: Productos de la familia ST25 [29].

En las subsecciones siguientes se introducen los productos que se van a utilizar para la comunicación NFC.

2.3.2.1 LECTOR NFC: X-NUCLEO-NFC05A1

A la hora de diseñar la estación base necesaria para este trabajo, primero ha sido necesario decidir el dispositivo utilizado para implementar el lector NFC. Para ello, se ha seleccionado el ST25R3911B disponible en [30], este dispositivo está orientado para el lado de la infraestructura del sistema NFC, donde los usuarios necesitan un rendimiento óptimo de RF y flexibilidad combinados con un bajo consumo de energía.

Además, el ST25R3911B incluye varias características que lo hacen muy adecuado para aplicaciones de bajo consumo de energía. Contiene un sensor capacitivo de bajo consumo que se puede utilizar para detectar la presencia de una tarjeta sin activar el campo del lector. La presencia de una tarjeta también se puede detectar realizando una medición de la amplitud o fase de la señal en el tanque LC de la antena y comparándola con la referencia almacenada.

También contiene un oscilador RC de bajo consumo y un temporizador de activación que se puede utilizar para despertar el sistema después de un período de tiempo definido y para comprobar la presencia de una etiqueta usando una o más técnicas de detección de bajo consumo (capacitiva, fase o amplitud).

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

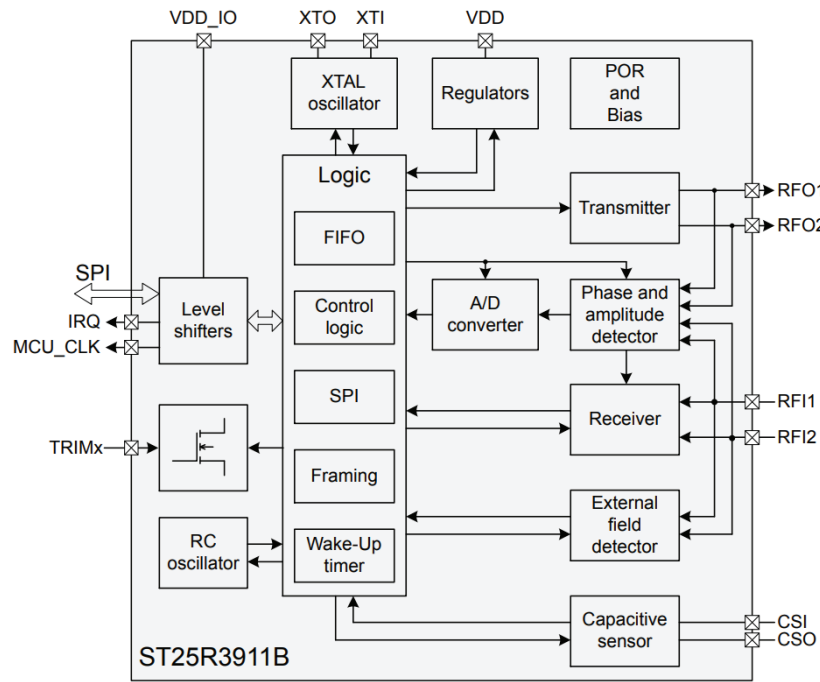


Ilustración 11: Diagrama de bloques del ST25R3911B [30]

El dispositivo anterior se ha incluido en este proyecto debido a su capacidad para actuar como lector NFC, su bajo consumo y altas prestaciones, entre otros aspectos. Además, debido a la necesidad de introducir el ST25R3911B en el proyecto, se ha decidido utilizar la plataforma de expansión X-NUCLEO-NFC05A1 de STMicroelectronics disponible en [31].

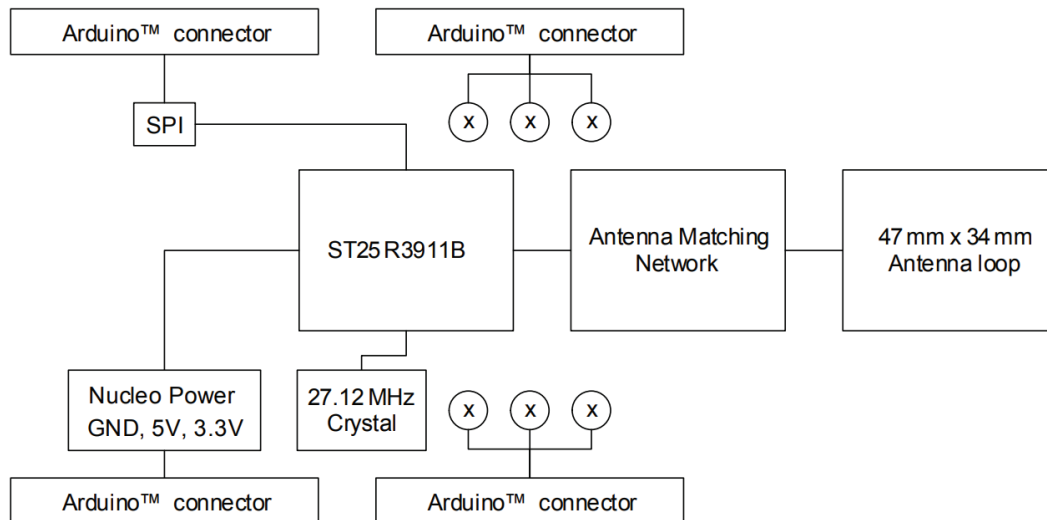


Ilustración 12: Diagrama de bloques funcional del X-NUCLEO-NFC05A1 [31]

Este producto está diseñado para poder insertarse en otra placa de desarrollo compatible, integra los elementos necesarios para implementar la tecnología NFC e, incluso, permite recargar inductivamente los dispositivos NFC compatibles.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

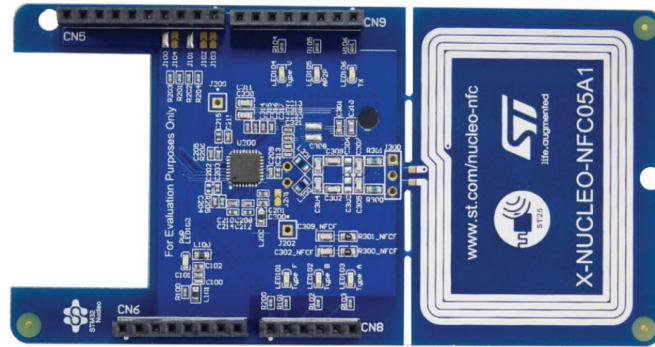


Ilustración 13: Placa de expansión X-NUCLEO-NFC05A1 [31].

Este núcleo es una pieza clave de este proyecto ya que permite que la estación base pueda leer los datos recogidos por el dispositivo IoUT mediante NFC y recargarlo inductivamente. Esta placa se ha seleccionado, principalmente, debido a que integra la electrónica necesaria para implementar la tecnología NFC. Además, su diseño también incluye una antena capaz soportar la lectura y escritura de los 5 tipos de tags definidos por NFC Forum.

2.3.2.2 TAG DINÁMICO NFC: X-NUCLEO-NFC07A1

En este proyecto, las funciones NFC requeridas para el dispositivo IoUT se traducen en su diseño como tag dinámico. Esto se debe a que el dispositivo debe ser capaz de modificar los datos a transferir y debe ser capaz de gestionar la energía recibida mediante la recarga inductiva.

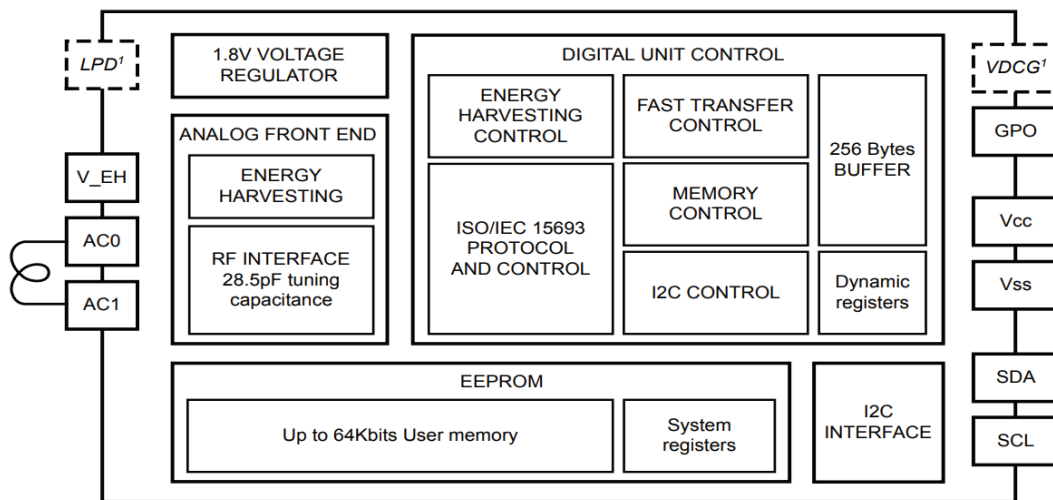


Ilustración 14: Diagrama de bloques del ST25DVxxKC [32]

El producto de la familia ST25DVxxKC escogido para este trabajo, es el tag dinámico ST25DV64KC, cuya documentación y otros recursos se pueden encontrar en [32]. Este es un dispositivo RFID NFC que ofrece 4 Kbit de EEPROM.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

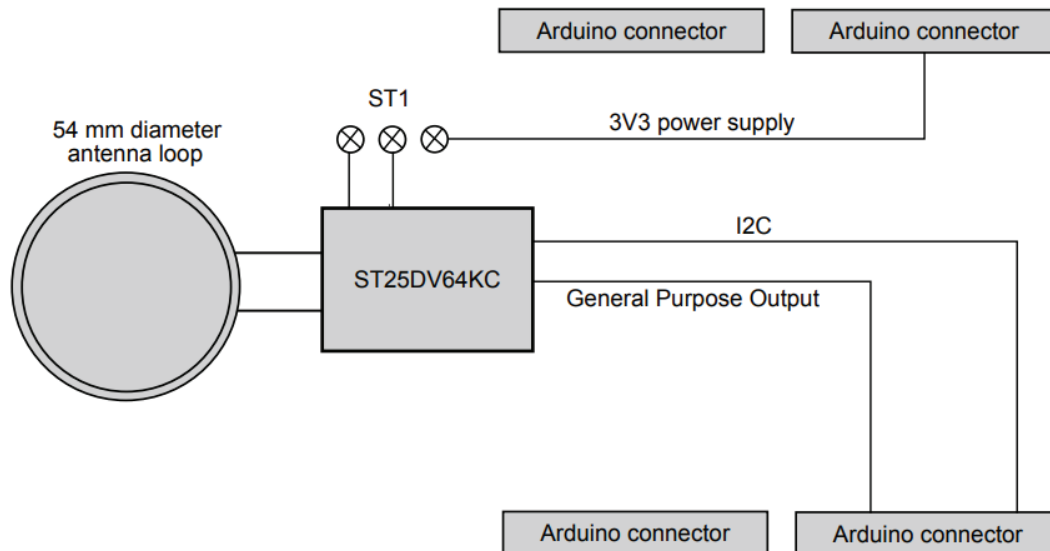


Ilustración 15: Diagrama de bloques funcional del X-NUCLEO-NFC07A1 [33]

Cuentan con dos interfaces, un enlace serie I²C que puede ser operado desde una fuente de alimentación de corriente continua, y un enlace RF activado cuando el dispositivo actúa como memoria sin contacto alimentada por la onda electromagnética de la portadora recibida.



Ilustración 16: Esquema de los dispositivos ST25DVxxKC [22].

Dicho dispositivo ofrece un modo de transferencia rápida entre los mundos RF y de contacto. Además, el pin GPO proporciona datos sobre eventos entrantes, como la detección de campo RF, la actividad RF en curso o la disponibilidad de mensajes en el buzón. También dispone de una función de recolección de energía, cuando las condiciones externas lo permiten.

Para este proyecto, se ha decidido utilizar el X-NUCLEO-NFC07A1 disponible, junto a múltiples recursos y documentos sobre la plataforma, en [33]. Esta plataforma de extensión puede combinarse con el NUCLEO-L053R8 para proporcionarle la capacidad de comunicación NFC necesaria para que actúe como un tag dinámico.

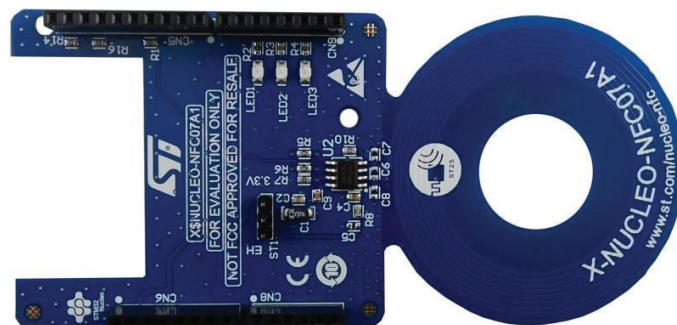


Ilustración 17: X-NUCLEO-NFC07A1.

Esta placa proporciona los elementos necesarios para, junto al lector NFC del apartado anterior, implementar la comunicación NFC. Esto se consigue, entre otros aspectos, gracias a que la antena

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

que incorpora está diseñada para que pueda actuar como un tag dinámico tipo 5 bajo la normativa de NFC Forum.

2.3.3 STM32CUBE

En [34] se presentan los paquetes STM32Cube MCU y MPU, estos forman parte de la iniciativa STM32Cube. De manera que se ofrecen, para cada serie de MCUs y MPUs STM32, todos los componentes de software integrados necesarios para operar el conjunto disponible de periféricos.

La capa de abstracción de hardware (HAL) definida por el fabricante permite la portabilidad entre diferentes dispositivos STM32 mediante llamadas de API estandarizadas. APIs de bajo nivel (LL), un conjunto de APIs ligero, optimizado y orientado a expertos diseñado para lograr un rendimiento y eficiencia en tiempo de ejecución óptimos.

Además, para las STM32 MPUs, los controladores BSP se basan en los controladores HAL y proporcionan un conjunto de API para la placa de evaluación y componentes de terceros. En este proyecto, las herramientas software utilizadas para implementar la estación base y el dispositivo IoUT, son las descritas en las siguientes subsecciones.

2.3.3.1 STM32CUBEMX

STM32CubeMX es una herramienta gráfica propia de STMicroelectronics, disponible para todos los usuarios en [35], que permite una configuración muy sencilla de microcontroladores y microprocesadores STM32.

Así como la generación del código de inicialización correspondiente en lenguaje C para el núcleo Arm® Cortex®-M o un árbol de dispositivos parcial de Linux® para el núcleo Arm® Cortex®-A, a través de un proceso paso a paso.



Ilustración 18: STM32CubeMX [35].

En el apartado 4 se describe la utilización de este recurso durante el desarrollo de este trabajo.

2.3.3.2 STM32CUBEIDE

En [36] se encuentra la herramienta software STM32CubeIDE, una plataforma avanzada de desarrollo en C/C++ con características de configuración de periféricos, generación de código, compilación de código y depuración para STM32.

STM32CubeIDE integra las funcionalidades de configuración de STM32 y creación de proyectos de STM32CubeMX para ofrecer una experiencia de herramienta todo en uno y ahorrar tiempo en la instalación y desarrollo. Tras seleccionar un microcontrolador o microprocesador STM32 vacío o preconfigurado, se crea el proyecto y se genera automáticamente el código de inicialización.

Además, STM32CubeIDE incluye funciones de depuración estándar y avanzadas que incluyen vistas de los registros del núcleo de la CPU, memorias y registros de periféricos, así como la

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

visualización en tiempo real de variables, la interfaz Serial Wire Viewer o el analizador de fallos.



Ilustración 19: STM32CubeIDE [36].

En este proyecto se utiliza STM32CubeIDE para implementar el software requerido para conseguir los objetivos de este trabajo. Más adelante, se describe con mayor detalle los recursos introducidos en esta herramienta y su manipulación para obtener el resultado final.

2.4 SW4STM32

La cadena de herramientas System Workbench, denominada SW4STM32, es un entorno de desarrollo de software gratuito multiplataforma basado en Eclipse, que admite la gama completa de microcontroladores STM32 y placas de desarrollo o extensión asociadas.

La cadena de herramientas SW4STM32 se puede encontrar junto diversos foros, blogs y capacitaciones para soporte técnico en [37], [38]. No obstante, para poder descargar este entorno de desarrollo en [38], es necesario que el usuario quede registrado en este sitio web. Una vez registrado, cualquier usuario puede acceder a las instrucciones de instalación incluidas en la página web para proceder con la descarga de la cadena de herramientas gratuita.

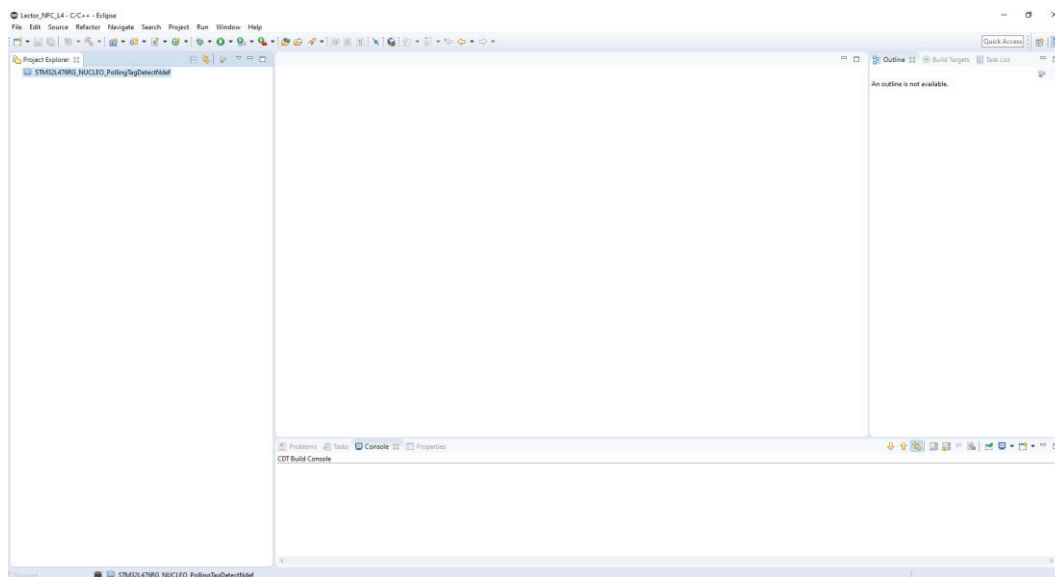


Ilustración 20: Ventana principal del SW4STM32

Este producto es suministrado y desarrollado por AC6, un tercero no afiliado a ST. Por ello, para obtener la información más reciente sobre las especificaciones de SW4STM32 se recomienda consultar el sitio web de AC6 disponible en [39].

Además, SW4STM32 es un producto que cuenta con el sello MadeForSTM32. Esta es una etiqueta de calidad entregada por ST, después de un proceso de evaluación propio de la compañía. Para indicar que este producto va dirigido a los microcontroladores STM32 y su ecosistema

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

2.5 KICAD 7.0

Para la realización de este TFM se ha optado por la utilización de herramientas de diseño de circuitos impresos gratuitas, pero que dispongan de las prestaciones necesarias para los objetivos de diseño requeridos. Una vez evaluadas las distintas opciones disponibles se ha optado por la herramienta KiCad 7.0.

En [40] se encuentra la plataforma online de KiCad. Esta compañía ofrece al público su software KiCad 7.0 gratuito, para el diseño de circuitos electrónicos y placas de circuito impreso de código abierto. Incluye una suite de herramientas integradas para la creación de esquemas, diseño de PCB, gestión de librerías y más.

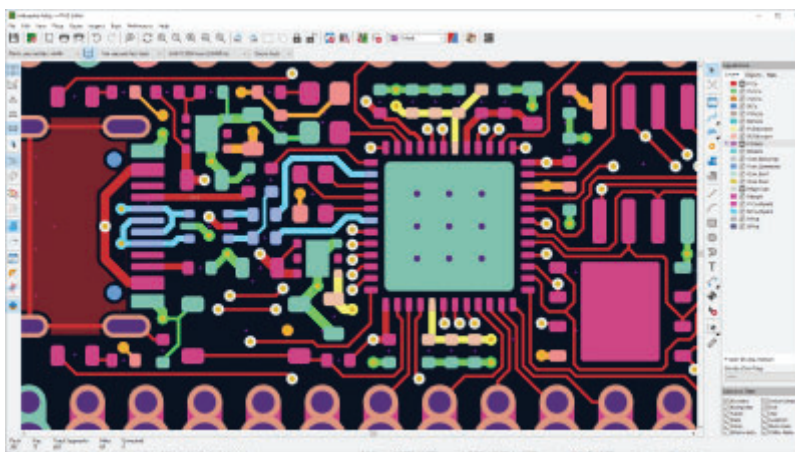


Ilustración 21: Ejemplo de PCB en KiCad 7.0 [40]

La aplicación de diseño de esquemas integrada en KiCad ofrece todas las funciones necesarias para dibujar circuitos, controlarlos, gestionar librerías y acceder al software de diseño de circuitos impresos.

Por otro lado, el editor de PCB ofrece una amplia gama de opciones de personalización, incluyendo la representación de capas físicas de cobre en una placa, así como capas gráficas para la definición de características como la serigrafía, la máscara de soldadura y otras.



Ilustración 22: Ventana principal de KiCad 7.0.

Este software se utiliza en este proyecto para llevar a cabo el diseño del hardware necesario para implementar el prototipo del dispositivo IoUT y el receptor de VLC.

3 ESTUDIO DE LA SOLUCIÓN HARDWARE

En este apartado, se pretende estudiar la solución hardware adoptada para combinar la tecnología de comunicación inalámbrica utilizada en este proyecto y obtener el prototipo final. Sin embargo, la solución proporcionada en este trabajo se divide en dos prototipos.

- Prototipo del dispositivo IoUT, debe ser capaz de transmitir los datos recopilados a la estación base mediante transmisiones de luz. Además, dispondrá de la tecnología NFC para actuar como tag dinámico, siendo posible la comunicación con la estación base y la recarga inductiva del prototipo, cuando esté situado sobre el lector NFC de la estación.
- Prototipo de la estación base, dispondrá de un receptor especializado para las comunicaciones VLC, pudiendo recibir los datos transmitidos por el primer prototipo. Además, incluye un lector NFC para obtener los datos recogidos por el dispositivo IoUT y recargarlo inductivamente.

Con los recursos hardware comentados en el apartado anterior se pretende demostrar la funcionalidad de la tecnología mencionada. Sin embargo, tras estudiar sus características y operatividad, se ha llegado a la conclusión de que el dispositivo IoUT y la estación base deben basarse en los diagramas de bloques siguientes:

- Diagrama de bloques del dispositivo IoUT:

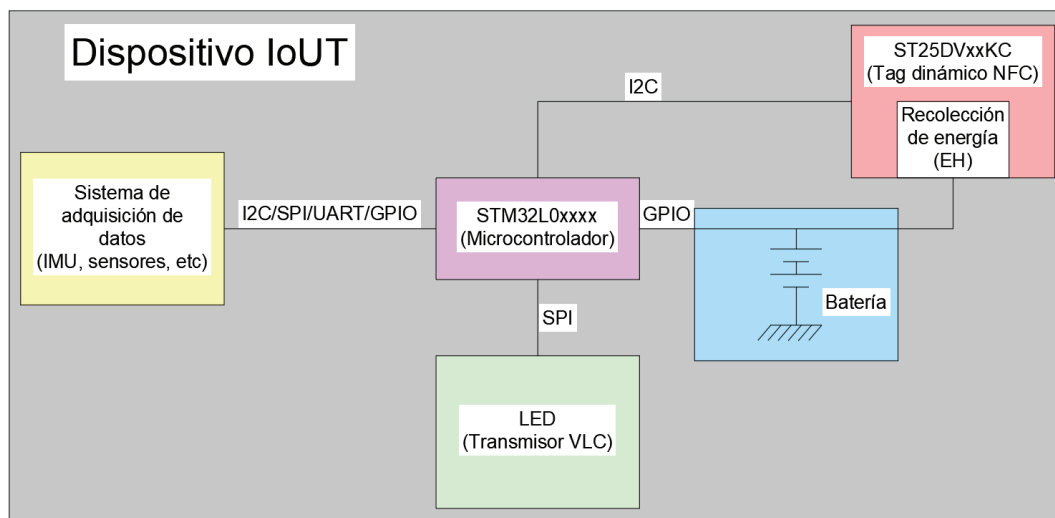


Ilustración 23: Diagrama de bloques del dispositivo IoUT

- Diagrama de bloques de la estación base:

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

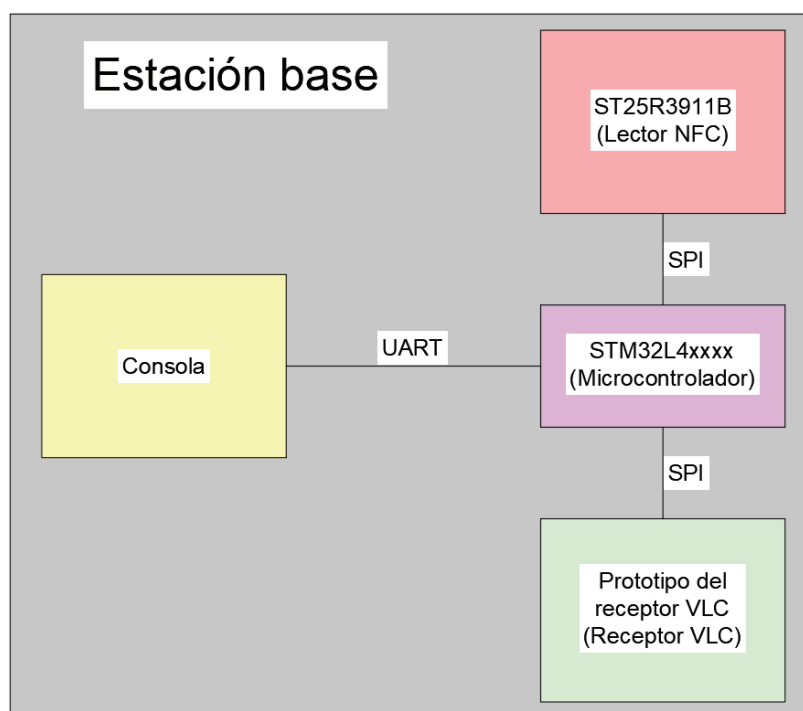


Ilustración 24: Diagrama de bloques de la estación base

En la ilustración siguiente se representan los elementos básicos de los que están compuesto el dispositivo IoUT y la estación base planteados en este proyecto, así como su función.

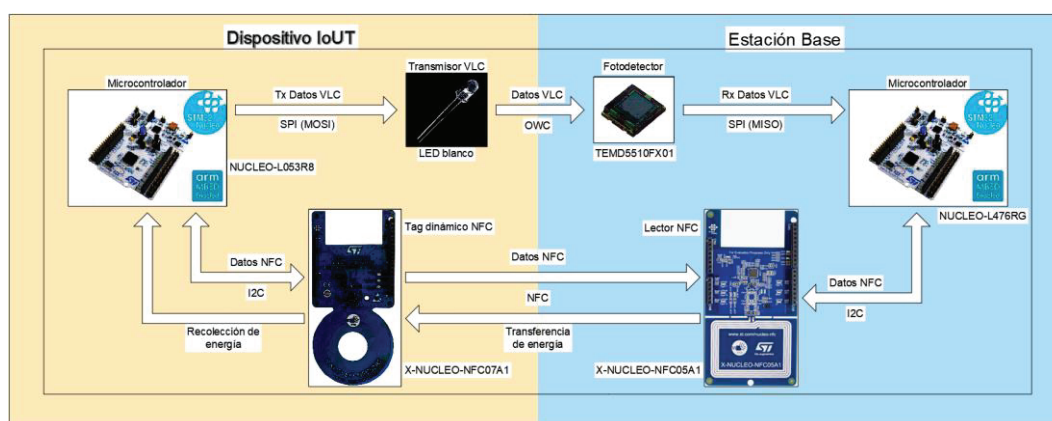


Ilustración 25: Esquema de los prototipos finales

Sin embargo, para alcanzar la capacidad operativa que se representa en la ilustración anterior. Es necesario dividir la solución hardware adoptada para implementar la tecnología necesaria para los diferentes medios de comunicación. El estudio e implementación de estas tecnologías de comunicación se describen en los subapartados desglosados más adelante.

3.1 ESTUDIO DE LAS COMUNICACIONES VLC

En primer lugar, se ha comenzado desarrollando el hardware necesario para implementar y probar las comunicaciones mediante luz visible. Como se menciona anteriormente, este tipo de comunicaciones necesitan de, al menos, dos interlocutores. Siendo uno quien inicia la transmisión de datos, mientras que el otro interlocutor recibe la información enviada.

Con esta premisa, se ha planteado la solución hardware de VLC de manera que exista un dispositivo receptor y otro transmisor. Se pretende implementar un sistema de comunicaciones punto a punto simple mediante luz visible. Es decir, se utilizará un transmisor, conectado al

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

dispositivo IoUT, para transmitir un bloque de datos al receptor VLC, que forma parte de la estación base.

3.1.1 TRANSMISOR VLC

A partir de un estudio previo, se ha optado por que el transmisor para las comunicaciones por luz visible sea un LED blanco de inserción conectado al NUCLEO-L053R8, a través del puerto MOSI de la interfaz SPI, para transmitir un bloque de datos.

Esta decisión se basa, entre otros aspectos, en la información disponible en [41]. En dicha referencia se explica que los LED que emiten luz blanca verdadera no están disponibles, ya que construirlo resulta difícil debido a que los LED típicamente emiten una sola longitud de onda.

Como el color blanco no aparece en el espectro de colores, en su lugar, percibir el blanco requiere de la mezcla aditiva de longitudes de onda. Es decir, los LED blancos emiten en buena parte del espectro visible para poder generar luz blanca.

Debido a los métodos de fabricación más comunes para este tipo de dispositivos, estos LED tienen más azul en la mezcla de colores. Por lo que, el espectro visible de los LED blancos es similar al siguiente:

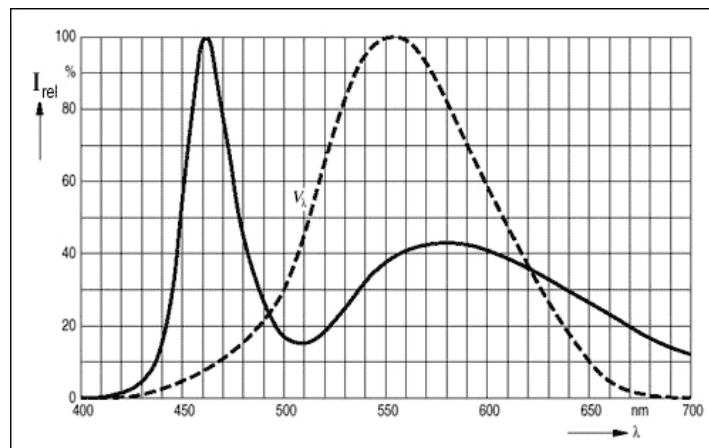


Ilustración 26: Espectro visible de los LED blancos [41]

Conociendo las características del LED blanco, es necesario conectarlo al dispositivo IoUT para que transmita la información. Sin embargo, existen múltiples maneras de poder conectar un LED, en la referencia anterior también se encuentra un esquema típico para conectar cualquier LED.

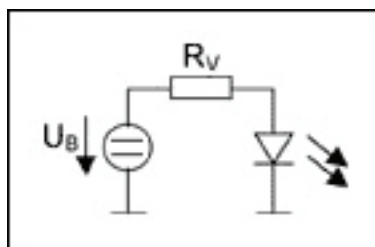


Ilustración 27: Forma simple de operar un LED [41]

En este proyecto, la tensión proporcionada por la salida del puerto MOSI de la interfaz SPI es de 3 V. En general, la máxima iluminación de los LED blancos utilizados en este trabajo se consigue con 3,6V.

En este caso, se ha decidido diseñar el circuito del transmisor teniendo en cuenta que la corriente que alimentará al LED es de 5mA. Por lo que, los cálculos para el diseño del transmisor son los siguientes:

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

$$V = IR$$

$$V_V = IR_V \Rightarrow V_V = 5mA * 10\Omega = 50mV$$

$$V_{LED} = U_B - V_V = 2.95V$$

A pesar de que la tensión del LED es inferior a 3,6V. En las pruebas se podrán observar los resultados de medición obtenidos en cuanto a la intensidad generada por el fotodetector al ser iluminado por el LED alimentado a 3V y 5mA. Además, se ha buscado que la resistencia R_V sea lo más pequeña posible para reducir la tensión que queda en la misma, pero sirva de protección para el LED.

3.1.2 RECEPTOR VLC

El receptor diseñado para las comunicaciones por luz visible necesita de múltiples elementos agrupados en 3 etapas desglosadas en este subapartado. Estas etapas se plantean para ser capaces de sortear las condiciones del medio subacuático.

En este caso, dicho medio se de agua dulce con mínimos residuos y sin turbulencias, ya que las propiedades de este medio en dichas condiciones se estudian en referencias mencionadas anteriormente y son las mejores condiciones para la comunicación con esta tecnología, en comparación con medios de agua salada o agua dulce turbia, entre otros.

La simulación del receptor VLC ha sido posible tras utilizar una fuente de corriente generadora de pulsos comprendidos entre 10 μA y 1 μA con un periodo de 250 μs para imitar la respuesta del fotodetector al recibir la señal entrante.

Por otro lado, ha sido necesario buscar e introducir los modelos correspondientes al TIA (OPAx381), el amplificador operacional (AD8601) y el comparador (LMV331). Dichos elementos, junto a la etapa de recepción a la que pertenecen, se desarrollan en los subapartados posteriores.

La tensión de funcionamiento del prototipo es de 3.3 V, mientras que la corriente total estimada es de 3 mA. A pesar de estas estimaciones, en el apartado 5.1 se usa una fuente de alimentación autoajutable para regular la corriente de entrada al prototipo.

Dicho prototipo se ha comenzado a diseñar desde las simulaciones de sus partes, explicadas más adelante, hasta la simulación del receptor completo en LTSpice XVII. También se debe tener en cuenta que, junto al estudio previo de esta tecnología, han sido necesarias muchas más simulaciones que la mencionada en esta memoria para poder llegar hasta la simulación del receptor abajo representada.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

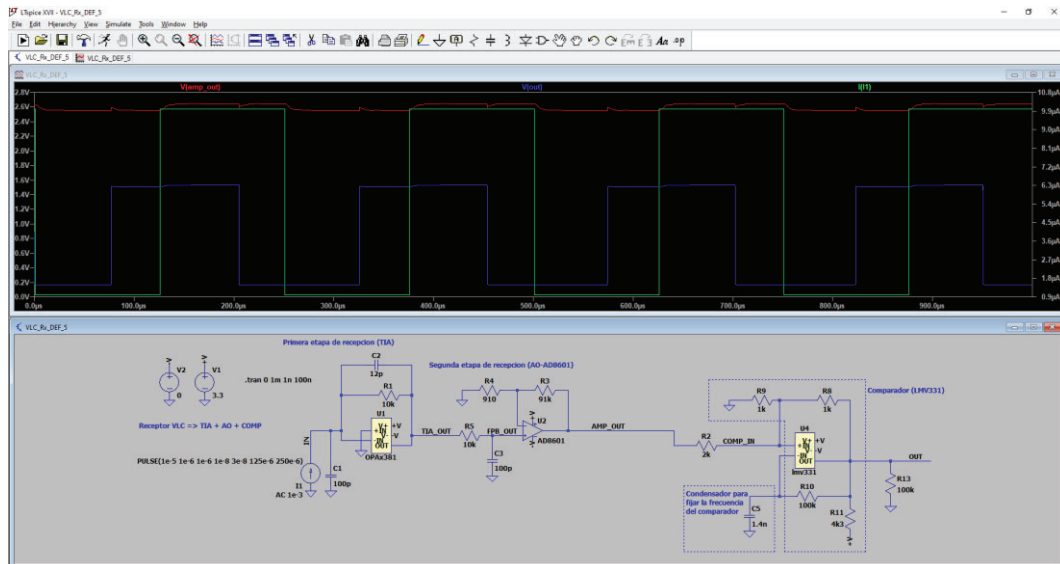


Ilustración 28: Simulación de la respuesta del receptor VLC en LTSpice XVII.

En la Ilustración 28 se puede observar que la salida esperada del receptor es una señal cuadrada similar a la recibida a la entrada del prototipo, esto se debe a algunas características del diseño que se explicarán al final de este subapartado.

No obstante, se ha decidido implementar el receptor para que proporcione una señal cuadrada a su salida para que se pueda conectar directamente al puerto MISO de la interfaz SPI del microcontrolador al que se conecta.

A pesar de ello, también ha sido necesario contar con la respuesta en frecuencia del receptor. Ya que la frecuencia de la señal transmitida es de 4 KHz aproximadamente. Se debe estudiar la respuesta del receptor para la frecuencia de trabajo y, en la medida de lo posible, se debe tratar la señal de interés de la manera más específica posible para mejorar la capacidad de recepción del prototipo.

Además, en este caso es necesario priorizar el filtrado de las señales de alta frecuencia. Ya que, muchas de las fuentes de iluminación artificiales y naturales emiten luz a frecuencias en el orden de MHz.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

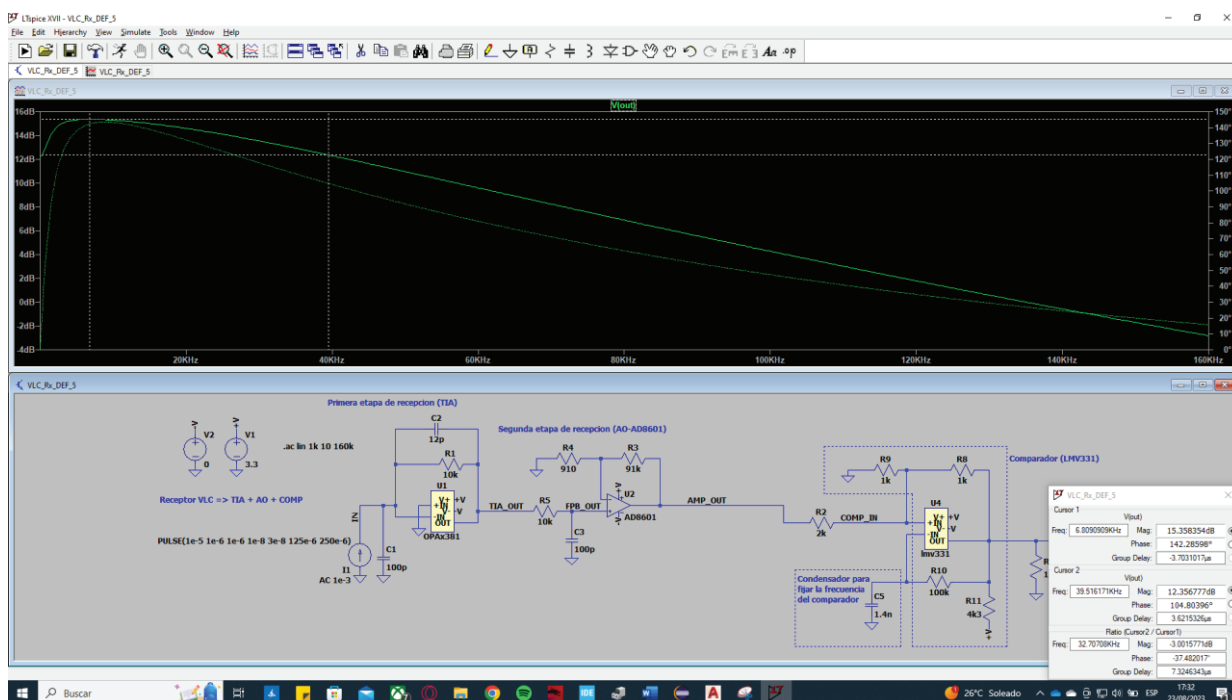


Ilustración 29: Ilustración 24: Simulación de la respuesta en frecuencia del receptor VLC

Tras simular la respuesta en frecuencia del diseño, se puede observar que está centrada en 6.8 KHz aproximadamente. El ancho de banda simulado es de 39.2 KHz, las frecuencias de corte se encuentran en los 270 Hz y los 39.5 KHz, para baja y alta frecuencia respectivamente. Además, las señales superiores a 140KHz se pierden completamente al alcanzar niveles de potencia inferiores a los 0 dB.

Un detalle importante en estos resultados es que también se filtran considerablemente las señales de baja frecuencia. No obstante, esto último depende de la electrónica utilizada en este prototipo, no del filtro paso bajo incluido en el diseño.

Por otro lado, en las especificaciones del diseño se requiere la recepción de señales transmitidas a 4 KHz. Al ajustar el cursor 1 del simulador de LTSpice a dicha frecuencia, se obtiene una amplificación de la señal recibida de 15.21 dB.

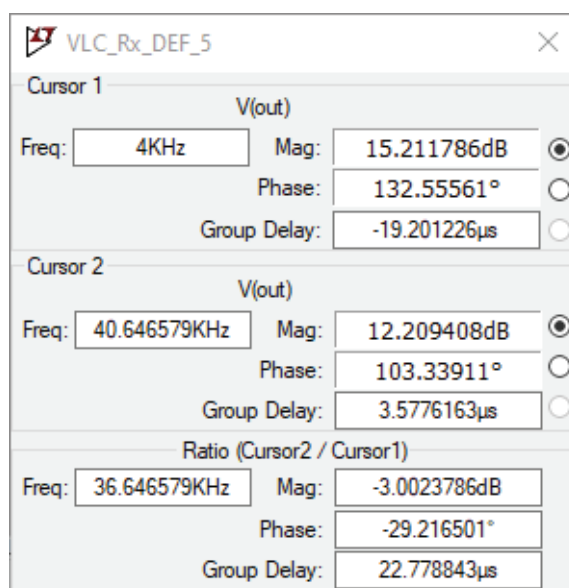


Ilustración 30: Simulación de la respuesta en frecuencia del receptor VLC a la frecuencia de trabajo.

Esto implica una ganancia considerable para la señal recibida, lo cual podría implicar una mayor

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

distancia de comunicación o recepciones menos ruidosas. No obstante, esto se prueba en el subapartado 5.1.

3.1.2.1. PRIMERA ETAPA DE RECEPCIÓN

Antes de comenzar a plantear el diseño del receptor para las comunicaciones VLC es necesario determinar cuál es el fotodetector más conveniente para el caso de aplicación. Esto es así, ya que existen múltiples tipos de detectores de luz, muchos de ellos especializados en un rango concreto de longitudes de onda dentro del espectro visible.

En este proyecto, debido a que se pretende implementar las comunicaciones VLC bajo agua dulce y con un LED blanco como transmisor. Se ha decidido utilizar un fotodetector centrado en las longitudes de onda comprendidas entre los 430-610 nm aproximadamente. Dicho rango del espectro electromagnético concuerda con los colores azul y verde.

El motivo por el que se ha buscado un dispositivo sensible a estos colores es porque sus longitudes de onda son las que menos atenuación sufren al transmitirse en este medio, como se indica en [13].

Además, el azul es el color principal de la mezcla para conseguir los LED blancos, por lo que la transmisión con un LED blanco debería recibirse mejor con un detector sensible a las longitudes de onda del color azul frente a uno sensible a las longitudes de onda del color rojo.

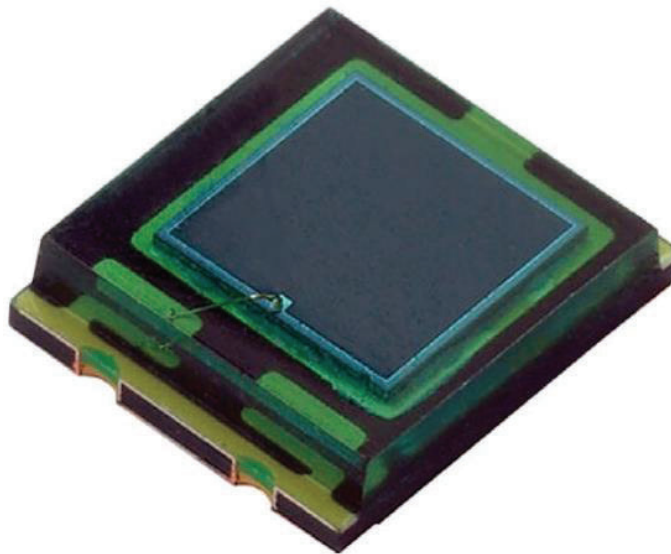


Ilustración 31: TEMD5510FX01 [42]

Con estos detalles, se ha seleccionado el fotodetector TEMD5510FX01 descrito en [42]. Este dispositivo dispone de la sensibilidad apropiada para esta aplicación, esto queda reflejado en la siguiente ilustración:

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

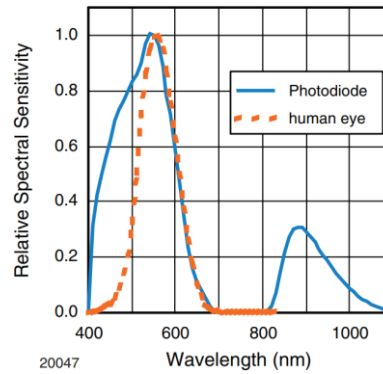


Ilustración 32: Sensibilidad espectral relativa del TEMD5510FX01 [42].

En esta primera etapa, es necesario recibir la transmisión lumínica y convertirla a una señal eléctrica interpretable por la electrónica disponible. Con este fin, se diseña esta etapa con el fotodetector “CR1” en polarización directa.

Además, se ha añadido un circuito de integración, en este caso, un condensador paralelo de baja capacidad. Este circuito permite mejorar la sensibilidad y estabilidad del sistema, así como ajustar el tiempo de respuesta del fotodetector.

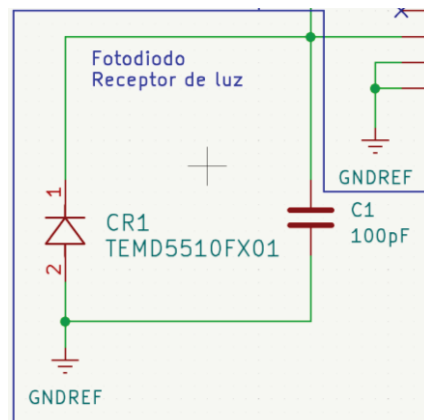


Ilustración 33: Esquemático de la etapa de recepción de luz.

De esta manera, se convierte la señal de luz recibida en una señal que varía en corriente, que será procesada por el resto de las etapas del receptor. Para las simulaciones en LTSpice XVII, se ha utilizado una fuente de corriente que genera una señal cuadrada de 4 KHz y que oscila entre 1 μ A y 10 μ A, para imitar la respuesta del fotodetector escogido en este trabajo.

Luego, en esta primera etapa de recepción. Tras recibir la señal de luz convertida a una señal eléctrica que varía en corriente, se ha utilizado un TIA para convertir la señal de corriente entrante, generada por el fotodetector, en una señal de baja tensión amplificada en las etapas posteriores.

Esto se hace con el fin de trabajar más fácilmente con la señal recibida, ya que muchos amplificadores son para señales que varían en tensión y la mayoría de los dispositivos se comunican mediante diferencias de tensión.

En este caso, se ha escogido el OPA381 como TIA para este receptor VLC, en [43] se encuentra la hoja técnica del dispositivo. Entre la información proporcionada por el fabricante, se incluyen algunas pruebas realizadas para la configuración del dispositivo que han sido útiles para este diseño.

Seguidamente, se implementa la configuración del TIA como un inversor que, a su salida, presenta la señal recibida mediante luz, en una señal que varía en tensión. El siguiente esquemático, muestra dicha configuración.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

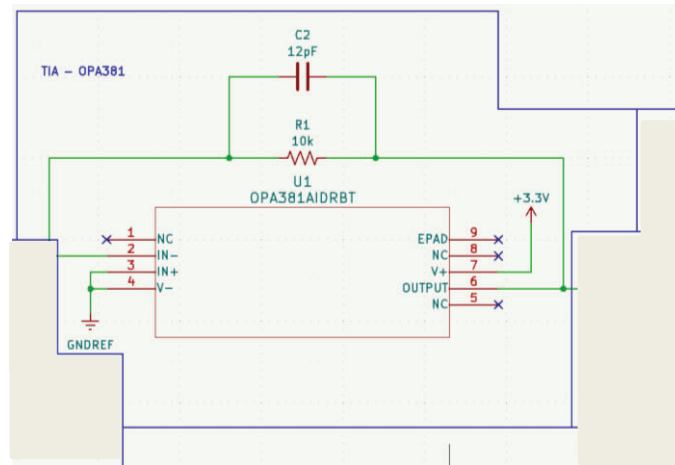


Ilustración 34: Esquemático de la configuración del TIA OPA381

Para finalizar esta primera etapa de recepción, a la salida del TIA se incluye un filtro paso bajo tipo RC. De esta manera, se pretende evitar las interferencias de señales lumínicas de mayor frecuencia, como la luz ambiental o la iluminación artificial. La frecuencia de corte del filtro paso bajo se obtiene como resultado de la fórmula:

$$f_{corte} = 1/(2\pi RC)$$

Asumiendo que $R = 10\text{ K}\Omega$ y $C = 100\text{ pF}$, se obtiene que $f_{corte} = 159.15\text{ KHz}$. Por tanto, este filtro deberá permitir que la señal de trabajo, emitida a 4 KHz aproximadamente, pueda ser recibida y procesada. Mientras que todas aquellas señales con una frecuencia mayor a la de corte, serán filtradas.

Este filtro se ha situado a la salida del TIA para evitar que las interferencias generadas por fuentes indeseadas no sean un obstáculo en el procesamiento de la transmisión recibida en etapas posteriores. A continuación, se muestra el esquemático del filtro RC diseñado para este receptor VLC:

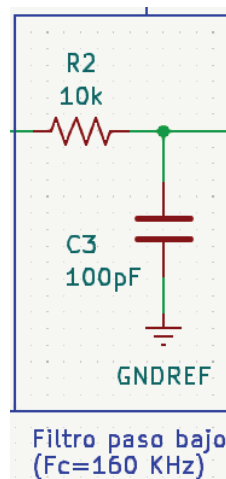


Ilustración 35: Esquemático del filtro paso bajo RC.

Con todo lo anterior, queda completado el diseño de la primera etapa de recepción de este diseño. Sin embargo, antes de fabricar y probar este circuito, es necesario simular esta etapa completa para observar los resultados previstos sobre su funcionamiento.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

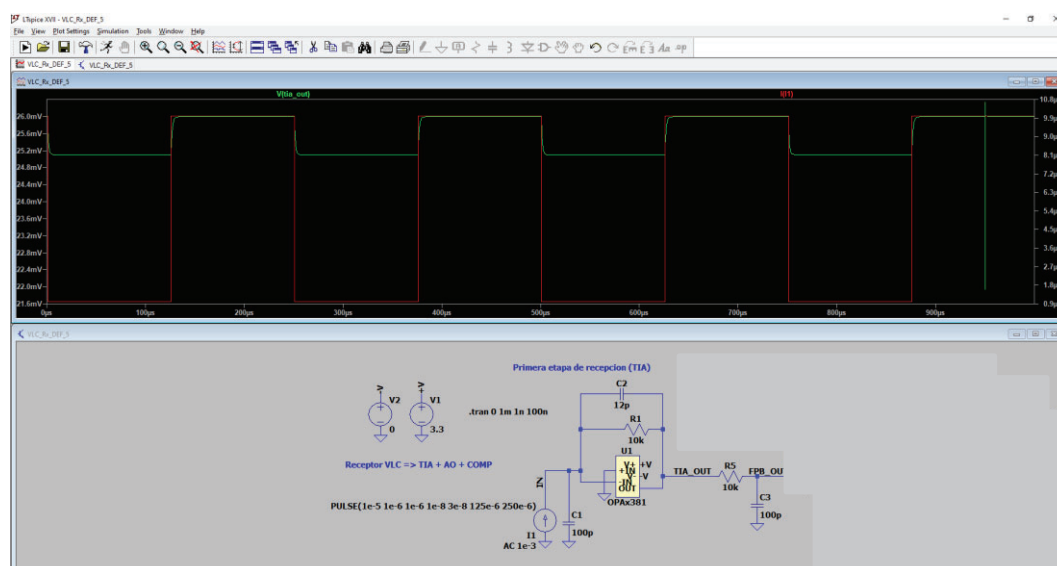


Ilustración 36: Simulación de la primera etapa de recepción VLC

En los resultados obtenidos con la simulación, se puede observar que la respuesta del circuito es bastante buena en cuanto a la transformación de los pulsos de corriente a pulsos de tensión. No obstante, también se puede observar el retardo que introducen el TIA y el filtro paso bajo en la señal entrante.

Este retardo se prevé que no sea significativo, puesto que es más preocupante la deformación que genera el TIA en la señal de salida según el nivel de la señal recibida, aunque este efecto se estudiará en el apartado “Pruebas sobre VLC”. Finalmente, el circuito completo en KiCad 7.0 de esta primera etapa de recepción es el siguiente:

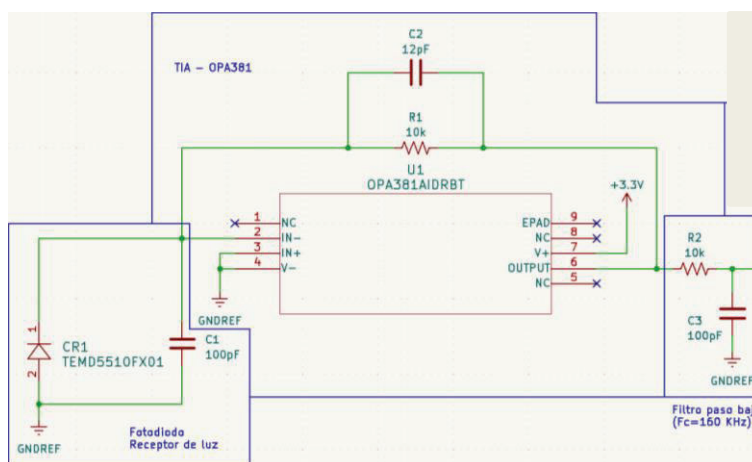


Ilustración 37: Esquemático de la primera etapa de recepción VLC.

En los siguientes subapartados se describen las etapas posteriores a la recepción y conversión de la señal lumínica a señal eléctrica variable en tensión.

3.1.2.2. SEGUNDA ETAPA DE RECEPCIÓN

Cuando la señal recibida es procesada por la etapa anterior, se obtiene a su salida una señal de baja tensión que se debe amplificar para su posterior interpretación, tal y como se observó en la Ilustración 36.

Por ello, se ha introducido un amplificador operacional no inversor que representa la segunda etapa de recepción de este prototipo. Dicho dispositivo se ha seleccionado buscando la máxima amplificación posible combinada con un bajo coste energético y alta precisión en la amplificación.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

En este proyecto, se ha decidido utilizar el AD8601, cuya hoja técnica se encuentra disponible en [44], configurado como un amplificador no inversor de lazo cerrado con realimentación negativa preparado para maximizar la ganancia en tensión generada por este dispositivo.

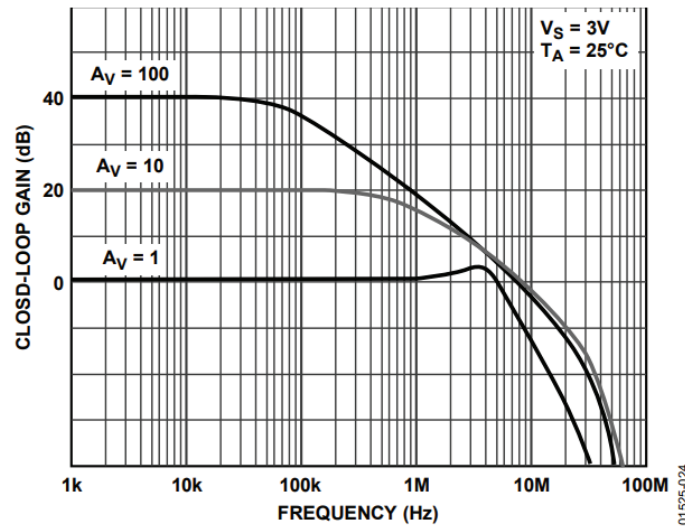


Ilustración 38: Ganancia de lazo cerrado vs frecuencia del AD8601 [44]

La familia de amplificadores AD860x de ANALOG DEVICES son amplificadores de precisión CMOS con entrada y salida de riel a riel que operan con un voltaje de suministro de energía de 2.7 V a 5.0 V. Además, los AD860x se pueden utilizar en cualquier aplicación para un amplificador operacional de precisión.

Para explicar la implementación del circuito de amplificación basado en el AD8601 con las características mencionadas anteriormente, se ha seguido tomado como base el diseño siguiente:

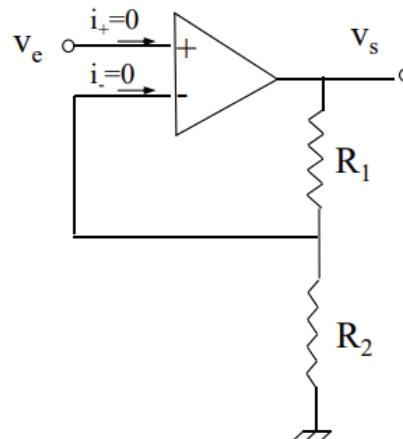


Ilustración 39: Diseño ideal de un AO de lazo cerrado con realimentación negativa

Del circuito anterior, se pueden deducir múltiples propiedades, como que la corriente de los puertos de entrada debe ser la misma, la realimentación negativa implica una mayor estabilidad para el funcionamiento del amplificador, entre otras.

Sin embargo, para este trabajo, una característica crucial de esta segunda fase de recepción es la ganancia de esta etapa, que se calcula con la fórmula:

$$A_v = \frac{V_s}{V_e} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$

De modo que, probando diferentes valores para R_1 y R_2 , y teniendo en cuenta la información proporcionada por la hoja técnica del AD8601. Se han tomado los valores siguientes para dichas resistencias:

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

$$R_1 = 91\text{ K}\Omega \text{ y } R_2 = 910\text{ }\Omega \Rightarrow A_v = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) = 101$$

Con este planteamiento, se ha introducido el circuito anterior en la simulación de LTSpice del subapartado anterior. Al situar este circuito amplificador a la salida del TIA, se obtienen los siguientes resultados de simulación:

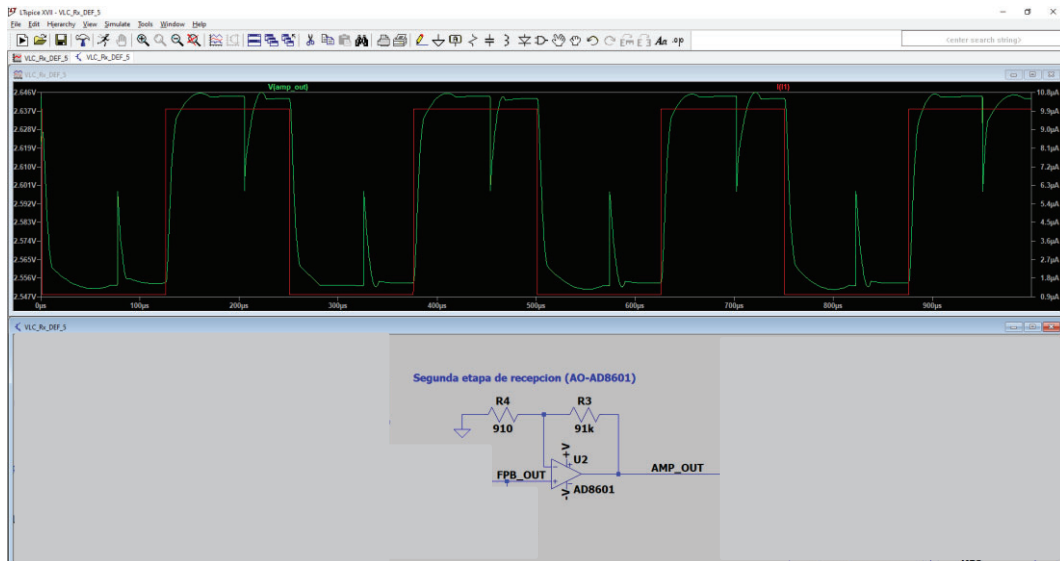


Ilustración 40: Simulación de la segunda etapa de recepción VLC

Como referencia para la interpretación de la simulación anterior, se ha de consultar la Ilustración 36 para comparar la señal obtenida a la salida del TIA en escala de mV, con la señal amplificada a la salida del AO a una escala de V.

Además, se puede observar que la salida del amplificador operacional se está saturando, principalmente, debido a la configuración propuesta para maximizar la ganancia. Sin embargo, al estar al límite de la capacidad operativa indicada por el fabricante, se mantendrán los valores de R_1 y R_2 hasta las pruebas del prototipo. Con este fin, se ha diseñado la segunda etapa del receptor VLC en KiCad.

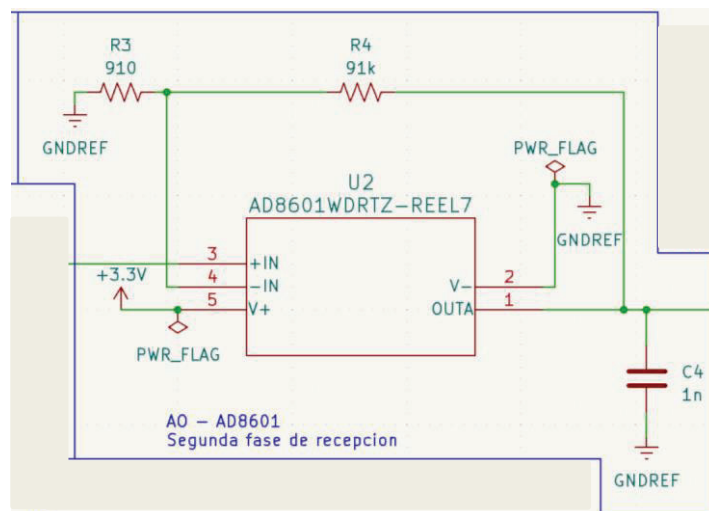


Ilustración 41: Esquemático de la segunda etapa de recepción VLC

Por otro lado, en el diseño en KiCad de la segunda etapa de recepción VLC se ha incluido a la salida del AO un condensador en paralelo y conectado a tierra. Dicho componente no se incluye en el diseño original, pero se ha incluido en la PCB del prototipo para probar si es posible implementar un filtro paso banda centrado en la frecuencia de trabajo, esta idea se desarrolla en el apartado 5.1.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

Finalmente, en el siguiente subapartado se describe el diseño de la tercera y última etapa del receptor VLC.

3.1.2.3. TERCERA ETAPA DE RECEPCIÓN

Por último, se encuentra la tercera etapa del receptor VLC. En ella, se busca obtener una señal cuadrada con una diferencia de tensión superior a los 0.8V a partir de la señal de salida de la etapa de recepción anterior. Con esto se pretende generar una señal de recepción válida para ser procesada por el puerto SPI del microcontrolador que administra la estación base.

El LMV331 disponible en [45], es un comparador diseñado para ser la solución más rentable cuando el espacio, la baja tensión, el bajo consumo de energía y el precio son las especificaciones principales en el diseño de circuitos para productos electrónicos portátiles.

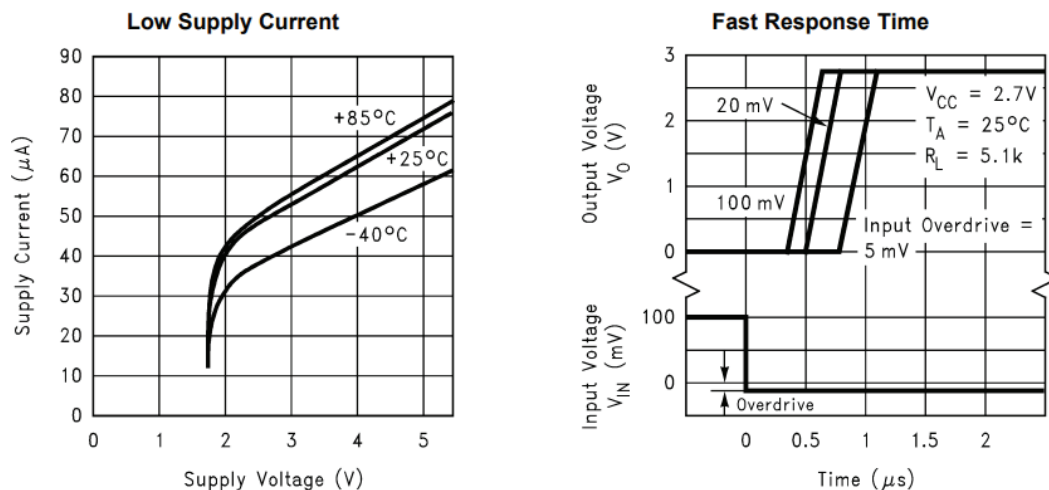


Ilustración 42: Capacidad operativa del LMV331 [45]

Para este proyecto, se ha decidido configurar el comparador como un oscilador no inversor que genera una señal cuadrada a su salida. Con ello se pretende convertir la señal a la salida de la segunda etapa de recepción en una señal cuadrada capaz de ser interpretada por la interfaz SPI.

Este diseño está inspirado en uno de los ejemplos de aplicaciones típicas de la hoja técnica del LMV331, dicho ejemplo se muestra a continuación:

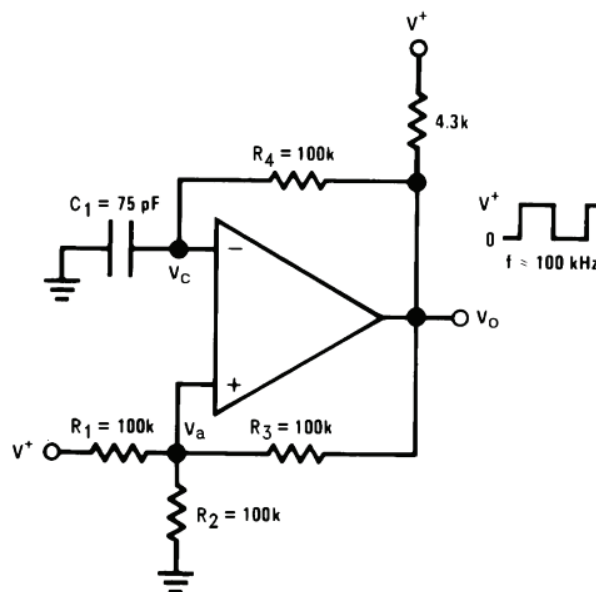


Ilustración 43: Ejemplo de diseño de un oscilador de señal cuadrada [45]

En general, los comparadores son ideales para aplicaciones de osciladores. Este ejemplo para un

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

generador de onda cuadrada utiliza el número mínimo de componentes. La frecuencia de salida del comparador se establece mediante la constante de tiempo RC del condensador C1 y la resistencia en la retroalimentación negativa R4 de la ilustración anterior.

Es importante mencionar que, para un correcto muestreo de la señal de salida de la segunda etapa de recepción, se debe aplicar el teorema de muestreo de Nyquist. Por tanto, la frecuencia del comparador debe ser, al menos, el doble que la de la señal recibida.

En la hoja técnica del LMV331 se describe matemáticamente cómo calcular la tensión de los puertos de entrada para este ejemplo. Además, se incluye una expresión para calcular el período del comparador. Tras el desarrollo de dicha expresión, el período de la señal de salida del comparador puede calcularse como:

$$T_{LMV331} = -\ln\left(\frac{1}{2}\right) * R_4 C_1$$

$$\text{Si } R_4 = 100 \text{ K}\Omega \text{ y } C_1 = 1,4 \text{ nF} \Rightarrow T_{LMV331} = 97,04 \mu\text{s} \Rightarrow f_{LMV331} = \frac{1}{T_{LMV331}} = 10,31 \text{ KHz.}$$

Si la frecuencia de trabajo es:

$$f_{trabajo} = 4 \text{ KHz} \Rightarrow T_{trabajo} = \frac{1}{f_{trabajo}} = 250 \mu\text{s}$$

Con esta configuración queda claro que $f_{LMV331} > 2 * f_{trabajo}$. Por tanto, este circuito debería ser capaz de convertir la señal amplificada a la salida del amplificador en una señal cuadrada con una diferencia de tensión de, al menos, 0,8V.

Cabe destacar que, la frecuencia máxima del comparador está limitada únicamente por el retardo de propagación de señal del comparador, además de cualquier carga capacitiva en la salida, lo cual degradaría la velocidad de subida de la salida.

Con esta información, se ha procedido a simular el diseño de este comparador en LTSpice, los resultados de la simulación del circuito planteado se muestran en la siguiente ilustración:

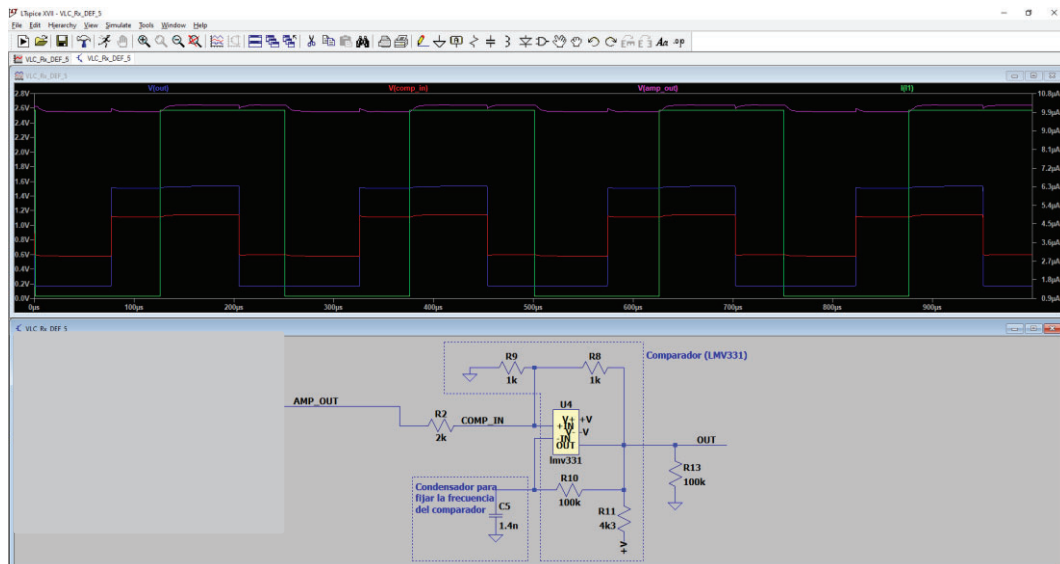


Ilustración 44: Simulación de la tercera etapa de recepción VLC

Como se puede observar, en los resultados de la simulación anterior se puede comprobar que la señal de salida se encuentra considerablemente retrasada respecto a la señal de corriente originalmente recibida.

A pesar de ello, las simulaciones indican que el comparador parece ser capaz de convertir la señal analógica amplificada generada por la segunda etapa de amplificación en una señal cuadrada con

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

una diferencia de tensión superior a 0,8V.

En base a la simulación anterior, se ha procedido a implementar el diseño en KiCad del circuito simulado. Este circuito basado en el LMV331 queda representado en la ilustración siguiente:

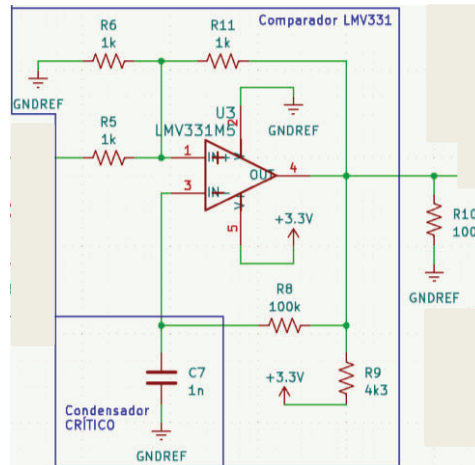


Ilustración 45: Esquemático de la tercera etapa de recepción VLC

El condensador utilizado para configurar el comparador ha sido introducido como 1 nF para normalizar su valor. No obstante, durante las pruebas del receptor, el valor de dicha capacidad puede variarse para comprobar su funcionamiento.

3.2 ESTUDIO DE LAS COMUNICACIONES NFC

En este proyecto, para implementar las comunicaciones NFC se han utilizado varias plataformas de desarrollo para implementar dicha tecnología. Los elementos que han sido necesarios y su función en este proyecto quedan descritos más adelante.

3.2.1 LECTOR NFC – NUCLEO-L476RG & X-NUCLEO-NFC05A1

Se ha decidido utilizar una combinación de varias placas de desarrollo de STMicroelectronics para constituir la estación base. Como se puede observar en la Ilustración 25, es necesario combinar el NUCLEO-L476RG con el X-NUCLEO-NFC05A1 para implementar la estación donde se pretende leer los datos del tag dinámico y recargarlo inductivamente.

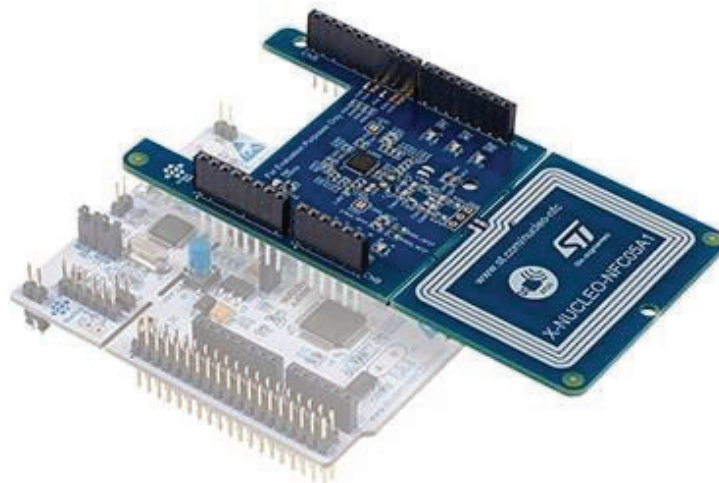


Ilustración 46: Inserción del X-NUCLEO-NFC05A1 en el NUCLEO-L476RG [31]

Sin embargo, antes de unir dichas plataformas. Es necesario conocer cómo es posible la combinación de estas placas. Para ello, se puede hallar en [27], [31] la hoja técnica del

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

microcontrolador y de la plataforma de extensión del lector NFC.

Ambas plataformas de desarrollo se conectan mediante los conectores ARDUINO UNO R3 que incluyen y se comunican mediante SPI a través de los puertos señalados en la tabla siguiente:

Tabla I: Conexiones entre el NUCLEO-L476RG y el X-NUCLEO-NFC05A1

Conector ARDUINO	NUCLEO- L476RG	X-NUCLEO- NFC05A1	Función
CN6	3V3	3V3	Alimentación
	IOREF	IOREF	
	GND	GND	
	GND		
CN5	PA5	SCLK_MCU	SPI1
	PA6	MISO_MCU	
	PA7	MOSI_MCU	
CN8	PA0	IRQ	Interrupción
	PA1	MCU_LED1	LED
	PA4	MCU_LED2	
	PB0	MCU_LED3	
CN9	PB4	MCU_LED4	
	PB5	MCU_LED5	
	PA8	MCU_LED6	

Con la tabla anterior, y las indicaciones de los datasheets de estas plataformas. Se puede comenzar a trabajar con ellas. En primer lugar, es necesario unir las. De manera que, su unión debería quedar en un resultado similar al de la siguiente ilustración:

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

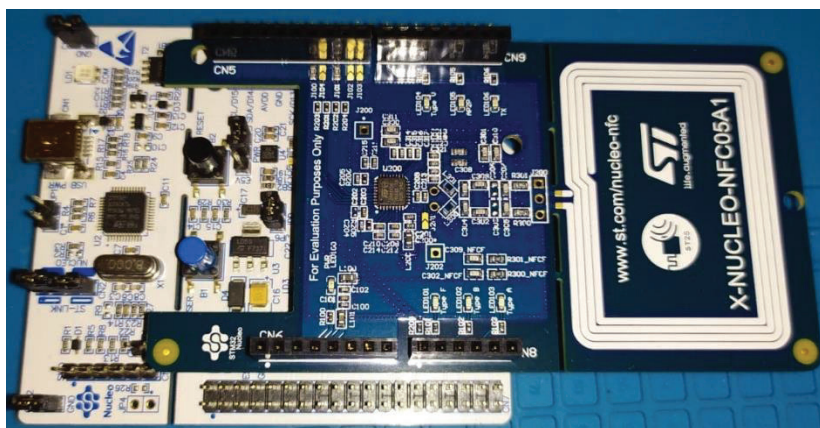


Ilustración 47: Implementación física del lector NFC

Con esto, la solución hardware para el lector NFC queda completada. La simpleza de su implementación se debe, principalmente, a que en este trabajo se busca disponer de los prototipos necesarios para alcanzar los objetivos de este TFM.

Por lo tanto, gracias a la disposición de estas plataformas, se puede posponer el diseño final del lector NFC para focalizar los esfuerzos en demostrar su operatividad y comprobar si su aplicación sobre este caso concreto es válida.

3.2.2 TAG DINÁMICO NFC – NUCLEO-L053R8 & X-NUCLEO-NFC07A1

De acuerdo con la Ilustración 25, es necesario combinar el NUCLEO-L053R8 con el X-NUCLEO-NFC07A1 para implementar el tag dinámico que permite al microcontrolador enviar y recibir información mediante NFC. Además, gracias al campo electromagnético generado por el lector NFC, esta plataforma también debería ser capaz de recargarse inductivamente.

Sin embargo, antes de unir las plataformas anteriores. Es necesario conocer cómo es posible la combinación de éstas. Con este fin, se puede encontrar en [24], [33] la hoja técnica del microcontrolador y de la plataforma del lector NFC.

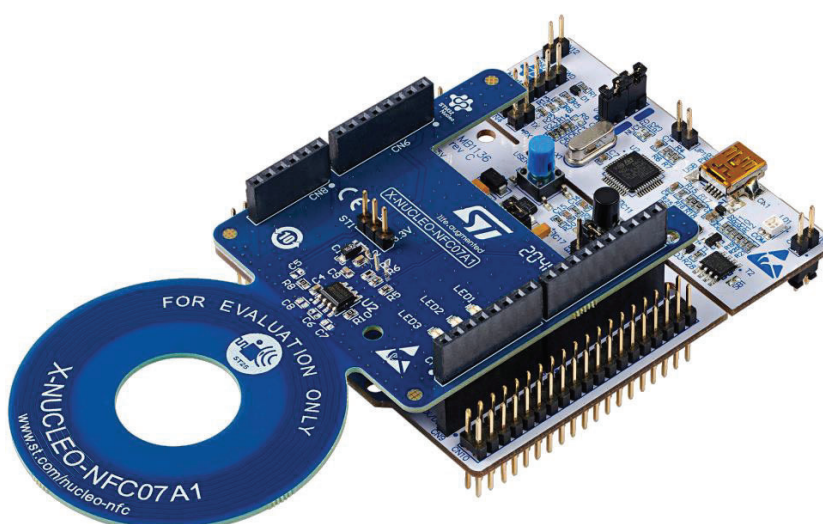


Ilustración 48: Inserción del X-NUCLEO-NFC07A1 en el NUCLEO-L053R8 [33]

Ambas plataformas de desarrollo se conectan mediante los conectores ARDUINO UNO R3 que incluyen, y se comunican mediante I2C a través de los puertos señalados en la tabla siguiente:

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

Tabla II: Conexiones entre el NUCLEO-L053R8 y el X-NUCLEO-NFC07A1

Conector ARDUINO	NUCLEO- L476RG	X-NUCLEO- NFC05A1	Función
CN6	Pin 4	3V3	Alimentación
	Pin 2	IOREF	
	Pin 6	GND	
	Pin 7		
CN5	PA5	SCL	I2C
	PA6	SDA	
		PA7	GPO
CN9	PB4	MCU_LED1	LED
	PB5	MCU_LED2	
	PA10	MCU_LED3	

En este caso, el ST25DV64KC incluye un puerto de salida de propósito general para que, después de la inicialización, una interrupción detecte cambios en el campo en la proximidad del tag dinámico. De manera que el LED verde de la plataforma de extensión se enciende cuando se detecta el campo y se apaga cuando éste desaparece.

Con lo comentado anteriormente y los datasheets de ambas plataformas, se deben interconectar estas placas para comenzar a trabajar con ellas. Al insertar el X-NUCLEO-NFC07A1 en los conectores ARDUINO UNO R3 del NUCLEO-L053R8, su unión debería quedar en un resultado similar al siguiente:



Ilustración 49: Implementación física del tag dinámico NFC

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

Con esto, ya está preparado el prototipo del tag dinámico NFC. Una vez se le introduzca el software necesario para su funcionamiento. Basta con acercar el tag al lector, o viceversa, para obtener los datos de este prototipo en la estación base.

Además, más adelante se demuestra la recarga inductiva del dispositivo midiendo la energía que la plataforma puede recoger del campo electromagnético que genera el lector.

3.3 SOLUCIÓN HARDWARE PROPUESTA

Para concluir con la descripción de la solución hardware, se comenta en los subapartados siguientes cómo se han implementado físicamente los prototipos desarrollados en este trabajo de fin de máster.

Es importante mencionar que, ambos prototipos están diseñados para demostrar su funcionalidad, y ambos son perfectamente escalables. Aun así, se recomienda mantener la estación base de manera similar al prototipo, aunque según el caso de aplicación se puede modificar para adaptarlo a las necesidades del usuario o cliente.

3.3.1 PROTOTIPO DE LA ESTACIÓN BASE

Como se comenta anteriormente, la estación base debe ser capaz de comunicarse con el otro prototipo utilizando tecnología VLC o NFC. Con este fin, se ha estudiado en los apartados 3.1.2 y 3.2.1, cómo se puede implementar ambas tecnologías respectivamente.

Sin embargo, para la solución hardware final es necesario unir ambas tecnologías para constituir el prototipo final de la estación base. Para ello, se ha de fabricar el receptor VLC planteado en este trabajo.

- FABRICACIÓN DEL RECEPTOR VLC

Tras el desarrollo del diseño del receptor VLC, es necesario fabricar este prototipo para demostrar su correcto funcionamiento. Además, todo el proceso de fabricación del prototipo del receptor VLC ha sido realizado por el alumno en el laboratorio de fabricación de prototipos y sistemas electrónicos del IUMA.

Sin más preámbulos, tras unificar el diseño de los circuitos de las etapas anteriores en KiCad, se ha obtenido el diseño del receptor VLC completo. Además, al diseño del receptor se le han añadido 3 pines, dos para la alimentación y uno de ellos para la salida de la señal recibida por el receptor.

Dicho diseño queda representado en la siguiente ilustración:

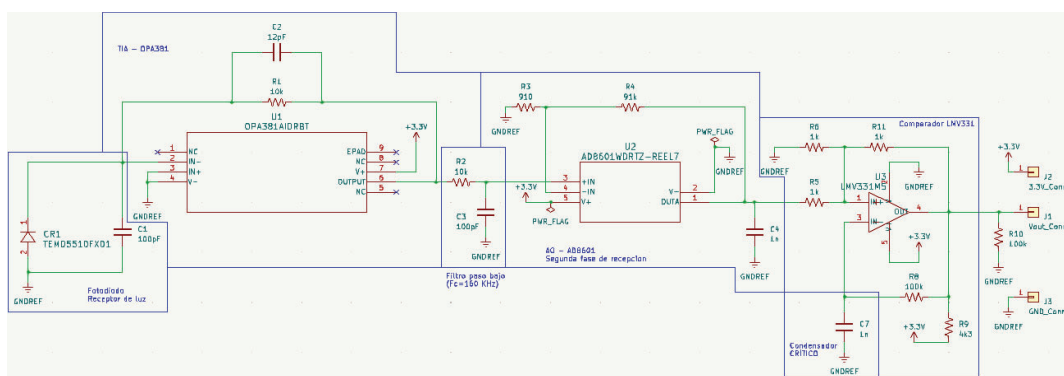


Ilustración 50: Esquemático del receptor VLC en KiCad 7.0

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

Con el diseño del esquemático, KiCad permite trasladar los componentes y las redes que los unen al entorno de edición de PCB del que dispone. El diseño de la PCB para este receptor VLC es de dos capas que, tras ubicar los elementos del esquemático y enrutarlos debidamente, se ha decidido que el plano superior de la placa corresponda a la alimentación positiva. Mientras que el plano inferior o trasero, corresponde al plano de masa o alimentación negativa.

Por otro lado, en este diseño se han incluido múltiples puntos de prueba a la entrada y salida de cada etapa de recepción para poder observar las señales de cada punto de interés. El diseño de la PCB se ha hecho con dimensiones mayores a las realmente necesarias para su funcionamiento, pero esta característica es de gran utilidad para facilitar la manipulación del prototipo y las mediciones.

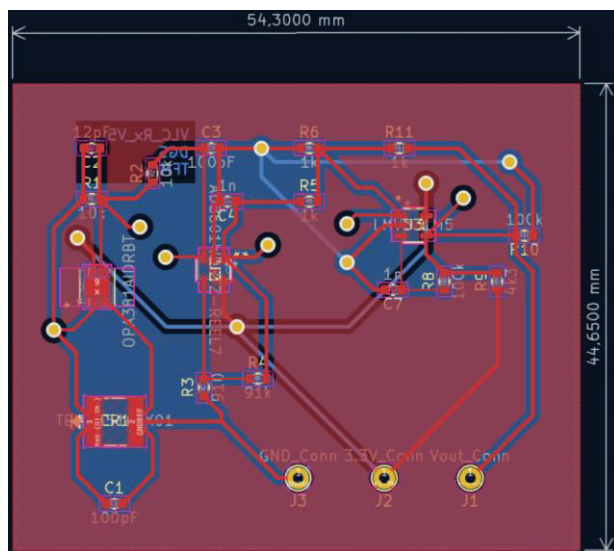


Ilustración 51: PCB del receptor VLC en KiCad 7.0

Antes de comenzar con el proceso de fabricación, es necesario generar e importar los archivos necesarios para la impresión de la PCB. KiCad permite generar automáticamente estos ficheros que contienen, entre otra información útil, los gerbers y taladros del diseño.

Una vez obtenidos, se deben importar al programa Board Master 5.0. En [46] se desarrolla una guía para trabajar con este software. Luego, es necesario preparar la fresadora para la impresión del diseño en la lámina de sustrato con los taladros requeridos.

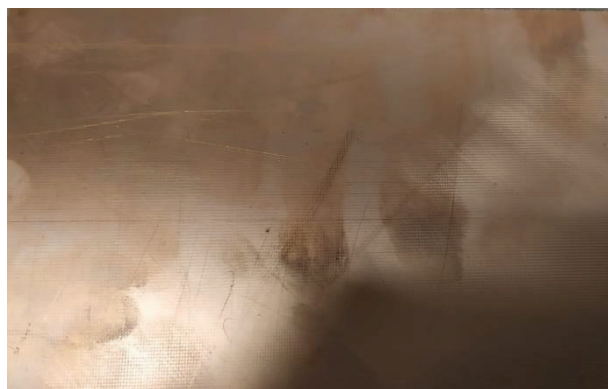


Ilustración 52: Sustrato para la fabricación del receptor VLC

Con este fin, se coloca una lámina de sustrato previamente limpiada con alcohol y sin irregularidades en la zona donde se vaya a imprimir el circuito, se ajusta con el software el punto de origen de trabajo del cabezal de la fresadora sobre el sustrato, y se inserta la punta solicitada por el programa en la máquina tantas veces como sea necesario. Una vez finalizado, el resultado de la fabricación de esta PCB es el siguiente:

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

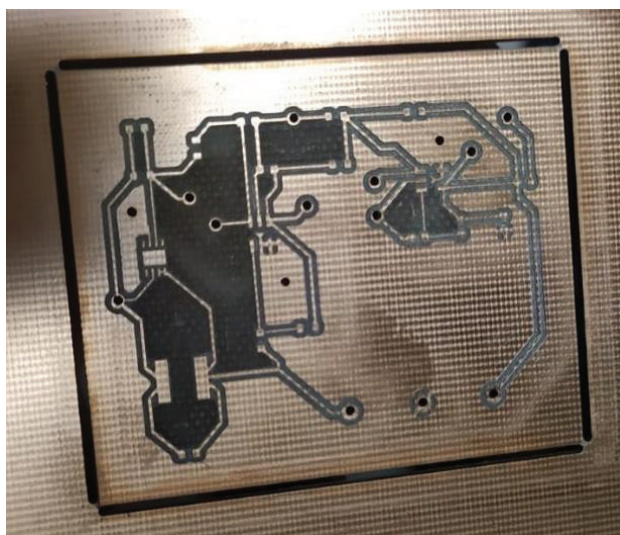


Ilustración 53: Circuito impreso del receptor VLC

Paralelamente, es necesario fabricar la máscara de soldadura del prototipo. Para ello, se sigue un proceso similar al de fabricar la placa. se importa el archivo que contiene la máscara en el Board Master 5.0, se coloca una lámina de material kapton en la fresadora, se prepara la máquina y se ejecuta el trabajo. Como resultado, se ha obtenido la máscara que se muestra a continuación:



Ilustración 54: Máscara del prototipo del receptor VLC

Tras fabricar la PCB y la máscara de soldadura correspondiente. Es necesario situar la máscara sobre la PCB, haciendo coincidir los pads de ambas. Una vez hecho, se ha de aplicar pasta de soldadura sobre la máscara para cubrir sólo los pads con ella.

Es importante tener especial cuidado con los pads relacionados con los circuitos integrados, en este caso, del TIA, el AO y el comparador. Ello se debe a que, al disponer de menos distancia entre sus pines, la máscara de soldadura es más frágil y puede llegar a romperse, lo que dificulta el proceso de aplicar la pasta de soldadura.

Tras aplicar la pasta de soldadura debidamente sobre la máscara y la PCB. Se retira la máscara con cuidado para no retirar la pasta de los pads de la placa y se comienza a situar los componentes SMD sobre el circuito impreso.

Una vez realizado este proceso, se introduce la PCB con los componentes SMD en el horno. De esta manera, se calienta el prototipo hasta que los componentes ubicados sobre la placa se unen a ella gracias a la pasta de soldadura.

Al finalizar el horneado del prototipo, es importante revisar los componentes situados sobre la placa, para comprobar que ninguno se ha descolocado o a sufrido ningún efecto imprevisto. Tras

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

esto, se sueldan los pines necesarios para conectar los distintos planos mediante vías, se sueldan los pines correspondientes a la alimentación y el pin necesario para obtener la señal de salida del receptor VLC.

Al completar este último paso, el prototipo diseñado para la recepción de transmisiones VLC a resultado de la siguiente manera:

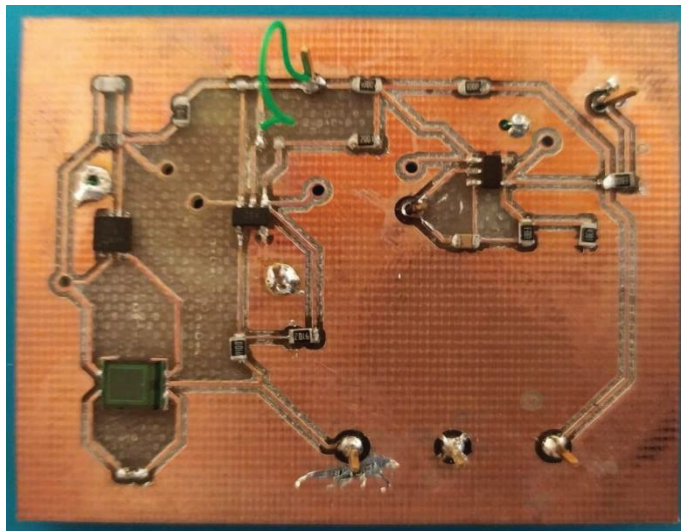


Ilustración 55: Prototipo del receptor VLC

Por otra parte, el prototipo de la figura anterior es el último que ha sido fabricado y probado por el estudiante en este trabajo. Existen otras 4 versiones anteriores del prototipo del receptor VLC fabricadas, pero no se han incluido en esta memoria debido a que no son completamente operativos o carecen de los componentes necesarios para su funcionamiento.

- IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE LA ESTACIÓN BASE

Tras la fabricación del receptor de luz visible, se da paso a un proceso relativamente simple para unir las tecnologías de comunicaciones estudiadas en un solo prototipo. Para ello, es suficiente con conectar el pin de salida del receptor VLC al puerto MISO de la interfaz SPI2 del NUCLEO-L476RG, habiendo insertado la plataforma del lector NFC en los conectores correspondientes.

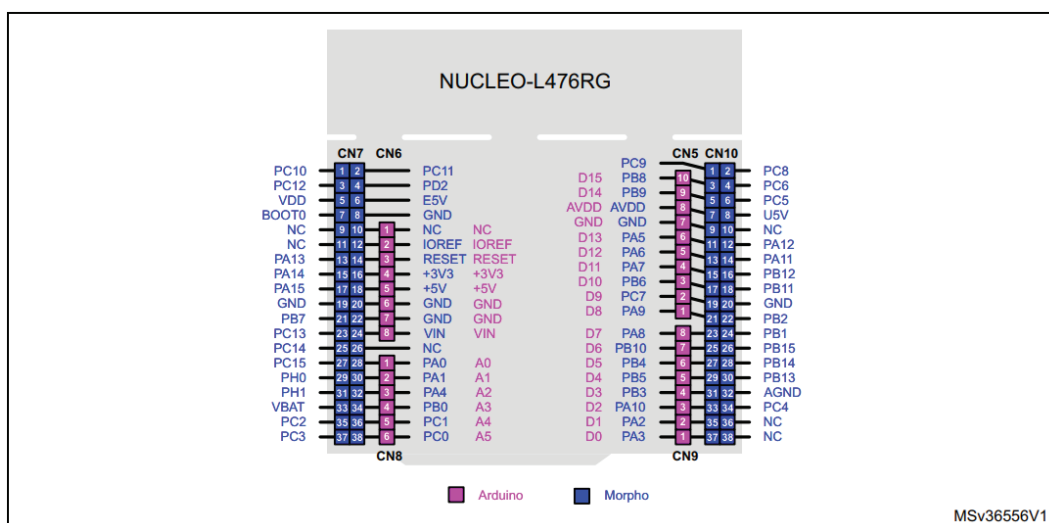


Ilustración 56: Conexiones del NUCLEO-L476RG

De esta manera, se puede ampliar la Tabla para ilustrar las conexiones necesarias con el controlador de la estación base. Para utilizar la plataforma de extensión del lector NFC son necesarios los conectores ARDUINO que incluye la plataforma de la Ilustración 56.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

Sin embargo, para incluir el receptor VLC en la estación base, es necesario conectar el pin de salida del receptor de luz al PC2 en los conectores MORPHO, que corresponde con el puerto SPI2_MISO del NUCLEO-L476RG.

Con ello, y tras configurar el reloj de la interfaz SPI2 para que sea igual que el del transmisor VLC, se permite al prototipo interpretar las transmisiones de luz recibidas.

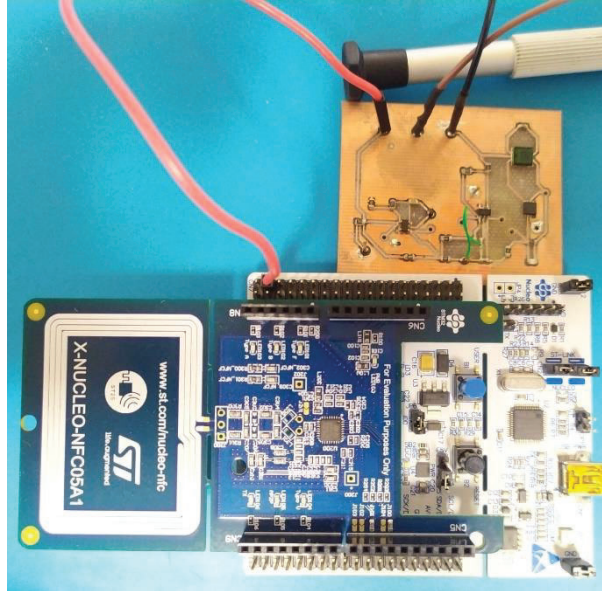


Ilustración 57: Prototipo de estación base

El funcionamiento de la estación base se verifica en apartados posteriores, dichas pruebas quedan recogidas y detalladas en el apartado 0.

3.3.2 PROTOTIPO DEL DISPOSITIVO IOUT

En el caso del dispositivo IoUT, éste debe ser capaz de comunicarse con la estación base utilizando transmisiones de luz o tecnología NFC. Con este objetivo, se ha descrito en los apartados 3.1.1 y 3.2.2, cómo se han implementado ambas tecnologías respectivamente.

Sin embargo, para la solución hardware final es necesario unir ambas tecnologías para constituir el prototipo final del dispositivo IoUT. Este proceso es relativamente simple, es suficiente con conectar un LED blanco al puerto MOSI de la interfaz SPI1 del NUCLEO-L053R8, tras conectar la plataforma de extensión que constituye el tag dinámico NFC.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

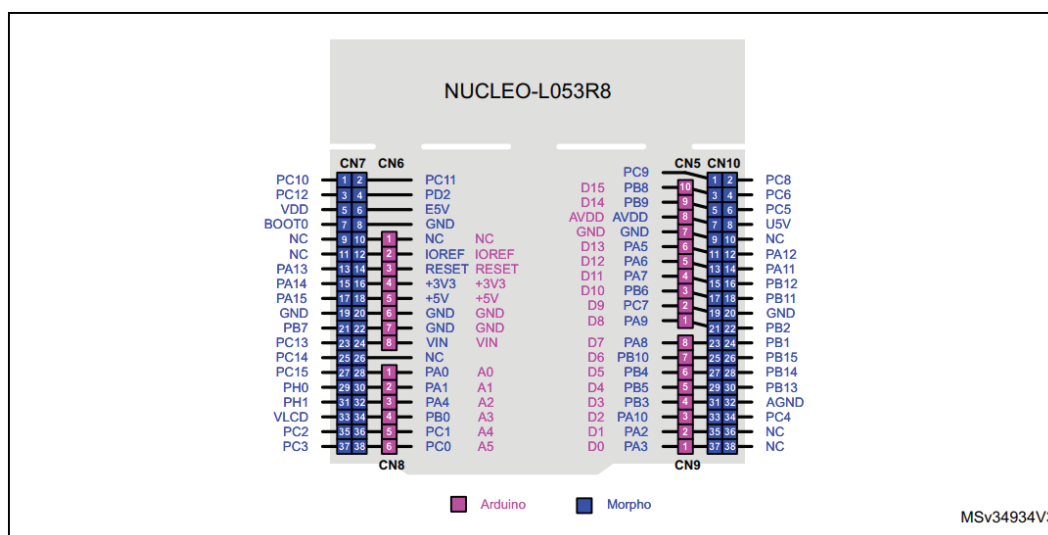


Ilustración 58: Conexiones del NUCLEO-L053R8

De esta manera, se puede ampliar la Tabla para ilustrar las conexiones necesarias con el controlador del dispositivo IoUT. Para utilizar la plataforma de extensión del tag dinámico NFC son necesarios los conectores ARDUINO que incluye la plataforma de la Ilustración 58.

Sin embargo, para incluir el transmisor VLC en prototipo del dispositivo IoUT, es necesario conectar el LED blanco al PA7 en los conectores MORPHO, que corresponde con el puerto SPI1_MOSI del NUCLEO-L053R8.

Se ha de destacar que, en este prototipo, no se incluye una resistencia de protección para el LED. Ya que, según los cálculos realizados al principio de este apartado, dicha resistencia es lo suficientemente baja como para considerar que el cable que une el LED al prototipo actúa como tal.

Con ello, y tras configurar el reloj de la interfaz SPI1 para que sea igual que el del receptor VLC, se permite al prototipo enviar los datos recopilados mediante transmisiones de luz blanca.

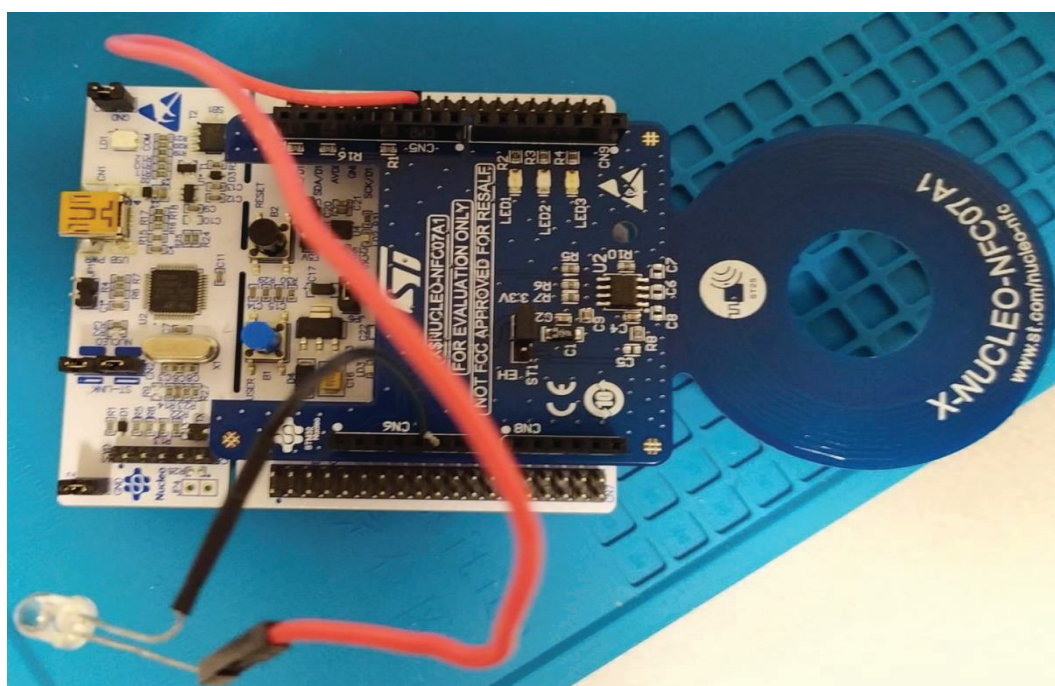


Ilustración 59: Prototipo del Dispositivo IoUT

El funcionamiento del dispositivo IoUT se verifica en apartados posteriores, dichas pruebas quedan recogidas y detalladas en el apartado 0.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas
para seguimiento de peces en agua dulce

4 ESTUDIO DE LA SOLUCIÓN SOFTWARE

En este capítulo se desarrolla la solución software adoptada para este trabajo de fin de máster. El objetivo es conseguir la operatividad descrita en los apartados anteriores tanto para el prototipo de la estación base como para el prototipo del dispositivo IoUT.

La solución software de este trabajo se basa en el lenguaje de programación C y el entorno de desarrollo de STM32CubeMx, STM32CubeIDE y SW4STM32, descritos en los apartados 2.3.3 y 2.4. Con esto, se plantea el estudio e implementación del código necesario para alcanzar los objetivos de este proyecto.

Por el lado de las comunicaciones mediante VLC, ha sido necesario tener en cuenta los parámetros del diseño del receptor VLC descrito en el subapartado 3.1.2. Dicho receptor está centrado en las señales de 6.8 KHz y su ancho de banda es de 39 KHz aproximadamente.

En dicho apartado se observó que la frecuencia de trabajo de 4 KHz prevista para este trabajo, sufría una ganancia de 15 dB aproximadamente. Con esta base, se pretende configurar una de las interfaces SPI disponibles en cada NUCLEO-Lxxxxx para implementar el transmisor y receptor VLC, sincronizando la frecuencia de funcionamiento de la interfaz en ambos núcleos.

No obstante, el transmisor VLC lo integra el prototipo del dispositivo IoUT, mientras que el receptor VLC debe integrarse en el prototipo de la estación base. Es por esto que, cada prototipo debe configurarse para compaginar este medio de comunicación con las operaciones NFC que deben realizar cada uno de ellos.

En el subapartado 3.3 se comenta que, para utilizar la tecnología NFC de las placas de expansión, es necesario utilizar una interfaz I2C del NUCLEO-L053R8 para comunicarse con la placa que implementa el tag dinámico. Y una interfaz SPI del NUCLEO-L476RG para controlar la plataforma del lector NFC.

Finalmente, se da paso al estudio y diseño de una solución software enfocada en las operaciones prioritarias que debe realizar cada prototipo. Es decir, la transferencia y recolección de energía, la transmisión y recepción de datos, y la presentación de los mismos al usuario final.

4.1 ESTUDIO DEL SOFTWARE PARA LA ESTACIÓN BASE

Inicialmente, se ha comenzado planteando un diagrama de flujo para las funciones que debe realizar la estación base, basado en el estudio llevado a cabo en los apartados anteriores. Dicho diagrama queda plasmado a continuación:

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

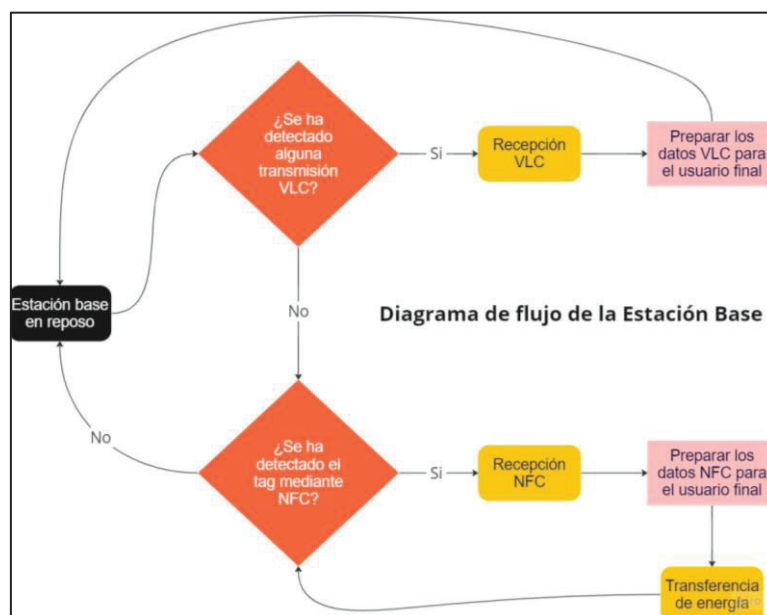


Ilustración 60: Planteamiento del diagrama de flujo para la estación base

En el diagrama planteado se resumen las operaciones de este prototipo. El prototipo de la estación parte de un estado de reposo del que sale sólo si se ha detectado alguna transmisión VLC entrante o algún dispositivo NFC que actúe como tag. Si no se detecta ninguno de estos casos, se vuelve al estado de reposo.

No obstante, cuando se detecte alguna transmisión VLC entrante, la estación debe ser capaz de recibir y preparar los datos para mostrárselos al usuario final antes de volver al estado de reposo inicial.

Por otro lado, si se detecta un tag dentro del campo cercano generado por el lector NFC. Se reciben los datos transferidos con el protocolo de mensajería NDEF y se muestran estos datos para que el usuario pueda verlos e interpretarlos.

Si se mantiene el tag dentro del campo generado por la estación, se procede a la transferencia de energía hasta que se deje de detectar la etiqueta. Momento a partir del cual la estación debe volver al estado de reposo.

En este TFM se ha optado por utilizar el software de expansión X-CUBE-NFC5 dispuesto en [47] por STMicroelectronics para los usuarios registrados en su plataforma. Esta expansión y los recursos que incluye se comentan en el subapartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

El código utilizado para implementar la tecnología NFC y VLC en el prototipo de la estación base queda descrito en los subapartados siguientes. Además, para el desarrollo de esta solución se deben tener en cuenta los documentos de referencia de las plataformas que integran dicho prototipo.

4.1.1 ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DEL LECTOR NFC

Ya que la implementación de la tecnología NFC es prioritaria para disponer de la capacidad de comunicación mediante campo cercano suficiente para habilitar la transmisión de datos y la recarga inductiva del prototipo para el dispositivo IoUT.

En esta implementación, el software del lector NFC se basa en el proyecto de ejemplo “STM32L476RG_NUCLEO_PollingTagDetectNdef” que incluye el pack de expansión X-CUBE-NFC5, no disponible en los entornos de desarrollo de STM32CubeMx y STM32CubeIDE,

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

utilizando el protocolo de mensajería NDEF para las comunicaciones mediante NFC.

Las razones por las que se ha optado por utilizar el pack de expansión X-CUBE-NFC5 se basan en que este pack dispone de las librerías necesarias para configurar la conexión entre el NUCLEO-L476RG y el X-NUCLEO-NFC05A1. Por otra parte, también incluye algunos ejemplos de utilidad para el estudio y diseño de la solución software de este proyecto.

Sin embargo, para poder explotar los recursos del X-CUBE-NFC5 es necesario utilizar un entorno de desarrollo al margen de los entornos proporcionados por STM32Cube. Ya que, éstos no incluyen este pack de expansión software y la importación de este pack en dichas plataformas ha sido inviable para el estudiante.

Por tanto, en este trabajo se ha decidido utilizar el SW4STM32 descrito en el subapartado 2.4. Con esta herramienta, se pueden importar los ficheros del pack de expansión dedicados específicamente a esta plataforma.

Para ello, se ha descargado el pack de expansión software disponible en [47]. Al acceder al fichero descargado, se presentan múltiples carpetas, cada una con distintos recursos de mayor o menor interés para el usuario y, en este caso, para el estudiante.

(C:) > Users > djgol > STM32Cube > Repository > Packs > STMicroelectronics > X-CUBE-NFC5 > 2.0.0

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
_htmresc	27/08/2019 11:38	Carpeta de archivos	
Documentation	27/08/2019 11:37	Carpeta de archivos	
Drivers	10/09/2019 10:48	Carpeta de archivos	
Middlewares	27/08/2019 11:38	Carpeta de archivos	
Projects	10/09/2019 10:36	Carpeta de archivos	
Release_Notes	11/09/2019 10:53	Opera GX Web Do...	77 KB

Ilustración 61: Directorios disponibles en el pack de expansión software X-CUBE-NFC5

Para este TFM se ha decidido utilizar uno de los proyectos de ejemplo que incluye X-CUBE-NFC5 para la plataforma SW4STM32. Este ejemplo se denomina “STM32L476RG_NUCLEO_PollingTagDetectNdef”, para poder estudiar y ejecutar dicho ejemplo, es necesario iniciar el SW4STM32.

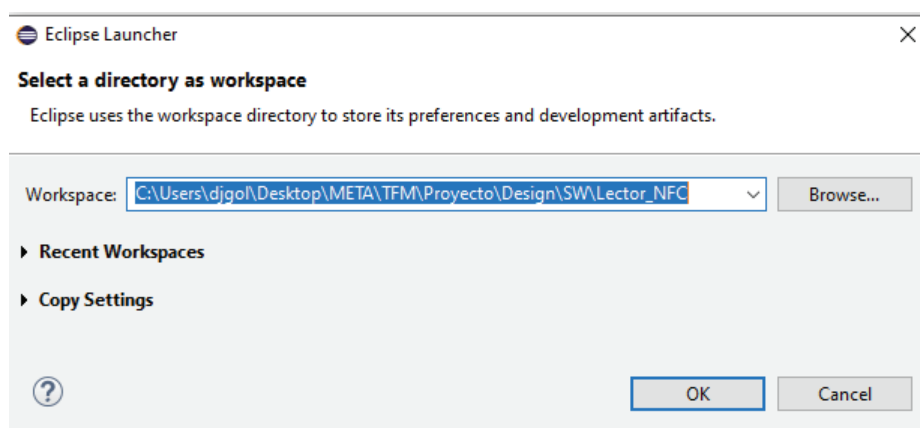


Ilustración 62: Selección de una carpeta de trabajo para el proyecto de ejemplo de X-CUBE-NF5 para SW4STM32

Tras seleccionar una carpeta de trabajo, se debe abrir el proyecto de ejemplo desde SW4STM32, al hacer clic en la pestaña “File” de la ventana principal de la plataforma se debe seleccionar la opción “Open Project from File System...”.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

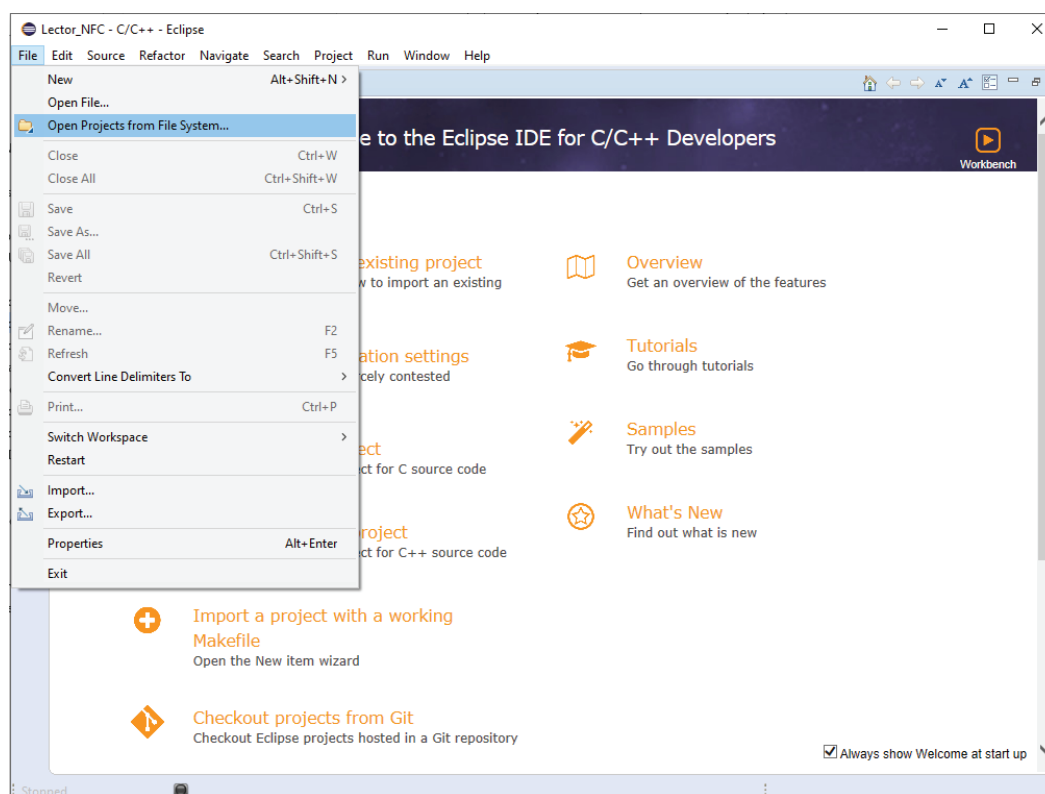


Ilustración 63: Acceso al proyecto de ejemplo incluido en X-CUBE-NFC5

De esta manera se puede acceder al directorio que contiene el proyecto de ejemplo, la ruta de acceso al proyecto desde la ventana de la Ilustración 61 es la siguiente, aunque esta ruta puede variar en otras versiones del X-CUBE-NFC5 o en el PC de cada usuario:

..\Projects\STM32L476RG-
Nucleo\Applications\PollingTagDetect\SW4STM32\STM32L476RG_NUCLEO_PollingTagDe
tectNdef

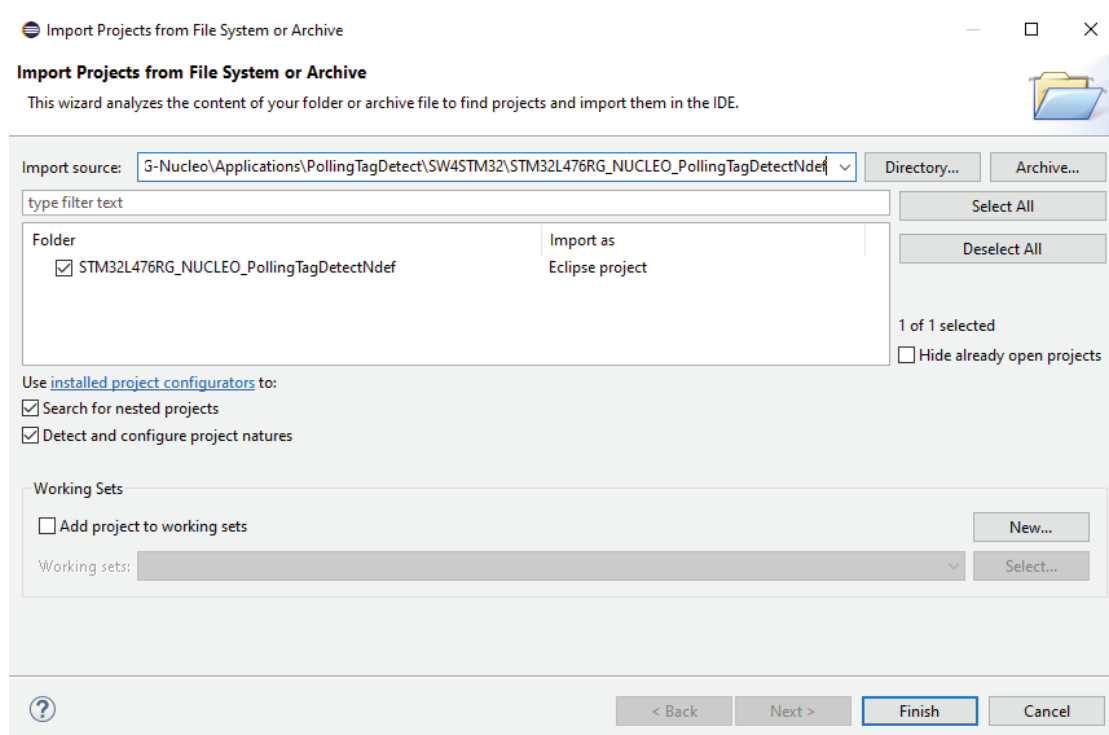


Ilustración 64: Importación del proyecto de ejemplo "STM32L476RG_NUCLEO_PollingTagDetectNdef"

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

Al acceder a la ruta anterior, se puede verificar la existencia del proyecto y el tipo de importación, en este caso, es “Eclipse project” ya que SW4STM32 está basada en el entorno de desarrollo software de Eclipse.

Tras importar el proyecto, se pueden desglosar los ficheros que contiene. Sin embargo, antes de comenzar a estudiar el ejemplo, es necesario compilarlo. De este modo, se puede corroborar fácilmente que no existen errores de programación en el proyecto importado, lo que implicaría un error en la importación u otro tipo de error desconocido procedente el propio proyecto.

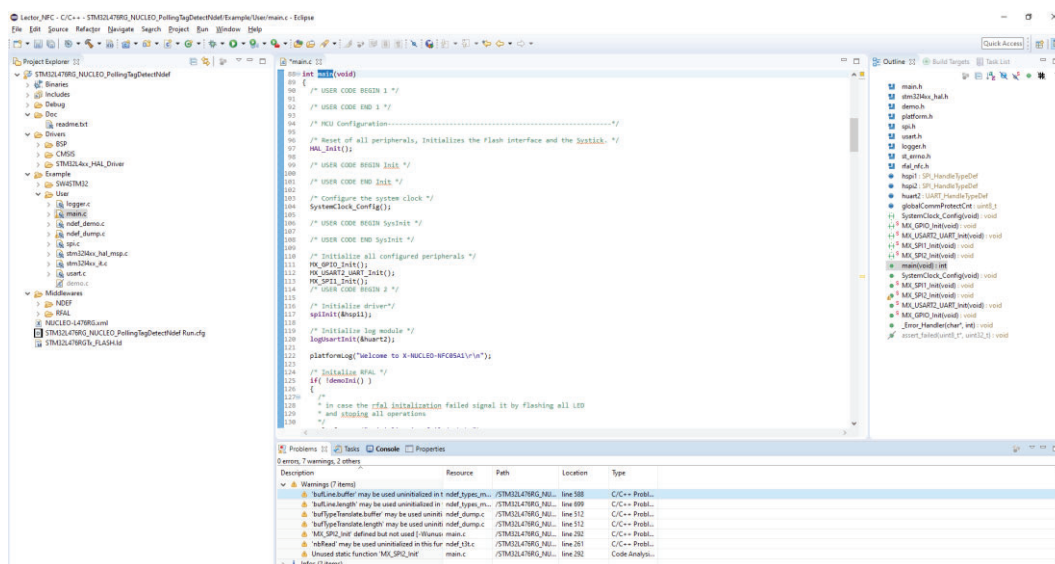


Ilustración 65: Compilación del proyecto de ejemplo “STM32L476RG_NUCLEO_PollingTagDetectNdef”

En esta ocasión, se ha compilado el proyecto con éxito, contiene algunas alertas generadas por el uso de variables que el compilador considera como no inicializadas y por algunos métodos no utilizados. Pero no parece tener errores de programación y se podría ejecutar en el prototipo de la estación base del subapartado 3.3.1.

Sin embargo, entre los recursos que incluye este ejemplo se encuentra `platformLog()`. Esta es una extensión de algunas macros de la librería de RFAL y permite imprimir los mensajes de información de ejecución que contiene el código de los ficheros principales mencionados más adelante.

Esto se consigue gracias a `logUsartInit()`, que inicializa la interfaz USART2 y permite que `platformLog()` utilice dicha interfaz para mandar mensajes al puerto virtual al que se conecte el prototipo. Estos pines no se han incluido en la Tabla ya que con el planteamiento hardware no se contempló la utilización de esta interfaz, pero se señalan en la siguiente tabla:

Tabla III: Conexiones de la interfaz USART2 del NUCLEO-L476RG

STM32 L476RGTx – Piont	Función – USART2
PA2	Tx
PA3	Rx

RFAL es una librería que representa la capa de abstracción de RF y su hoja técnica se encuentra disponible en [48]. Esta librería contiene un middleware para construir aplicaciones habilitadas para NFC utilizando los lectores NFC de alto rendimiento ST25R y permite la compatibilidad con todas las principales tecnologías y protocolos NFC, como el protocolo de mensajería NDEF que se describe brevemente en el subapartado 4.2.1.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

Este proyecto incluye más librerías, drivers y otros recursos de interés. Sin embargo, los ficheros principales para el estudio de este ejemplo son “main.c” y “ndef_demo.c”. En el primer fichero se inicializa el NUCLEO-L476RG, se configuran los periféricos necesarios, las librerías y se habilita el driver de la interfaz SPI1 que contiene este ejemplo, para la conexión con la plataforma de expansión NFC.

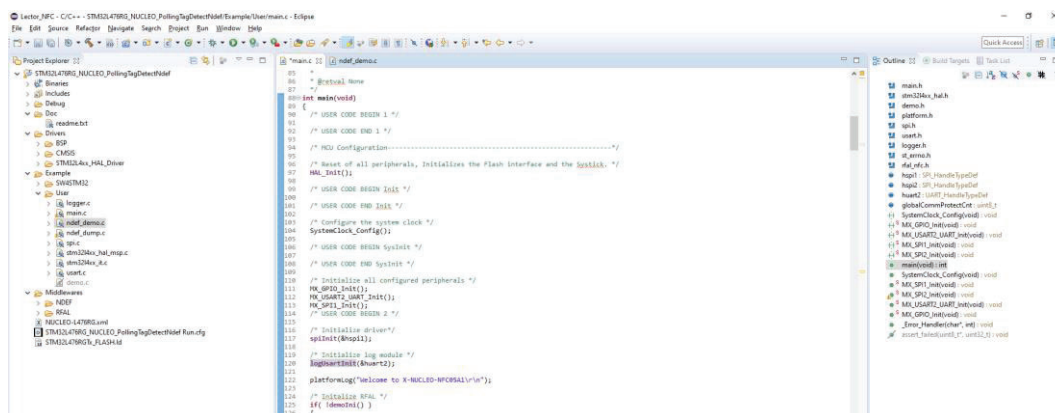


Ilustración 66: Inicialización del NUCLEO-L476RG y el X-NUCLEO-NFC05A1

Además, en este fichero la única función del bucle infinito es la llamada al método demoCycle(), que mantiene al lector a la espera de detectar alguna etiqueta con la que comunicarse o transferir energía.

```
167 /* Infinite loop */
168
169 while (1)
170 {
171     /* Run Demo Application */
172     demoCycle();
173 }
174
175 /* USER CODE END 3 */
```

Ilustración 67: Bucle de ejecución del fichero "main.c"

Dicho método se implementa en el fichero “ndef_demo.c” y tiene unas 200 líneas de código C. En esta función se utilizan métodos de las librerías NFC y RFAL para configurar las comunicaciones del lector e implementen el protocolo NDEF.

Adicionalmente, en este método se incluyen varios mensajes para notificar al usuario distintas opciones de comunicación posibles con la etiqueta detectada. Estos mensajes se pueden observar en el subapartado 5.2.1 mientras se prueba la capacidad de comunicación de la tecnología NFC de este trabajo.

Finalmente, para poder observar los mensajes proporcionados por platformLog() se debe utilizar uno de los menús desplegables de la consola disponible en SW4STM32. Para ello, basta con hacer clic en el desplegable de la opción “Open Console” de la parte superior derecha de la ventana de “Console”



Ilustración 68: Creación de una nueva consola de conexión

Al desplegar las múltiples opciones para abrir una nueva consola, se ha de seleccionar “Command Shell Console”. Para poder configurar una conexión virtual entre el prototipo y el PC del usuario mediante un puerto serie.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

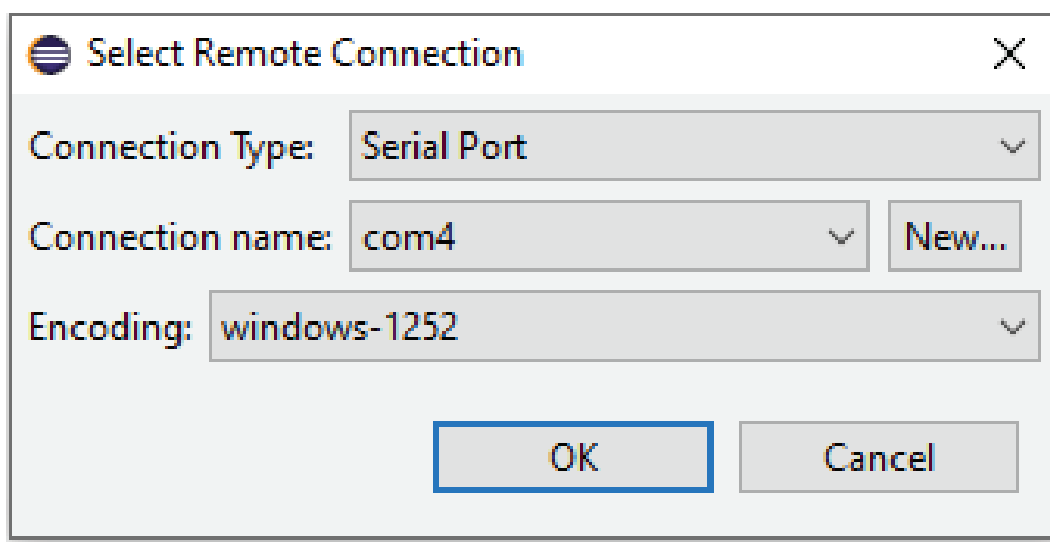


Ilustración 69: Configuración de la conexión remota con el prototipo desde la consola de SW4STM32

Tras seleccionar “Serial Port” como tipo de conexión, se recomienda crear una nueva conexión en la opción “New...”. De esta manera, se puede nombrar la conexión, seleccionar el puerto serie para la conexión, que debe ser el mismo al que se conecta el prototipo mediante la conexión USB con el NUCLEO-L476RG.

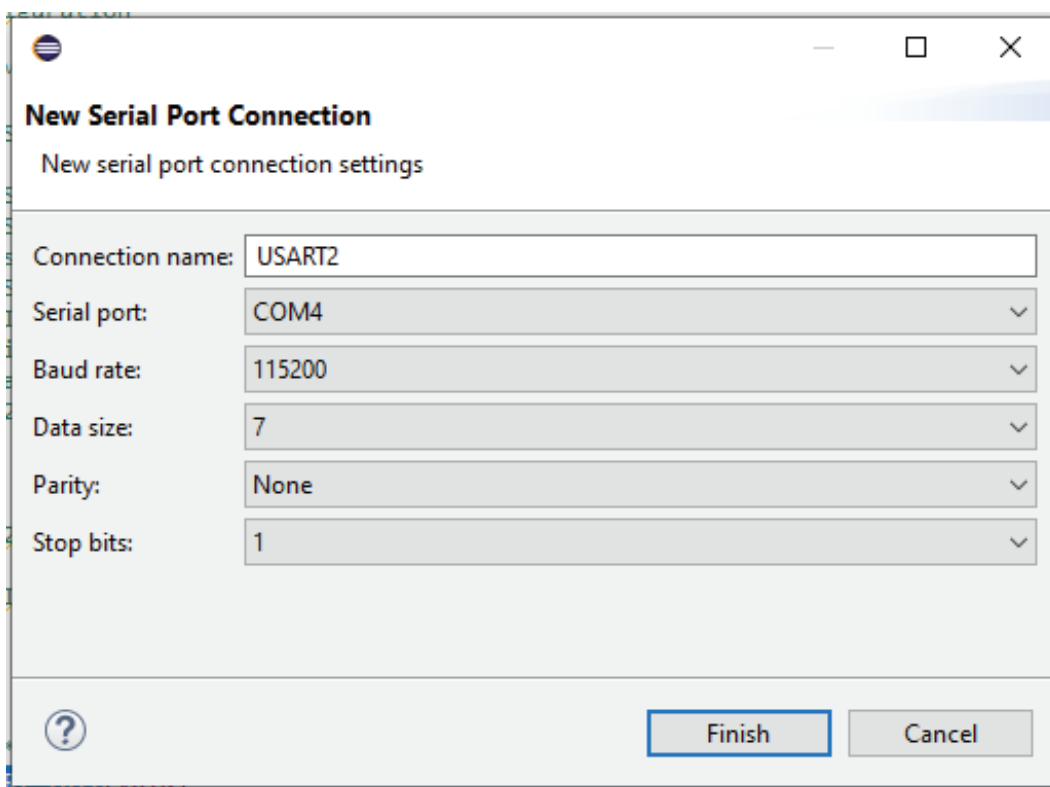


Ilustración 70: Configuración de una nueva conexión mediante puerto serie

Para poder conectar el prototipo, es necesario revisar la configuración de los relojes del sistema y la configuración predeterminada por el ejemplo para la interfaz USART2. En este caso, la velocidad de transmisión es de 115200 baudios, con un tamaño de trama de 8 bits sin paridad. Siendo 7 de ellos para datos y 1 como bit de parada.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce



Ilustración 71: Consola para la revisión de los mensajes de ejecución

Tras crear la conexión con el puerto serie, se abre automáticamente la consola que permite observar los mensajes de ejecución de este ejemplo gracias a la interfaz USART2 del STM32-L476RG y las librerías del proyecto.

4.1.2 ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DEL RECEPTOR VLC

Para la recepción de datos mediante VLC, se ha estudiado la utilización de múltiples interfaces y diferentes métodos para compaginar esta tarea con las operaciones realizadas para implementar NFC.

En este trabajo, se ha seleccionado la interfaz SPI2 del NUCLEO-L476RG para habilitar la recepción de datos VLC por parte de la estación base. Antes de comenzar su implementación, se recomienda estudiar el HAL de la serie de microcontroladores STM32L4xxxx disponible en [49].

```
53 /* Private variables -----  
54 SPI_HandleTypeDef hspi1;  
55  
56 SPI_HandleTypeDef hspi2;  
57
```

Ilustración 72: Implementación del manejador de la interfaz SPI2 del NUCLEO-L476RG

Para empezar, se debe inicializar el manejador de la interfaz SPI2 “hspi2” en el fichero “main.c”, se ha introducido la línea de código necesaria justo debajo del manejador ya incluido para la interfaz SPI1.

Luego, se implementa la función “static void MX_SPI2_Init(void)”. Para configurar los parámetros de la interfaz SPI2 se debe recordar que la frecuencia de la interfaz depende de la configuración de los relojes del núcleo.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

```
291  /* SPI2 init function */
292  static void MX_SPI2_Init(void)
293  {
294
295      /* SPI2 parameter configuration*/
296      hspi2.Instance = SPI2;
297      hspi2.Init.Mode = SPI_MODE_MASTER;
298      hspi2.Init.Direction = SPI_DIRECTION_2LINES_RXONLY;
299      hspi2.Init.DataSize = SPI_DATASIZE_8BIT;
300      hspi2.Init.CLKPolarity = SPI_POLARITY_LOW;
301      hspi2.Init.CLKPhase = SPI_PHASE_1EDGE;
302      hspi2.Init.NSS = SPI_NSS_SOFT;
303      hspi2.Init.BaudRatePrescaler = SPI_BAUDRATEPRESCALER_256;
304      hspi2.Init.FirstBit = SPI_FIRSTBIT_MSB;
305      hspi2.Init.TIMode = SPI_TIMODE_DISABLE;
306      hspi2.Init.CRCCalculation = SPI_CRCCALCULATION_DISABLE;
307      hspi2.Init.CRCPolynomial = 7;
308      if (HAL_SPI_Init(&hspi2) != HAL_OK)
309      {
310          Error_Handler();
311      }
312
313  }
314
```

Ilustración 73: Parámetros de configuración de la interfaz SPI2 del NUCLEO-L476RG

Debido a que los STM32L0xxxx y los STM32L4xxxx son series distintas de microcontroladores de la misma familia, su arquitectura es ligeramente diferente, lo que implica que el ajuste de la frecuencia para sincronizarla con el prototipo del dispositivo IoUT no puede ser exacto.

También, se debe tener en cuenta que la interfaz SPI debe configurarse en el modo “Receive Only Master” para que pueda actuar como maestro de las comunicaciones y sólo sea capaz de recibir datos, no de transmitirlos. En el subapartado 4.2 se realiza la configuración de una interfaz SPI de manera más visual, aunque no con la misma configuración.

Tabla IV: Conexiones de la interfaz SPI2 del NUCLEO-L476RG

STM32 L476RGTx – Piont	Función – SPI2
PB10	SCK
PC2	MISO

Por otra parte, anteriormente y más adelante se comenta que no se ha incluido ningún middleware específico para habilitar la multitarea en este proyecto. Por ello, para poder recibir transmisiones SPI entrantes, es necesario utilizar interrupciones que posibiliten la recepción mediante esta interfaz.

En [49] se encuentra la hoja técnica donde se describen los recursos incluidos en el HAL para los STM32L4xxxx, con el fin de implementar la recepción de datos mediante la interfaz SPI2, es necesario utilizar “HAL_SPI_Receive_IT()”. Este método utiliza una interrupción del microcontrolador para permitir la recepción de datos a través de esta interfaz SPI. Sin embargo, cabe la posibilidad de que esta interfaz interfiera con alguna de las operaciones realizadas por el proyecto de ejemplo en el que se basa esta solución.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

```
168  /* Infinite loop */
169  /* USER CODE BEGIN WHILE */
170
171  float Data[6] = {};
172
173  while (1)
174  {
175      /*Recepcion de datos VLC mediante la interfaz SPI2*/
176      if(HAL_SPI_Receive_IT(&hspi2, (uint8_t*)&Data, sizeof(Data))){
177          platformLog("Datos VLC recibidos por el SPI2: %s\r\n", (char*)Data);
178      }
179  }
```

Ilustración 74: Implementación del código necesario para la recepción de datos VLC mediante la interfaz SPI2

No obstante, el método anterior no es suficiente, para poder mostrar los datos al usuario es necesario crear un buffer de recepción de datos, en este caso, se ha introducido el buffer “Data” de tipo “float”, es decir, del mismo tipo que los datos que se espera recibir.

Además, la recepción SPI se ha introducido dentro de una condición para que siempre que se reciban datos desde la interfaz, aparezca una notificación en la consola del usuario indicando los datos recibidos mediante VLC. Con todo lo descrito en este subapartado, debería ser posible la recepción de los datos almacenados en el buffer “Data” mediante la interfaz SPI2 del NUCLEO-L476RG.

4.2 ESTUDIO DEL SOFTWARE PARA EL DISPOSITIVO IOUT

En primer lugar, se ha comenzado planteando un diagrama de flujo para las operaciones que debe realizar el dispositivo IoUT, basado en el estudio llevado a cabo en los apartados anteriores. Dicho diagrama queda plasmado en la siguiente ilustración:

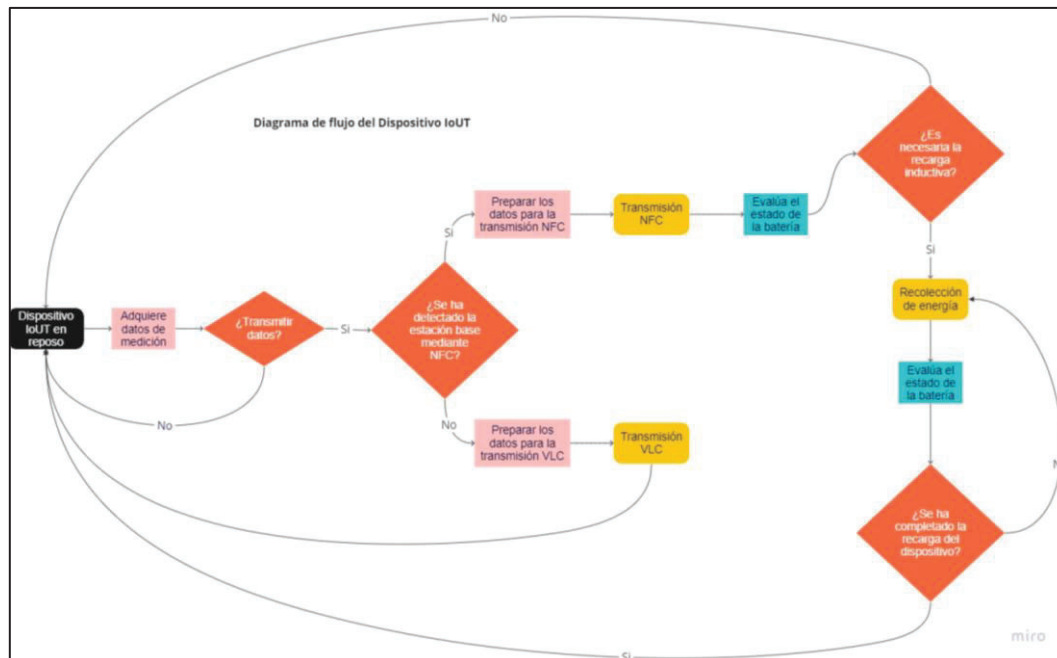


Ilustración 75: Planteamiento del diagrama de flujo para el Dispositivo IoUT

En el diagrama planteado se resumen las operaciones de este prototipo. El dispositivo IoUT parte de un estado de reposo del que sale para adquirir datos. Si no considera necesario transmitirlos, vuelve al estado de reposo.

Si decide transmitir los datos, el dispositivo debe buscar la estación base o algún otro dispositivo que actúe como el lector NFC de este proyecto. En caso de no detectar ningún dispositivo compatible con la tecnología NFC del tag dinámico, el dispositivo procede a preparar los datos

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

para la transmisión VLC y proceder con la misma, antes de volver al estado de reposo.

Sin embargo, si el prototipo detecta algún dispositivo NFC compatible, preparará los datos para su transmisión NFC. El protocolo utilizado para el intercambio de datos entre plataformas se describe más adelante.

Tras la comunicación, el prototipo evalúa el estado de la batería y, si es necesario recargarla, procede a la recolección de energía transferida por la estación base hasta completar la recarga. No obstante, para que todo esto suceda, la antena del dispositivo IoUT debe estar situada sobre la antena de la estación base.

Ya que, de lo contrario, el tag dinámico NFC ya no detectaría la emisión de energía del lector NFC y la recolección de energía mediante esta tecnología sería nula. Lo que obligaría al dispositivo IoUT a volver al estado de reposo.

De manera adicional, se ha decidido utilizar el software de expansión X-CUBE-NFC7 dispuesto en [50] por STMicroelectronics para los usuarios registrados en su plataforma. Esta expansión y los recursos que incluye se comentan en el subapartado 4.2.14.2.1.

El código utilizado para implementar la tecnología NFC y VLC en el prototipo del dispositivo IoUT queda descrito en los subapartados siguientes. Además, para el desarrollo de esta solución se deben tener en cuenta los documentos de referencia de las plataformas que integran el prototipo del dispositivo IoUT.

4.2.1 ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DEL TAG DINÁMICO NFC

Debido a la prioridad de la implementación de la tecnología NFC para disponer de la capacidad de comunicación mediante campo cercano suficiente para habilitar la transmisión de datos y la recarga inductiva del dispositivo.

Para esta implementación, el software del tag dinámico se basa en el proyecto de ejemplo “NDEF_URI” que incluye la plataforma STM32CubeMx y que implementa el pack de expansión software X-CUBE-NFC7 utilizando el protocolo NDEF para las comunicaciones mediante NFC.

El pack de expansión X-CUBE-NFC7 dispone de las librerías necesarias para configurar la conexión entre el NUCLEO-L053R8 y el X-NUCLEO-NFC07A1. Además, también incluye algunos ejemplos, como el proyecto “NDEF_URI”, útiles en este TFT.

NDEF es un protocolo de comunicación descrito en [51]. Consiste en un formato binario estructurado en mensajes, donde cada uno de los mensajes puede contener varios registros. Cada registro se compone de una cabecera, que contiene metadatos sobre el registro, como el tipo de registro, la longitud, y la carga útil, que contiene el contenido del mensaje. Este protocolo para las transacciones NFC suele tener poca duración y contener los registros mínimos necesarios.

Mediante NDEF es posible el intercambio de archivos grandes. Sin embargo, la solución proporcionada para este trabajo prevé el intercambio de pocos bytes, un tamaño de mensajes aceptable para este protocolo.

Para comenzar, se ha creado un nuevo proyecto con el ejemplo “NDEF_URI” que incluye la plataforma STM32CubeMx e implementa el pack de expansión X-CUBE-NFC7. Para ello, es necesario acceder a la opción “ACCESS TO EXAMPLE SELECTOR” en la ventana inicial de la plataforma de desarrollo mencionada.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

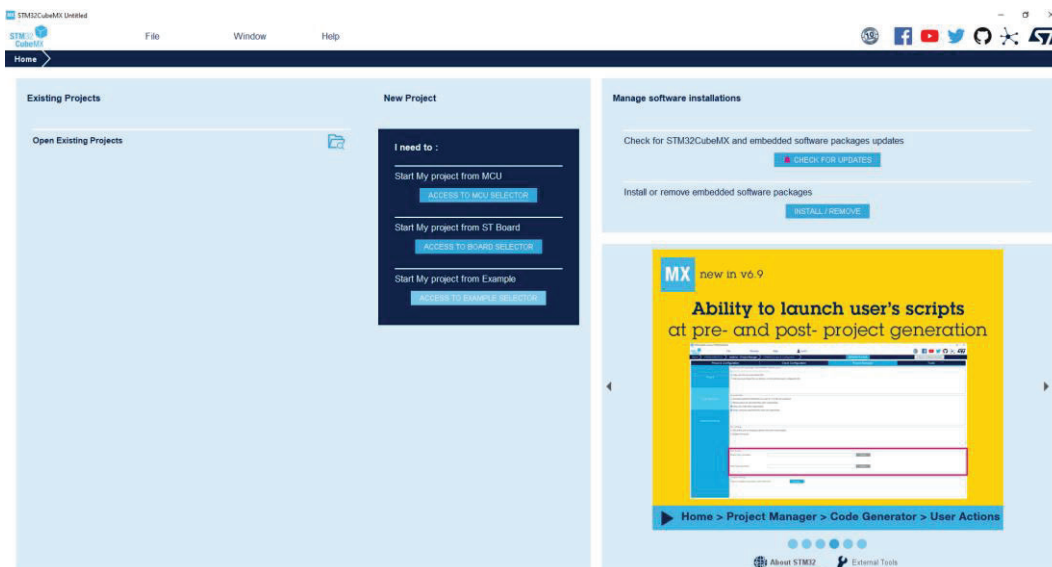


Ilustración 76: Acceso a los proyectos de ejemplo incluidos en STM32CubeMx

Tras esto, se accede a la opción “Example Selector” y en el buscador se introduce el nombre del proyecto de ejemplo “NDEF_URI”. Tras esta búsqueda, aparecen múltiples opciones, es necesario cargar el proyecto planteado para la plataforma de desarrollo y de expansión utilizadas en este trabajo.

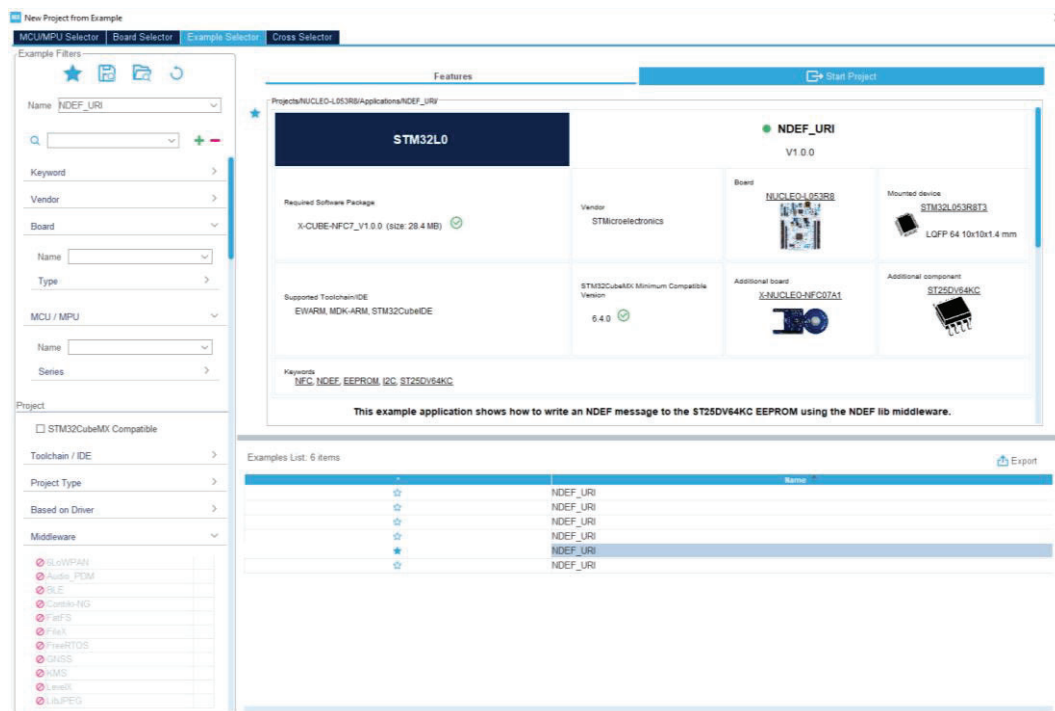


Ilustración 77: Selección del proyecto de ejemplo "NDEF_URI"

Al hacer doble clic sobre el ejemplo remarcado en la ilustración anterior, se ha de seleccionar el directorio en el que se desea crear el proyecto y el entorno de desarrollo con el que se planea trabajar. Para este prototipo, se ha utilizado el STM32CubeIDE y el directorio de instalación escogido por el estudiante.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

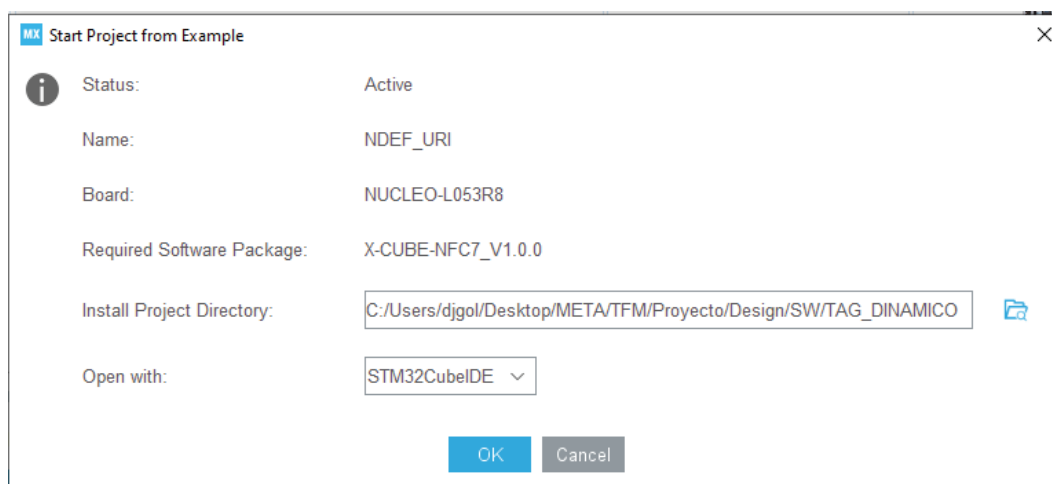


Ilustración 78: Creación del proyecto de ejemplo “NDEF_URI” para implementar las operaciones NFC

Seguidamente, se muestra la ventana del entorno STM32CubeMx para representar el microcontrolador con los pines que se están utilizando y las distintas opciones de configuración que ofrece el STM32CubeIDE.

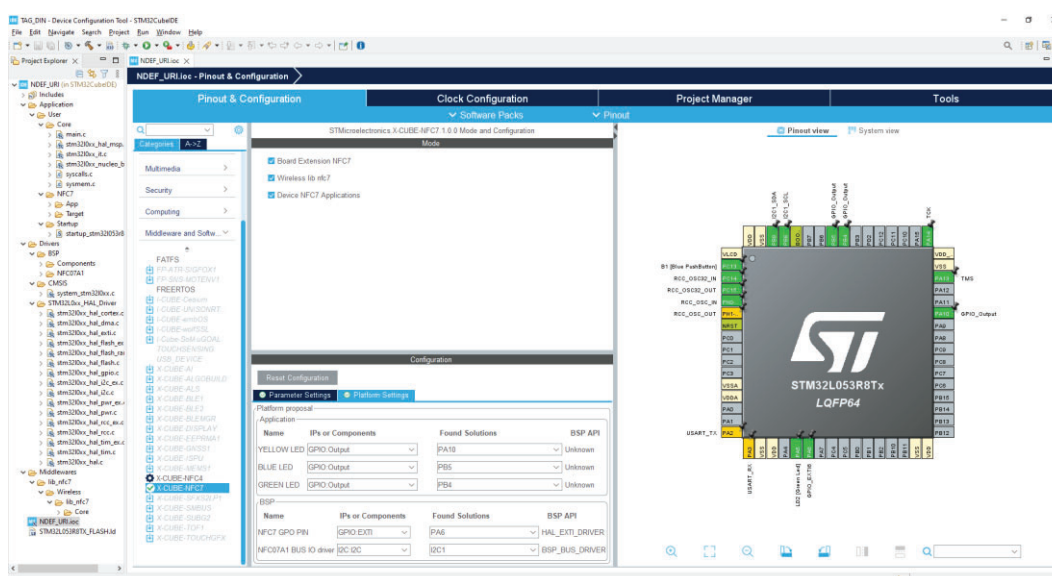


Ilustración 79: Configuración del pack de expansión software X-CUBE-NFC7 en el STM32L053R8Tx

Se puede observar en la ilustración anterior que el pack de expansión software X-CUBE-NFC7 está instalado y activado. En las opciones que se pueden seleccionar del modo de operación, aparecen todas marcadas para incluir los drivers de la plataforma de extensión del X-NUCLEO-NFC07A1, las librerías con los recursos necesarios para implementar la tecnología NFC y las aplicaciones incluidas en este pack.

No se puede acceder a los parámetros de configuración del pack a través de esta ventana, pero se pueden observar los parámetros de configuración de la plataforma de expansión. Los pines PA10, PB5 y PB4 del microcontrolador están asignados a los LED amarillo, azul y verde de la placa del tag dinámico NFC.

Por otro lado, se implementa un puerto de interrupción con el pin PA6 y el bus de comunicaciones utilizado para programar la EEPROM del ST25DV64KC es I2C, en este núcleo, se selecciona la interfaz I2C1 para operar como bus del BSP.

La interfaz I2C1 utiliza los pines incluidos en la tabla siguiente:

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

Tabla V: Conexiones de la interfaz I2C1 del NUCLEO-L053R8

STM32L053R8Tx – Pionut	Función – I2C1
PB9	SDA
PB8	SCL

Por otro lado, se implementa un puerto de interrupción con el pin PA6 y el bus de comunicaciones utilizado para programar la EEPROM del ST25DV64KC es I2C, en este núcleo, se selecciona la interfaz I2C1 para operar como bus del BSP.

Como parte del estudio de la implementación del dispositivo IoUT, del mismo modo que con la estación base, se ha contemplado la posibilidad de implementar el middleware “FREERTOS” incluido en el STM32CubeIDE para implementar el diagrama de flujo de la Ilustración 75.

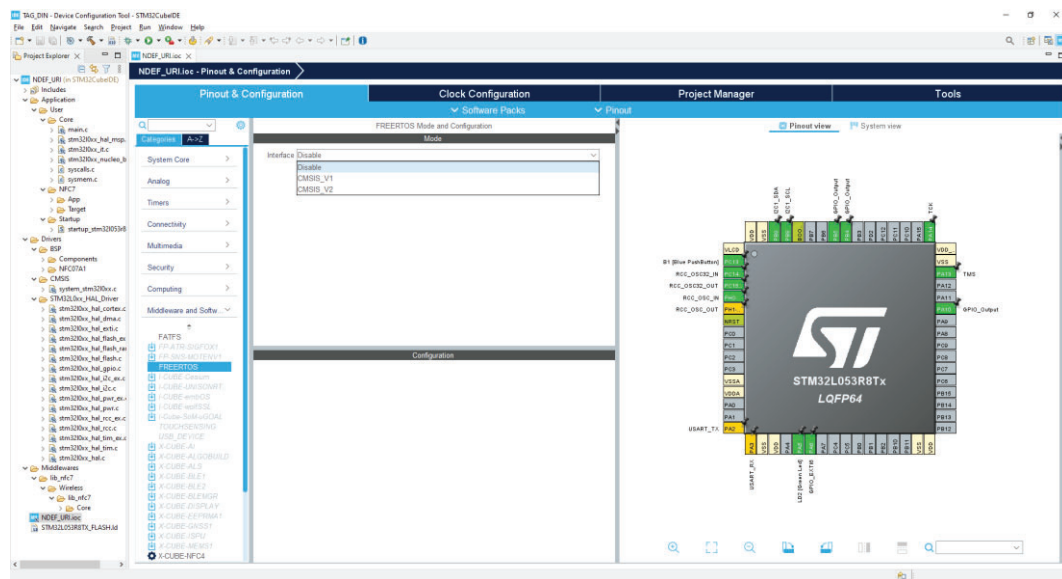


Ilustración 80: Pack de expansión software “FREERTOS”

Es manual disponible en [52], describe la API CMSIS_V1 y la implementación de referencia CMSIS-RTOS RTX, diseñada para dispositivos basados en procesadores Cortex-M. El kernel del sistema operativo en tiempo real se utiliza para crear aplicaciones que ejecutan múltiples tareas simultáneamente. Estas tareas son ejecutadas por hilos que operan de manera cuasi-paralela.

Aunque es posible crear aplicaciones en tiempo real sin usar un RTOS, existen numerosos problemas de programación, mantenimiento y temporización de operaciones que pueden resolverse de manera más eficiente gracias a un RTOS.

Por otra parte, en [53] se explica la API CMSIS_V2. Proporciona interfaces genéricas de RTOS para dispositivos basados en procesadores Arm® Cortex®. Ofrece una API estandarizada para componentes de software que requieren funcionalidad RTOS, brindando importantes beneficios a los usuarios y a la industria del software.

La segunda versión de la API CMSIS simplifica algunos de los métodos utilizados en su versión anterior. De esta manera, el conjunto de características unificado del CMSIS-RTOS2 respecto a su predecesor, reduce el esfuerzo de aprendizaje y simplifica el intercambio de componentes de software.

No obstante, en el entorno de desarrollo donde se plantea implementar el código de este prototipo, no permite activar el pack de expansión software con los recursos para el tag dinámico NFC junto al middleware “FREERTOS”, sin importar que versión de la API se utilice.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

Los errores que acompañan al intento de implementar ambos paquetes software están vinculados a problemas de memoria y ejecución. Aunque para su solución, se considera necesario dedicar más tiempo del disponible en este trabajo para rehacer las librerías y funciones que permiten la operatividad de ambos paquetes.

Sin embargo, en este trabajo no se pretende implementar una aplicación concreta para este prototipo, ni se dispone del tiempo suficiente para desarrollar una aplicación software que incluya las operaciones descritas en el diagrama de flujo del prototipo.

Por tanto, se ha descartado la utilización del middleware “FREERTOS” y, en los apartados posteriores, se plantea otra posible solución para combinar las operaciones vinculadas a la tecnología VLC y a la tecnología NFC. Dicha solución consiste en la invocación de interrupciones por parte de las interfaces pertinentes, no obstante, esta alternativa se desarrolla en los subapartados 4.1.2 y 4.2.2.

Otro aspecto importante del ejemplo de comunicaciones NFC utilizado, es la configuración de los relojes del sistema. El proyecto de ejemplo “NDEF_URI” sitúa los relojes del sistema a la frecuencia de 2,097 MHz

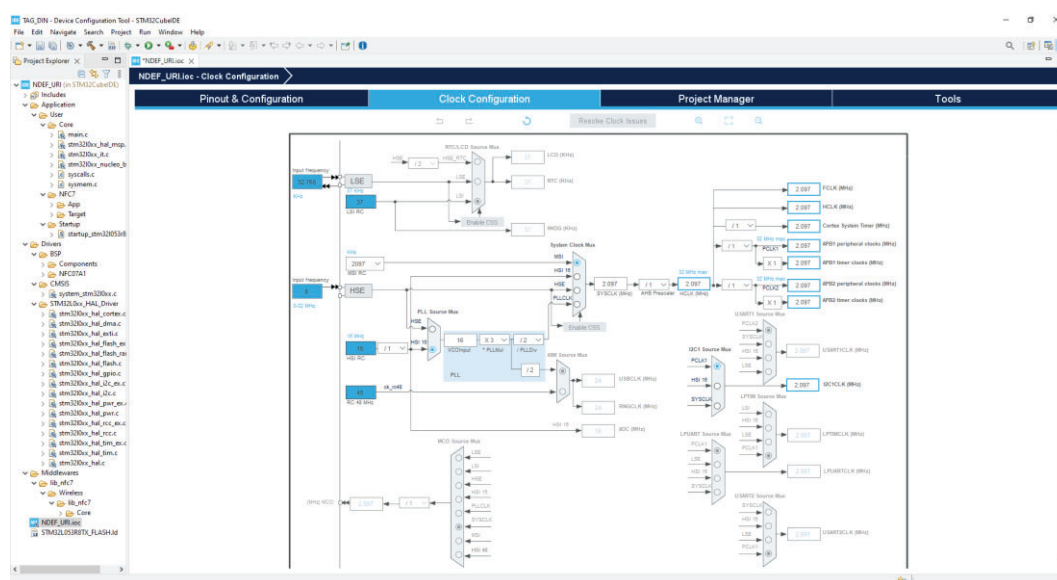


Ilustración 81: Configuración de los relojes del sistema en el proyecto de ejemplo "NDEF_URI"

Es importante que, si se contempla manipular alguna de las opciones disponibles en esta ventana, se debe tener en cuenta los documentos de referencia de la placa de desarrollo, la plataforma de expansión y el pack de expansión software. Por ello, para el desarrollo de nuevas y/o futuras aplicaciones basadas en este ejemplo. Es imprescindible conocer la configuración necesaria para los relojes del sistema de acuerdo con las características de la nueva aplicación.

Finalmente, en este ejemplo, de entre las múltiples librerías y archivos que incluye. Los archivos de mayor relevancia dentro de este ejemplo son: “main.c” y “app_nfc7.c”. El primero inicializa y configura los periféricos, mientras que el segundo contiene las operaciones y recursos necesarios para implementar las comunicaciones NFC mediante el protocolo NDEF.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

```
MX *NDEF_URI.ioc  *main.c x app_nfc7.c
1  /* USER CODE BEGIN Header */
4  * @file          : main.c
18 /* USER CODE END Header */
19 /* Includes -----*/
20 #include "main.h"
21 #include "app_nfc7.h"
22
23 /* Private function prototypes -----*/
24 void SystemClock_Config(void);
25 static void MX_GPIO_Init(void);
26
27 /**
28  * @brief The application entry point.
29  * @retval int
30  */
31 int main(void)
32 {
33
34  /* MCU Configuration-----*/
35
36  /* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the Systick. */
37  HAL_Init();
38
39  /* Configure the system clock */
40  SystemClock_Config();
41
42  /* Initialize all configured peripherals */
43  MX_GPIO_Init();
44  MX_NFC7_Init();
45
46  while (1)
47  {
48
49  MX_NFC7_Process();
50
51  }
52
53 }
```

Ilustración 82: Fichero "main.c" del proyecto de ejemplo "NDEF_URI"

Seguidamente, en "app_nfc7.c" se incluyen múltiples métodos que permiten la configuración de la plataforma de expansión, la comunicación entre las placas que forman el dispositivo IoUT y del protocolo de comunicación NDEF utilizado en este ejemplo.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

```
MX *NDEF_URI.ioc  *main.c  *app_nfc7.c X
43 void MX_NFC7_Init(void)
50
51 void MX_NFC7_Process(void)
57
58 void MX_NFC7_NDEF_URI_Init(void) /* Configuration of X-NUCLEO-NFC02A1
59 {
60     /******
61     /* Init of the LEDs on X-NUCLEO-NFC07A1 board */
62     NFC07A1_LED_Init(GREEN_LED);
63     NFC07A1_LED_Init(BLUE_LED);
64     NFC07A1_LED_Init(YELLOW_LED);
65     NFC07A1_LED_On( GREEN_LED );
66     HAL_Delay( 300 );
67     NFC07A1_LED_On( BLUE_LED );
68     HAL_Delay( 300 );
69     NFC07A1_LED_On( YELLOW_LED );
70     HAL_Delay( 300 );
71
72     /* Init ST25DVXXKC driver */
73     while( NFC07A1_NFCTAG_Init(NFC07A1_NFCTAG_INSTANCE) != NFCTAG_OK );
74
75     /* Reset Mailbox enable to allow write to EEPROM */
76     NFC07A1_NFCTAG_ResetMBEN_Dyn(NFC07A1_NFCTAG_INSTANCE);
77
78     NfcTag_SelectProtocol(NFCTAG_TYPE5);
79
80     /* Check if no NDEF detected, init mem in Tag Type 5 */
81     if( NfcType5_NDEFDetection( ) != NDEF_OK )
82     {
83         CCFileStruct.MagicNumber = NFCT5_MAGICNUMBER_E1_CCFILE;
84         CCFileStruct.Version = NFCT5_VERSION_V1_0;
85         CCFileStruct.MemorySize = ( ST25DVXXKC_MAX_SIZE / 8 ) & 0xFF;
86         CCFileStruct.TT5Tag = 0x05;
87         /* Init of the Type Tag 5 component (M24LR) */
88         while( NfcType5_TT5Init( ) != NFCTAG_OK );
89     }
90
91     /* Init done */
92     NFC07A1_LED_Off( GREEN_LED );
93     HAL_Delay( 300 );
94     NFC07A1_LED_Off( BLUE_LED );
95     HAL_Delay( 300 );
96     NFC07A1_LED_Off( YELLOW_LED );
97     HAL_Delay( 300 );
98
99     /* Prepare URI NDEF message content */
100     strcpy( URI.protocol,URI_ID_0x01_STRING );
101     strcpy( URI.URI_Message,"st.com/st25-demo" );
102     strcpy( URI.Information,"\0" );
103
104     /* Write NDEF to EEPROM */
105     HAL_Delay(5);
106     while( NDEF_WriteURI( &URI ) != NDEF_OK );
107
108     /* Set the LED3 on to indicate Programming done */
109     NFC07A1_LED_On( YELLOW_LED );
110 }
111
112
```

Ilustración 83: Fichero "app_nfc7.c" del proyecto de ejemplo "NDEF_URI"

El método "MX_NFC7_Init(void)" es invocado desde el "main.c". Dicha función contiene sólo una llamada a la función "MX_NFC7_NDEF_URI_Init(void)". Donde se inicializa el X-NUCLEO-NFC07A1 y se configura el mensaje que se pretende intercambiar, junto a los registros que contiene.

En este caso, se puede observar que se va a enviar una URI con el contenido "st.com/st25-demo". Este es el contenido útil del mensaje, y es la característica fundamental que se debe buscar en la recepción por parte del lector NFC para corroborar su debido funcionamiento. Aunque estas pruebas se desarrollan con mayor detalle en el subapartado 5.2.1.

4.2.2 ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE LAS TRANSMISIONES VLC

Tal y como se comentó anteriormente, no es posible implementar un sistema en tiempo real basado en el middleware "FREERTOS" incluido en el entorno de desarrollo de STM32CubeIDE. Por este motivo, es necesario estudiar otra manera de incluir en el ejemplo anterior, el código necesario para poder realizar las transmisiones de luz visible a través del puerto MOSI de una interfaz SPI del NUCLEO-L053R8.

La base de las transmisiones VLC planteadas para el prototipo del dispositivo IoUT es la utilización del pin PA7 en los conectores MORPHO, que corresponde con el puerto MOSI de la interfaz SPI1 del NUCLEO-L053R8.

Para implementar este planteamiento en el STM32CubeIDE es necesario acceder a la

Dispositivo IoT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

configuración del microcontrolador desde la ventana del STM32CubeMx incluida en el entorno de desarrollo anterior.

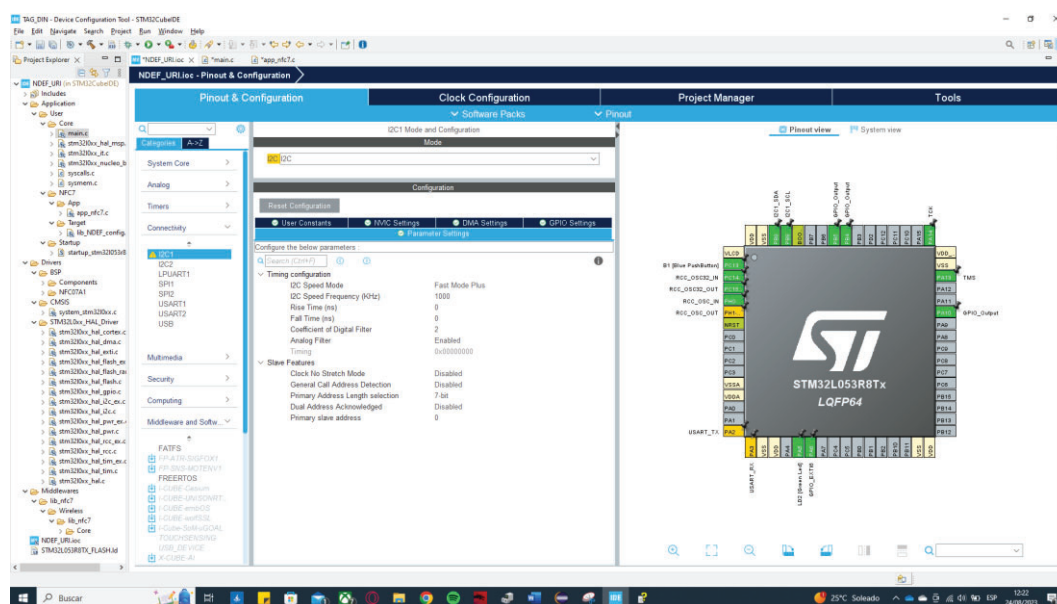


Ilustración 84: Sección "Connectivity" de la ventana del STM32CubeMx

Al acceder a la sección "Connectivity" se puede observar que la interfaz I2C1 esta activa, tal y como se había previsto. Este es el bus de comunicación entre el NUCLEO-L053R8 y el X-NUCLEO-NFC07A1, configurado a una velocidad de 1 KHz. El resto de pestañas de configuración proporcionan información antes comentada y algunas opciones útiles para la utilización de la interfaz.

Como la posible implementación de una interrupción en la configuración NVIC, los GPIO utilizados, los ajustes necesarios para incluir un DMA y la posibilidad de introducir restricciones para la interfaz.

En este subapartado, se pretende implementar la interfaz SPI necesaria para habilitar las transmisiones VLC. Por ello, se ha habilitado en esta sección la interfaz SPI1, antes mencionada. Con este fin, primero es necesario seleccionar la interfaz y el modo de funcionamiento deseado.

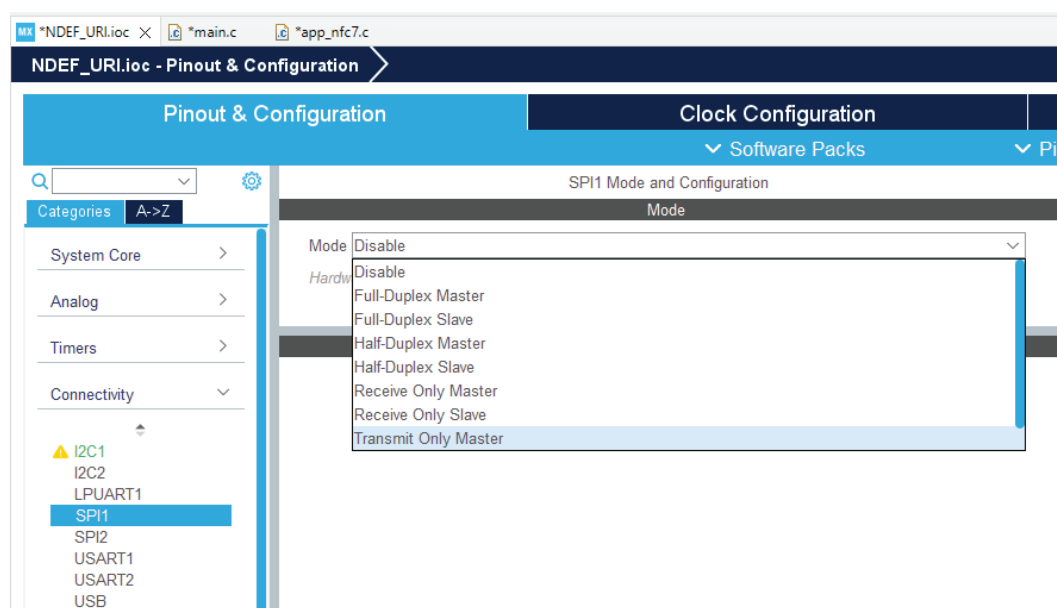


Ilustración 85: Configuración del modo de funcionamiento de la interfaz SPI1 del NUCLEO-L053R8

Para este trabajo, se ha seleccionado el modo "Transmit Only Master" para que pueda actuar como

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

maestro de las comunicaciones y sólo sea capaz de transmitir datos, no de recibirlos. Esto implica que, para el funcionamiento de la interfaz se habilitan 2 pines, no los 4 pines habituales para este tipo de interfaces. Estos pines quedan señalados en la tabla siguiente:

Tabla VI: Conexiones de la interfaz SPI1 del NUCLEO-L053R8

STM32L053R8Tx – Pinout	Función – SPI1
PA7	MOSI
PB3	SCK

Tras el procedimiento anterior, la ventana de configuración del STM32CubeMx permite configurar la interfaz habilitada para el modo de funcionamiento seleccionado. De manera que se interactuar con las múltiples opciones que aparecen en esta interfaz.

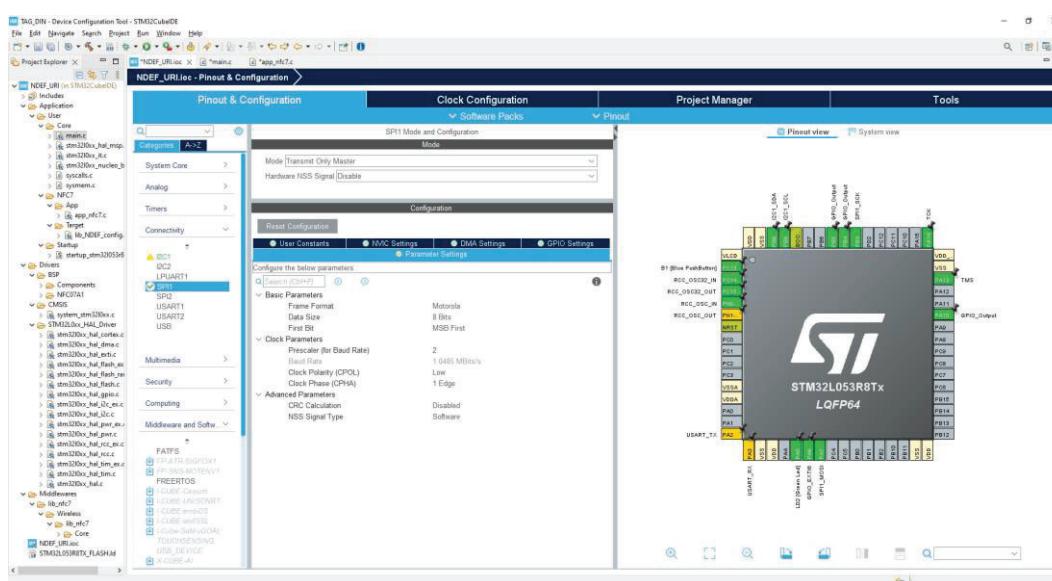


Ilustración 86: Opciones de configuración de la interfaz SPI1 del NUCLEO-L053R8

Como se puede observar en la Ilustración 86, no se ha habilitado la señal NSS ya que para este trabajo solo existe un esclavo, siendo innecesario activar la selección de esclavos de la interfaz SPI.

Por otro lado, es necesario configurar la frecuencia de transmisión de esta interfaz en 4 KHz. Sin embargo, como el proyecto de ejemplo utilizado configura por defecto los relojes del sistema en 2,097 MHz. Al utilizar el máximo factor de prescala 256, se consigue reducir la velocidad de transmisión de la interfaz al mínimo posible para esta configuración, que son 8,191 KHz.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

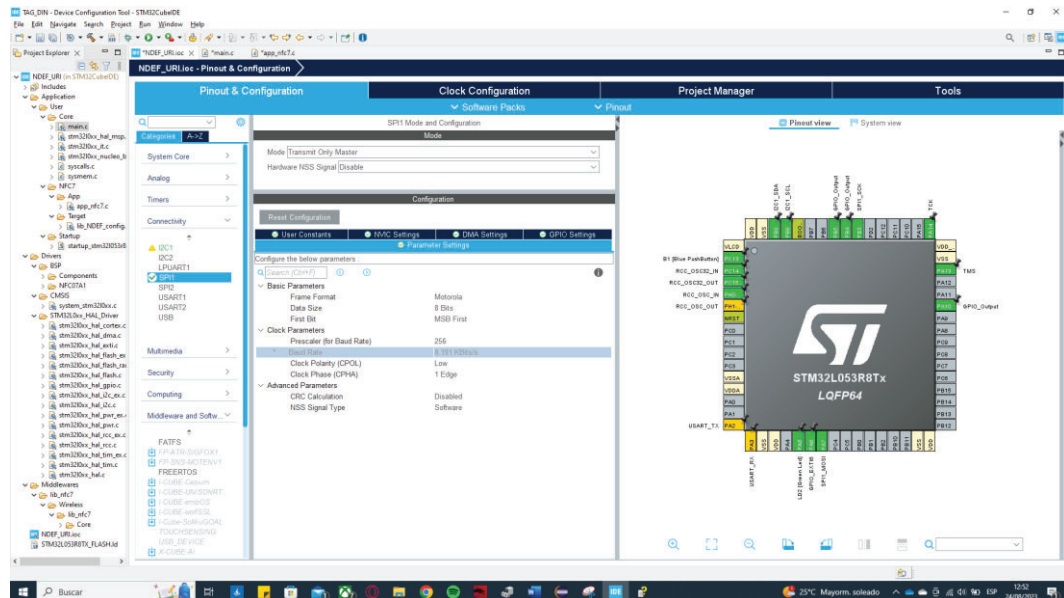


Ilustración 87: Parámetros de configuración de la interfaz SPI1 del NUCLEO-L053R8

Esta frecuencia es ligeramente mayor que el doble de la frecuencia de trabajo. Por lo que, para alcanzar la frecuencia de trabajo planteada, es necesario dividir a la mitad la frecuencia configurada o reconfigurar los relojes del sistema.

En cualquiera de las 2 opciones anteriores, y teniendo en cuenta lo comentado en el subapartado anterior, este reajuste conllevaría múltiples errores de ejecución en el proyecto de ejemplo de este trabajo.

Esto indica que la implementación de la tecnología VLC y NFC en este prototipo podría implicar el desarrollo customizado del software, con la carga temporal que conllevaría dicho desarrollo. A pesar de ello, si no se tiene en cuenta la frecuencia de funcionamiento de la interfaz y se pretende implementar las transmisiones VLC de todas maneras.

Para cumplir con la funcionalidad prevista para el dispositivo IoUT, se ha creado un buffer de 6 datos tipo float, denominado “Data”, que se pretende transmitir mediante la interfaz SPI1 habilitada.

```
99     float Data[6] = {1.23, 4.56, 7.89, 10.11, 12.13, 14.15};
100
101     /* USER CODE END 2 */
102
103     /* Infinite loop */
104     /* USER CODE BEGIN WHILE */
105     while (1)
106     {
107
108         /*Transmisión de datos VLC mediante la interfaz SPI1*/
109         if(HAL_SPI_Transmit_IT(&hspi1, (uint8_t*)&Data, sizeof(Data))==HAL_OK){
110         }
111
112         /* USER CODE END WHILE */
```

Ilustración 88: Código planteado para las transmisiones SPI basadas en la interrupción controlada por el NVIC.

Para tratar de compaginar las transmisiones mediante SPI con el control y la comunicación con el X-NUCLEO-NFC07A1. Se ha decidido utilizar la API “HAL_SPI_Transmit_IT()” descrita en [54]. Esta función permite la transferencia del buffer de datos al convertirlo al tipo “uint8_t”, lo que puede acarrear la pérdida o modificación de los datos transferidos.

Además, dicha función utiliza una interrupción que, en teoría, permite la transmisión de datos a través de la interfaz SPI1. Para que esto sea posible, primero se ha de habilitar la interrupción

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

disponible en la pestaña de configuración “NVIC Settings” de la sección de la interfaz SPI1 y que dispone de prioridad máxima, por lo que ninguna operación fuera del microcontrolador debería ser capaz de impedir su correcto funcionamiento.

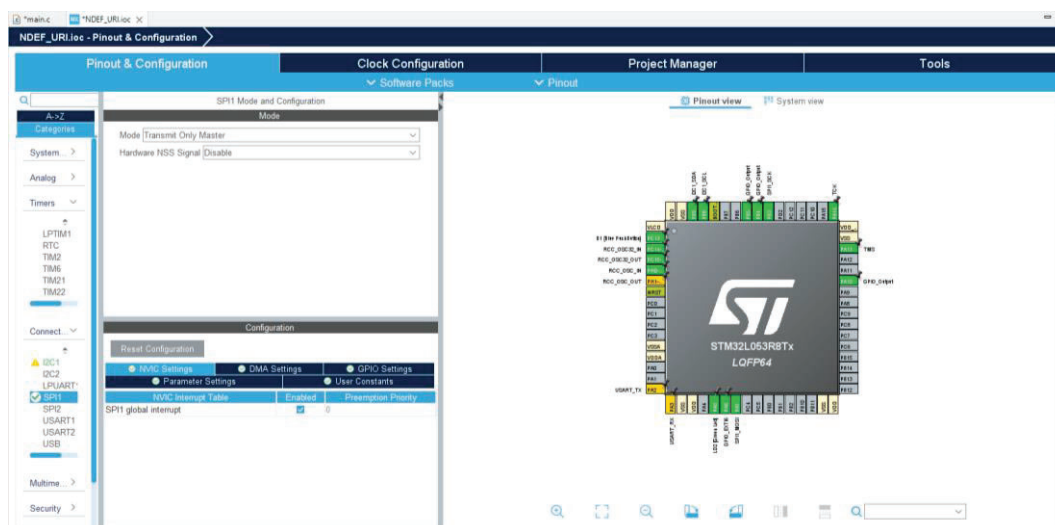


Ilustración 89: Activación de la interrupción para la interfaz SPI1 del NUCLEO-L053R8

Con esto, debería ser posible la transmisión de los datos de prueba con los que se inicializa el buffer “Data” mediante la interfaz SPI1 del NUCLEO-L053R8.

4.3 SOLUCIÓN SOFTWARE PROPUESTA

En este último subapartado de la solución software se describen las funciones que desarrollan los prototipos finales de este TFT. Se comentan algunos aspectos del planteamiento estudiado y las razones por las que se ha implementado la funcionalidad prevista en el prototipo final o no. Los siguientes subapartados, describen la solución final proporcionada para cada uno de los prototipos de este trabajo.

Debido al trabajo documentado en el apartado 3, y los resultados observados durante las pruebas llevadas a cabo en el apartado 0. Ha sido necesario modificar la solución software planteada en los apartados anteriores, dichos cambios se describen más adelante.

4.3.1 SOLUCIÓN SOFTWARE DE LA ESTACIÓN BASE

En este último subapartado, se describe la solución software adoptada para el prototipo de la estación base diseñada en este trabajo y basada en el estudio realizado sobre la tecnología que integra dicho prototipo.

Por otra parte, más adelante en el subapartado 4.2.1, se describen las razones por las que no se ha implementado en los prototipos finales de este TFM el middleware “FREERTOS” para habilitar la multitarea y compaginar las operaciones de las tecnologías VLC y NFC que integran dichos dispositivos.

Según lo descrito en el subapartado 3.3.1 y en subapartados anteriores, se ha decidido eliminar la tecnología VLC estudiada en este TFM de la implementación del prototipo para la estación base. Esta decisión se debe a que, durante la fabricación del receptor descrita en el subapartado 3.3.1 y las pruebas realizadas en el subapartado 5.1.

Se ha demostrado que el receptor VLC no es capaz de operar de la manera esperada, y teniendo esto en cuenta, no se ha dispuesto del tiempo necesario para implementar el código requerido para

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

esta tecnología más allá del marco teórico.

Por ello, se necesita rehacer el diagrama de flujo de este prototipo planteado en la Ilustración 60. De manera que el diagrama de flujo para la implementación de la estación base concluye de la siguiente forma:

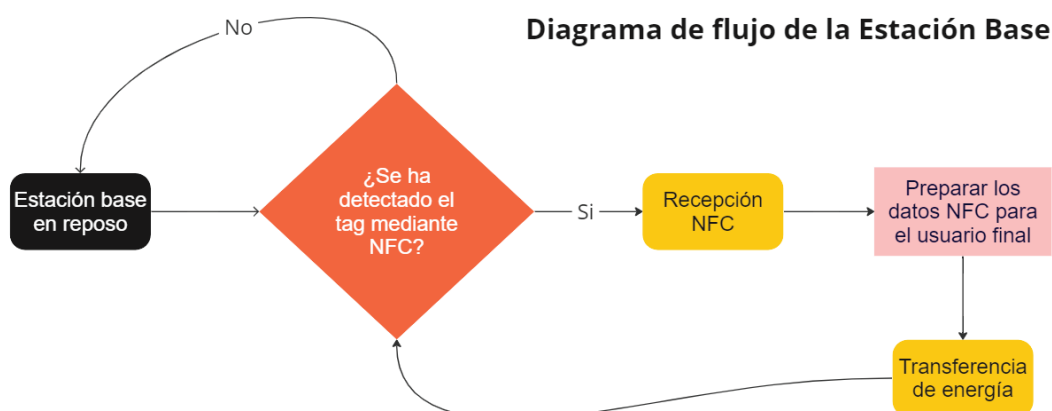


Ilustración 90: Diagrama de flujo final de la estación base

Las operaciones que se incluyen en el diagrama anterior son las realizadas por el proyecto de ejemplo “STM32L476RG_NUCLEO_PollingTagDetectNdef”, comentado en mayor detalle en el subapartado 4.1.1.

El prototipo de la estación base parte de un estado de reposo en el que se mantiene hasta detectar un tag o un dispositivo compatible con la tecnología NFC que integra este prototipo. Cuando se detecta un tag con el que comunicarse, se reciben los mensajes transmitidos por el tag.

Estos mensajes están planteados para que se ciñan al protocolo NDEF. Aunque este proyecto de ejemplo permite la lectura de otros protocolos de comunicación compatibles con la tecnología NFC.

Luego, se muestran los datos recopilados por la estación base en la consola descrita al final del subapartado 4.1.1. Mientras, si se continúa detectando el tag sobre este prototipo, se da paso a la transferencia de energía.

Dicha transferencia se mantiene siempre y cuando la estación base siga detectando un dispositivo compatible al alcance del campo electromagnético que genera. Si se deja de detectar algún dispositivo dentro del campo cercano del prototipo, se pasa retorna al estado de reposo a la espera de una nueva detección.

Por otra parte, se puede verificar el estado de ejecución de la estación base de manera visual gracias a la solución software planteada en este documento. Para ello, primero se debe conectar el prototipo de integración mediante un cable USB tipo micro B a los puertos de alimentación y de la estación.

Una vez alimentado y ejecutada la solución software en la estación base, se puede observar en la plataforma de expansión X-NUCLEO-NFC05A1 como parpadean 3 veces los 6 LED que incluye, para indicar que se ha inicializado el NUCLEO-L476RG y la plataforma de expansión NFC.

Seguidamente, sólo se mantiene el LED 6 parpadeando mientras el resto de los LED quedan apagados. Este parpadeo anuncia que la estación base está esperando a detectar algún tag en su campo cercano para proceder a su lectura y a la transferencia de energía.

Cuando se detecte algún dispositivo compatible dentro del campo cercado del prototipo, se mantienen los LED 4 y LED 6 de la placa de expansión encendidos para indicar la detección, lectura y transferencia de energía.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

4.3.2 SOLUCIÓN SOFTWARE DEL DISPOSITIVO IOUT

En este último subapartado, se describe la solución software adoptada para el prototipo del dispositivo IoUT de este trabajo basada en el estudio realizado sobre la tecnología que integra el prototipo.

Según lo descrito en el subapartado 4.3.1 y en los subapartados anteriores. Se ha eliminado la tecnología VLC estudiada en este TFM de la implementación del prototipo para el Dispositivo IoUT.

Esto se debe, como se indica anteriormente, a que el receptor VLC no es capaz de operar de la manera esperada, teniendo esto en cuenta, implementar el código necesario para esta tecnología más allá del marco teórico se ha considerado innecesario.

Con ello, es necesario rehacer el diagrama de flujo de este prototipo planteado en la Ilustración 75. De manera, que el diagrama de flujo para la implementación del dispositivo IoUT es el siguiente:

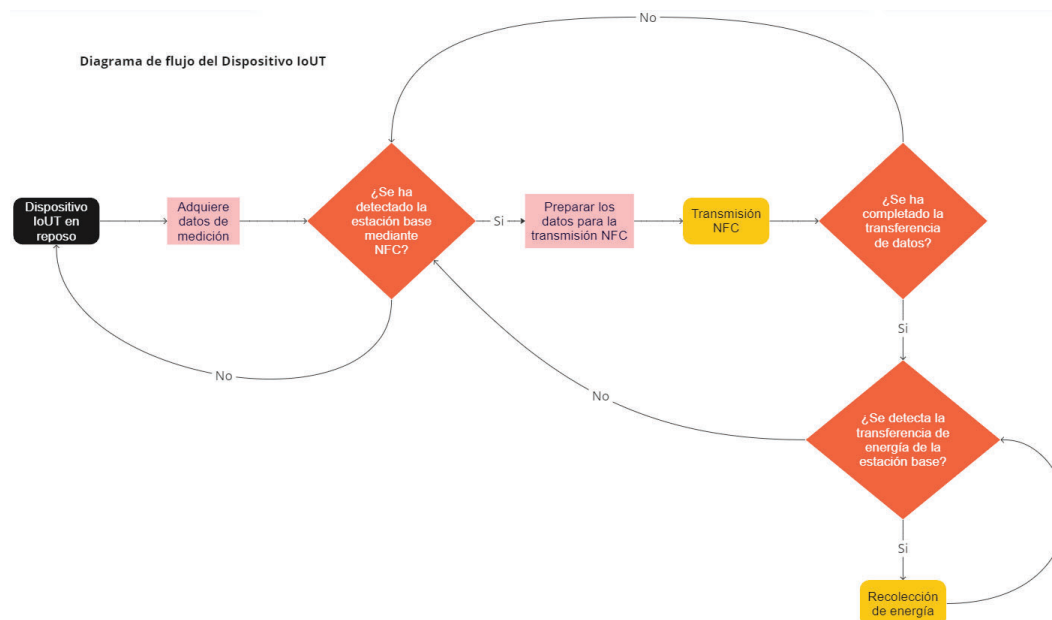


Ilustración 91: Diagrama de flujo final del dispositivo IoUT

Las operaciones que se incluyen en el diagrama anterior son las realizadas por el proyecto de ejemplo “NDEF_URI”, comentado en mayor detalle en el subapartado 4.2.1.

El prototipo del dispositivo IoUT parte de un estado de reposo donde, tras adquirir los datos que se van a transmitir, pasa a un estado donde busca detectar la estación base planteada en este TFM o cualquier lector NFC compatible con la tecnología integrada en el X-NUCLEO-NFC07A1.

Si no se detecta ningún dispositivo compatible con la tecnología de campo cercano del tag dinámico, el prototipo vuelve al estado de reposo. Si por el contrario, se detecta la estación base o algún dispositivo similar, se preparan los datos adquiridos para su inmediata transmisión.

No obstante, en este caso los datos recopilados por el dispositivo IoUT se ciñen a los registros introducidos por el proyecto de ejemplo ya mencionado. De manera que, en las pruebas futuras, el lector NFC debería poder recibir la URI que contiene el mensaje NDEF del proyecto.

Durante la ejecución de esta solución software, estando el Dispositivo IoUT conectado mediante un cable USB tipo micro B, se puede verificar visualmente el estado en el que se encuentra el dispositivo observando los LED que contiene la plataforma de expansión X-NUCLEO-

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

NFC07A1. Al comenzar, se encienden los LED azul, verde y amarillo, en este mismo orden, para indicar la inicialización del NUCLEO-L053R8 y de la plataforma de expansión.

Luego, se apagan los LED en el mismo orden en que se encendieron hasta llegar al LED amarillo, este permanece iluminado durante el funcionamiento del prototipo para indicar que se ha podido escribir en la EEPROM de la placa con tecnología NFC.

Además, esta solución permite utilizar el tag dinámico planteado en este trabajo, aunque esté desconectado, para obtener los datos recopilados por dicha integración y se plantea la posibilidad de su utilización aun cuando carezca de una fuente de alimentación. En dicha situación, no se podrá verificar su estado de ejecución visualmente.

5 PRUEBAS REALIZADAS

En este capítulo se describen las pruebas realizadas sobre los prototipos diseñados en este trabajo de fin de máster. Para ello, las pruebas se centran en evaluar las tecnologías de comunicación que integran los prototipos de este proyecto, para evaluar su funcionamiento.

El consumo de los prototipos para el dispositivo IoUT y la estación base se limita a la alimentación suministrada por el PC del estudiante mediante una interfaz USB. Por tanto, el estudio del consumo de estos prototipos se limita a las indicaciones de los documentos de referencia, las plataformas de desarrollo de STM32Cube y las estimaciones del estudiante.

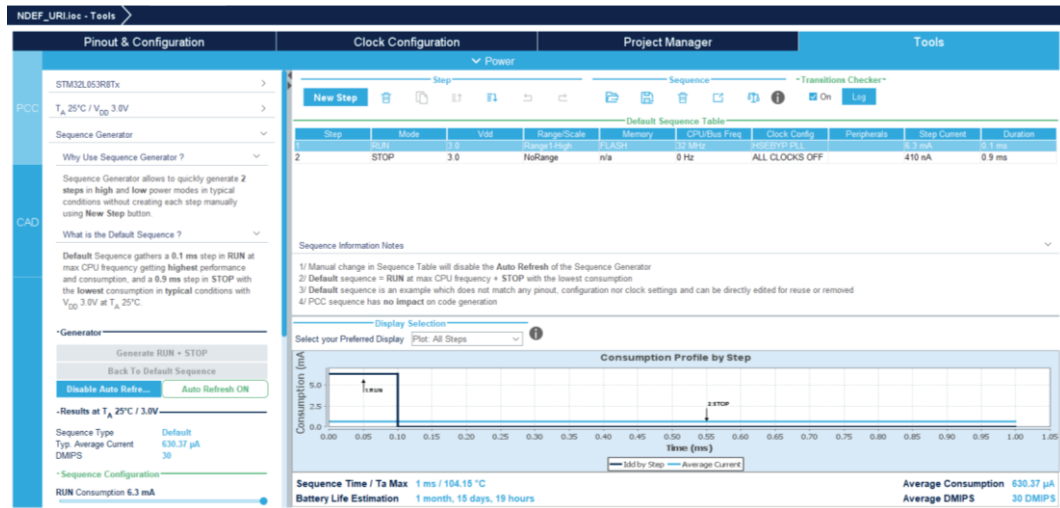


Ilustración 92: Consumo del prototipo del dispositivo IoUT según el STM32CubeIDE

Como se puede observar en la ilustración anterior, el consumo indicado por STM32CubeIDE para el dispositivo IoUT es de aproximadamente 18.9 mW, teniendo en cuenta que se alimenta a 3 V y una corriente, en tiempo de ejecución, de 6.3 mA.

Sin embargo, durante el estudio de la solución software realizado en el subapartado 4.3.1 para el prototipo de la estación base, no se cuenta con el STM32CubeIDE para el cálculo aproximado de la alimentación del dispositivo.

Por ello, se ha aproximado el cálculo de la corriente máxima de funcionamiento del lector NFC y el NUCLEO-L476RG, teniendo en cuenta que la potencia máxima transmitida por el X-NUCLEO-NFC05A1 es de 1.4W.

Gracias a la hoja técnica del dispositivo, se conoce que se alimenta a 3.3 V, por lo que la corriente máxima consumida por el prototipo de la estación base se puede aproximar de la siguiente manera:

$$P_{MaxTx} = I_{Max} * V_{DD} \Rightarrow I_{Max} = \frac{P_{MaxTx}}{V_{DD}} = \frac{1.4 W}{3.3 V} = 424.24 mA$$

Este simple cálculo solo aporta una estimación de la corriente máxima para alimentar la antena de transmisión del lector NFC a máxima potencia. Para medir con precisión el consumo de este prototipo, se estima necesario estudiar su consumo tras adaptar la solución provista en futuras aplicaciones.

5.1 PRUEBAS SOBRE VLC

En primer lugar, se ha comenzado desarrollando el hardware necesario para implementar y probar

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

las comunicaciones mediante luz visible. Como se menciona anteriormente, este tipo de comunicaciones necesitan de, al menos, dos interlocutores. Siendo uno quien inicia la transmisión de datos, mientras que el otro interlocutor recibe la información enviada.

Tal y como se detalla en el apartado 3.1, el transmisor VLC se implementa en el prototipo del dispositivo IoUT mientras que el receptor VLC se integra en el prototipo de la estación base. En las pruebas realizadas en el presente subapartado, sólo se estudia el comportamiento del receptor frente a una transmisión entrante en diferentes condiciones, descritas en los subapartados que siguen.

Cabe destacar que el objetivo de las comunicaciones vía VLC es proporcionar la capacidad de comunicación necesaria para que el prototipo del dispositivo IoUT pueda comunicarse con la estación base a pesar de estar bajo agua dulce o en superficie a pesar de la iluminación ambiental propia del entorno del experimento.

Para comenzar con estas pruebas, se ha utilizado el NUCLEO-L053R8 conectado a un LED externo a través del puerto MOSI de la interfaz SPI, en esta prueba no es necesario contar con la plataforma de extensión para NFC ni con ninguna interfaz SPI concreta.

Sin embargo, se ha de tener en cuenta que para este trabajo se realizan transmisiones a 4 KBits/s, por lo que se ha de configurar la placa del controlador y la interfaz SPI correspondiente a dicha frecuencia.

En este caso, se ha utilizado el pin PA7 que corresponde con el puerto MOSI de la interfaz SPI1 del NUCLEO-L053R8, mediante el entorno de programación STM32CubeIDE se ha configurado dicha interfaz a una velocidad de transmisión de 4 KBits/s, con transmisiones de 8 bits.

En cuanto al receptor VLC, es necesario conectarlo a una fuente de alimentación para alimentarlo. La tensión de funcionamiento del prototipo es de 3.3 V, mientras que la corriente total estimada es de 3 mA. A pesar de estas indicaciones, se recomienda usar una fuente de alimentación autoajutable.

Por otra parte, debido a que no se ha dispuesto del tiempo necesario para completar el receptor VLC. Las pruebas realizadas se han centrado en comprobar el funcionamiento de las 2 primeras etapas de recepción respecto a la tercera etapa.

Por otro lado, tras completar el diseño del receptor, debido a diversos errores y la falta de tiempo para completar este trabajo, la segunda etapa del receptor quedó inoperativa. Obligando al estudiante a demostrar la funcionalidad del prototipo separando las etapas 1 y 2 de la tercera, e imposibilitando la prueba completa del receptor. A pesar de todo, en los subapartados siguientes se ilustra el proceso seguido para realizar las pruebas de las transmisiones VLC y los resultados obtenidos.

Por todo lo anterior, el código correspondiente a esta tecnología tanto para la estación base como para el dispositivo IoUT, no se ha utilizado en la versión final del software de los prototipos. Por ello, estas pruebas se han focalizado en demostrar el funcionamiento del hardware fabricado en el laboratorio.

5.1.1 PRUEBAS FUERA DE AGUA DULCE

Tras los preparativos anteriores, se ha situado el LED de transmisión frente al fotodetector integrado en el receptor VLC. Es necesario recordar que, para maximizar la intensidad de luz recogida por el fotodetector es necesario situar el LED frente al receptor de luz, quedando el primero perpendicular al segundo.

En la ilustración siguiente, se muestran la señal generada por la interfaz SPI1 del NUCLEO-

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

L053R8 (en amarillo), y la señal recibida y amplificada tras la segunda etapa de recepción del receptor VLC.

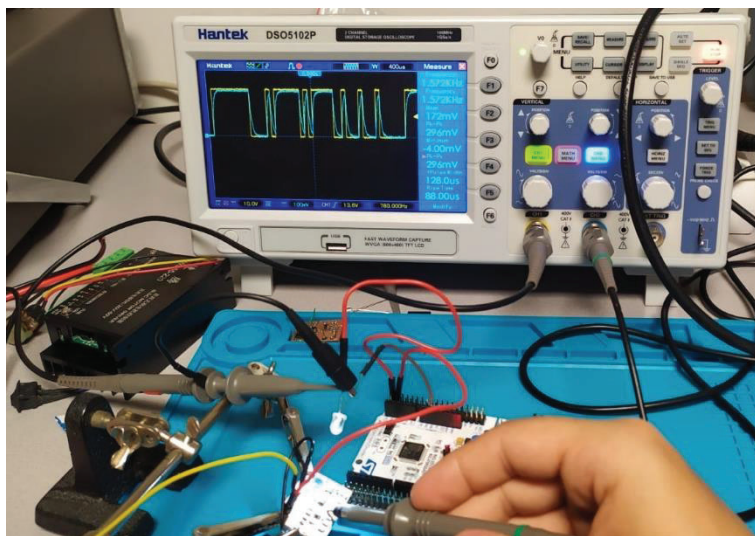


Ilustración 93: Prueba de recepción VLC hasta la tercera etapa de recepción.

Como se puede observar en la imagen anterior, con el LED situado a unos 5 cm del fotodetector y perpendicular al mismo. Se ha conseguido que la señal recibida, tras ser amplificada por la segunda etapa, sea muy similar a la recibida.

Además, la diferencia de tensión de la señal recibida es superior a los 100 mV, lo que indica que puede ser procesada por el comparador de la última etapa de recepción. Sin embargo, esta última etapa de recepción no estaba operativa, por lo que no se pudo medir la salida del receptor en esta prueba.

A pesar del inconveniente anterior, en el último prototipo del receptor VLC fabricado se ha podido verificar la respuesta de la tercera etapa de recepción. Para ello, se ha conectado el puerto MOSI de la interfaz SPI3 del NUCLEO-L476RG a la salida de la segunda etapa de recepción.

De esta manera, se pretende medir la respuesta del comparador ante la señal generada por la plataforma de desarrollo. A pesar de utilizar la plataforma de desarrollo de la estación base, esta prueba puede realizarse gracias a que tienen funciones y diseños similares.

Dicha prueba queda plasmada en la siguiente ilustración, donde la señal de salida del puerto PC12 se observa en el osciloscopio con el color azul, mientras que la señal de salida del receptor VLC se representa en amarillo.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

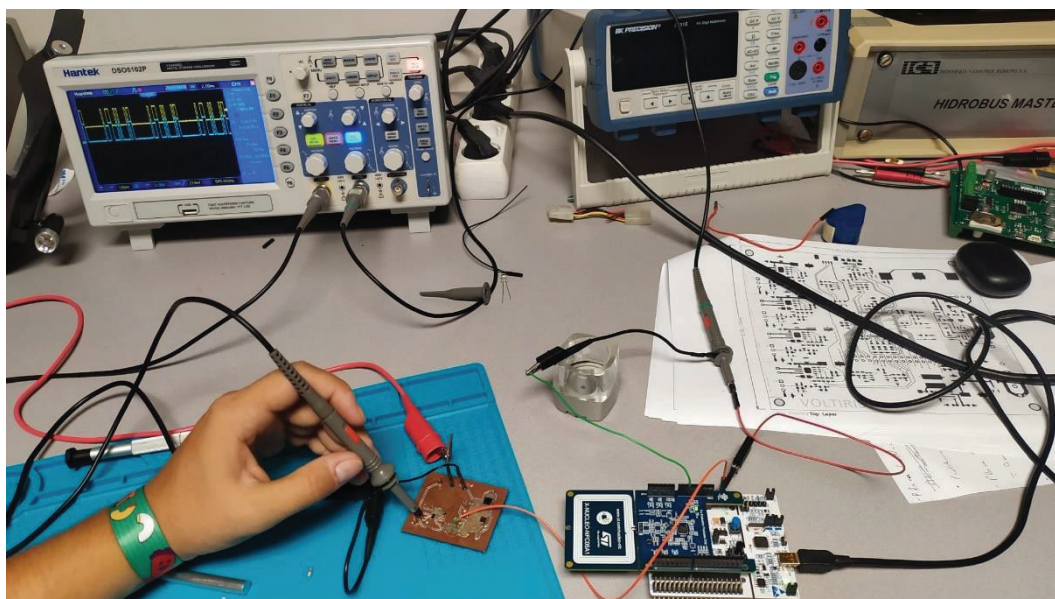


Ilustración 94: Prueba de recepción desde la segunda etapa hasta la salida del receptor VLC.

Como se puede observar, la señal obtenida como resultado a la salida del receptor VLC, tras la tercera etapa de recepción. Es suficiente para ser procesada por el puerto MISO de la interfaz SPI de la estación base. No obstante, se considera necesario realizar más pruebas para las comunicaciones VLC de cara a una adaptación futura de este trabajo, pero esta idea se desarrolla en el apartado 7.2.

5.1.2 PRUEBAS BAJO AGUA DULCE

En este subapartado se describe el proceso realizado para evaluar la capacidad de la tecnología VLC de este proyecto para implementar comunicaciones bajo agua dulce. Para ello, primero ha sido necesario preparar el experimento.

Con este fin, se ha tomado un recipiente de cristal transparente para actuar como si fuera el encapsulado del dispositivo IoUT. Luego, se ha llenado dicho recipiente para colocarlo entre el LED transmisor y el receptor VLC.

Además, tras llenar de agua dulce el recipiente cristalino, se ha conseguido una separación de entre 14 y 15 cm, entre el transmisor y el receptor de luz. Esta distancia está cubierta en su mayoría por agua, por lo que esta prueba puede indicar la capacidad de comunicación subacuática de los prototipos. Dicho experimento, se refleja en la siguiente ilustración:

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

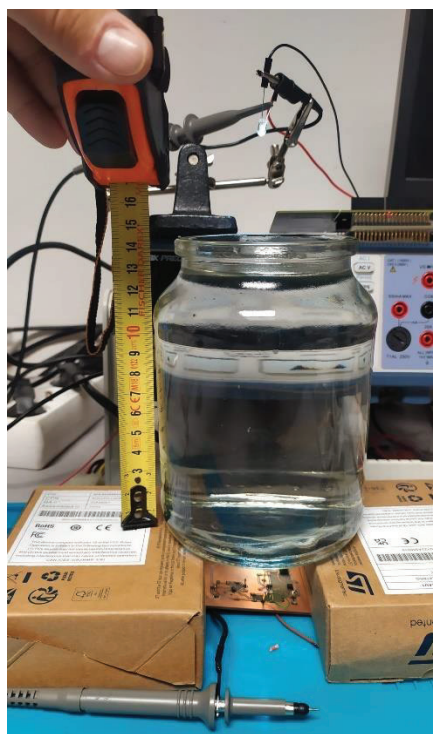


Ilustración 95: Preparación de la prueba para evaluar la capacidad de comunicación VLC bajo agua dulce

Es importante que, durante este experimento, se tenga absoluto cuidado con el recipiente lleno de agua dulce y el resto de los equipos electrónicos alrededor de la prueba. Ya que, si se vierte el contenido del recipiente sobre alguno de los aparatos electrónicos, podría resultar en un problema considerable.

Al margen de los riesgos del experimento, en la siguiente ilustración se puede observar cómo se han realizado las lecturas de la señal recibida por la primera etapa de recepción y la señal emitida por el LED.

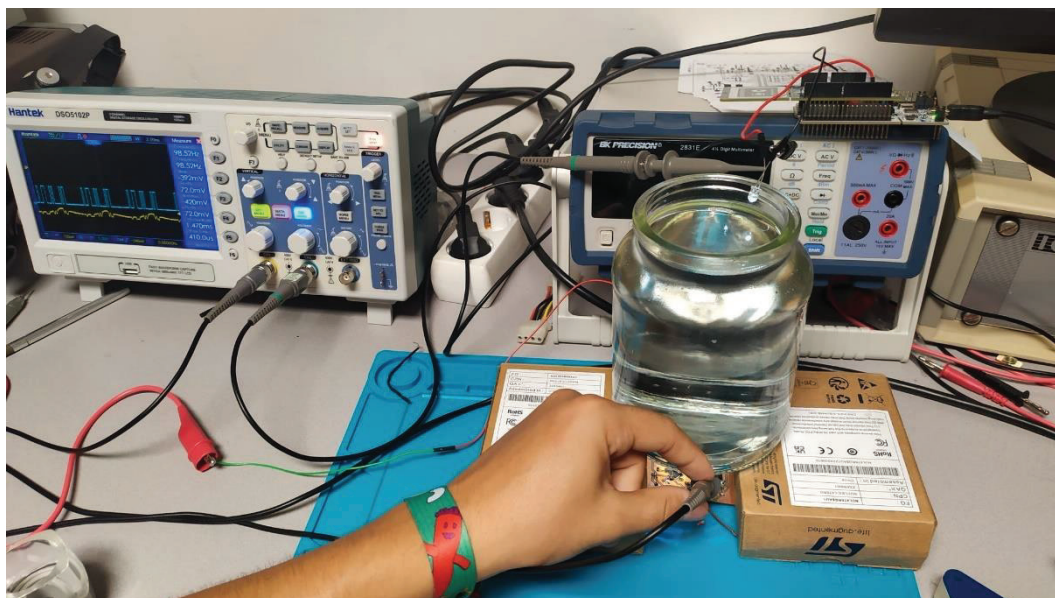


Ilustración 96: Evaluación de la capacidad de comunicación VLC bajo agua dulce

Como se ha podido observar, la señal recibida y procesada por la primera etapa de recepción en las condiciones anteriormente descritas, puede parecer carente de sentido, pero aún es interpretable y presenta una tensión pico a pico suficiente para ser procesada por las etapas posteriores.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

Sin embargo, del mismo modo que en el subapartado anterior. Como el componente principal de la segunda etapa de recepción no se encuentra operativo, las medidas de este experimento se basan en los resultados obtenidos hasta la entrada de la etapa de amplificación del receptor VLC.

5.2 PRUEBAS SOBRE NFC

En este subapartado, se abordan las pruebas realizadas sobre la tecnología NFC disponible en este trabajo de fin de máster. De manera similar al subcapítulo anterior, tras integrar el hardware necesario para implementar y probar la tecnología NFC incluida en las plataformas de desarrollo y expansión descritas en los subapartados 2.3.1 y 2.3.2.

Se ha instalado la solución software descrita en las subsecciones 4.3.1 y 4.3.2, para el prototipo de la Estación Base y el del Dispositivo IoUT respectivamente. Por tanto, para comenzar a desarrollar las pruebas documentadas en esta subsección, primero es necesario comprobar el correcto funcionamiento del software de los dispositivos en los que se basa este TFM.

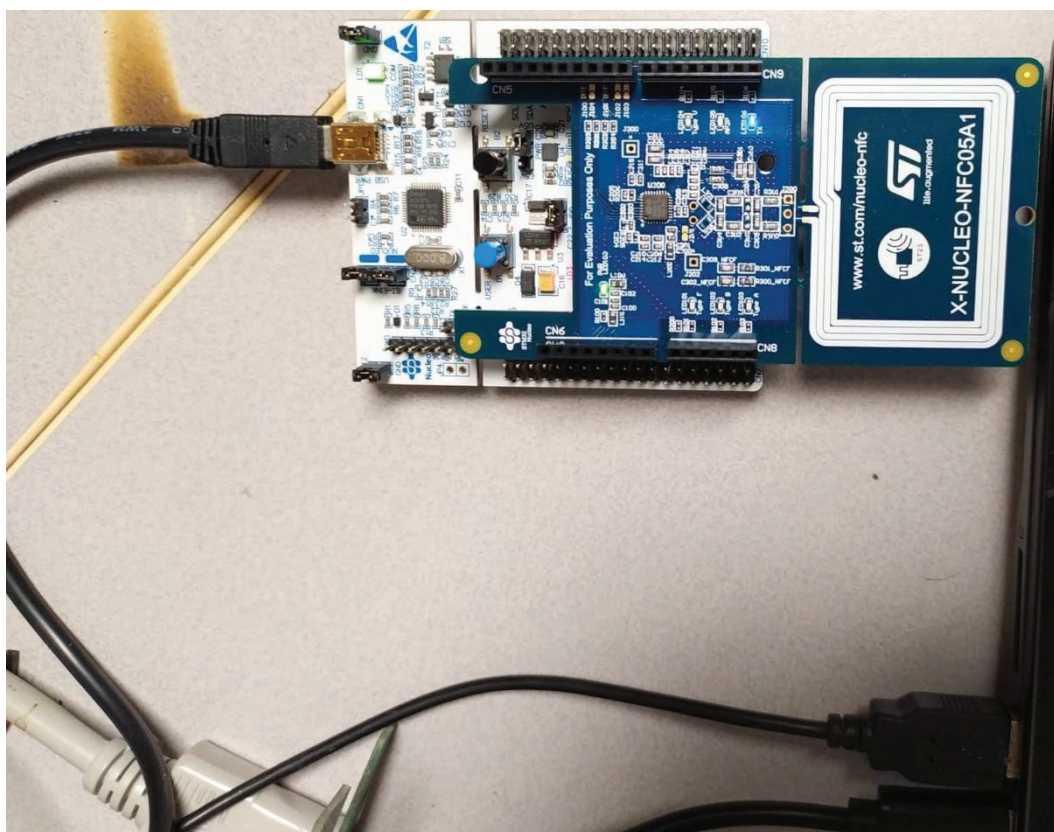


Ilustración 97: Prueba de la correcta ejecución de la Estación Base

Con este fin, es suficiente con seguir las instrucciones finales de los subapartados antes mencionados, pudiendo observar en la Ilustración 97 que la estación base se ha inicializado con éxito y permanece a la espera de detectar un tag o dispositivo NFC compatible.

Además, se puede verificar visualmente que la plataforma de expansión y la placa de desarrollo, sobre la que se integra, están alimentados. Esto es así, gracias a que en ambas placas existe un LED de color verde que permanece iluminado mientras el prototipo esté conectado y alimentado.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

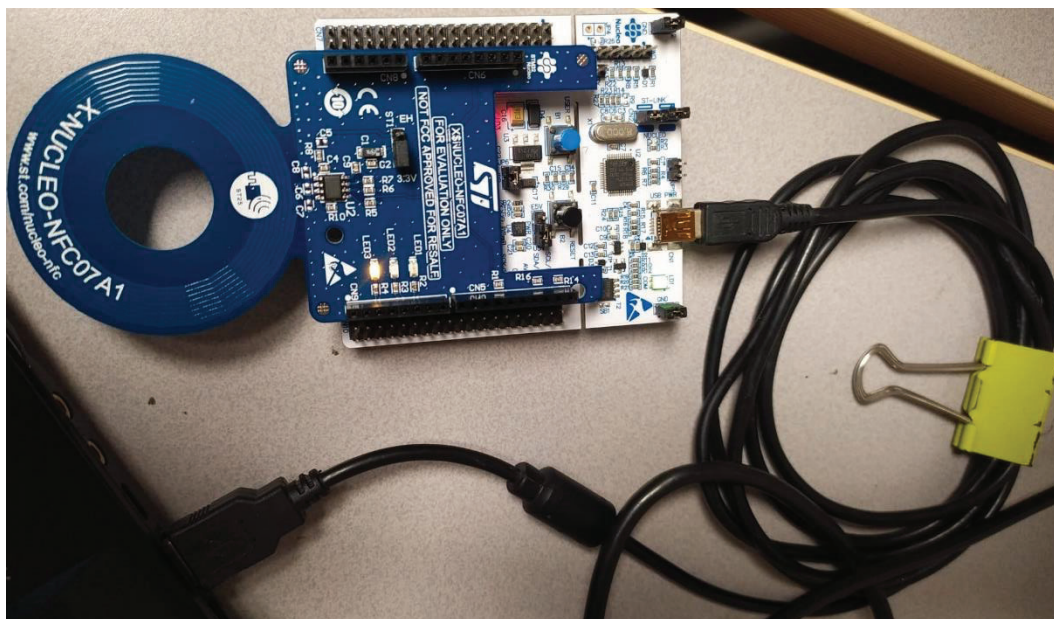


Ilustración 98. Prueba de la correcta ejecución del Dispositivo IoUT

Del mismo modo, se puede verificar la correcta ejecución del Dispositivo IoUT al alimentarlo mediante el puerto USB. Al hacerlo, se observa la secuencia de encendido y apagado de los LED del X-NUCLEO-NFC07A1 hasta quedar solo el LED 3, el LED amarillo, iluminado. Esto es justo lo que se puede observar en la Ilustración 98.

De manera adicional, el color verde del LD1 iluminado en el NUCLEO-L053R8 indica que el prototipo está alimentado externamente y en ejecución. Sin embargo, la plataforma de extensión NFC de esta integración no dispone de ningún LED con un fin similar, ya que puede funcionar sin necesidad de que el prototipo esté conectado a nada.

Por otro lado, aunque los prototipos se mantengan alimentados externamente. El Dispositivo IoUT no debería necesitar esta condición para realizar sus funciones, aunque si se mantiene ambos dispositivos alimentados y se acercan hasta que el campo cercano generado por la estación base los conecte inalámbricamente, se pueden comunicar y transferir energía de igual manera.

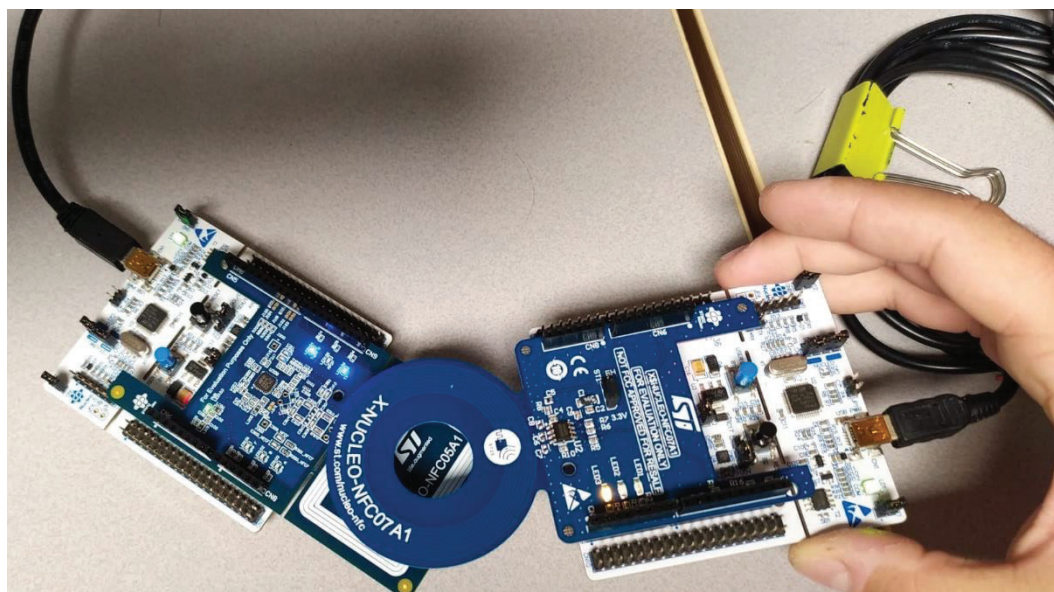


Ilustración 99: Prueba de funcionamiento de los prototipos alimentados externamente

En la figura anterior queda constancia del correcto funcionamiento de los prototipos, para poder verificar este hecho visualmente, se necesita contemplar que los LED 4 y LED 6 del lector NFC

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

permanecen iluminados al detectar el tag dinámico NFC sobre su antena.

Sin embargo, para este trabajo se considera de mayor interés documentar los resultados utilizando el prototipo del Dispositivo IoUT sin alimentación externa. De este modo, se puede probar la utilidad del prototipo a la hora de recolectar energía para, al menos, asegurar la transferencia de datos.

Aun así, también se incluye una subsección donde se estudia la recopilación de energía del Dispositivo IoUT al medir la salida de tensión del pin V_EH de la plataforma X-NUCLEO-NFC07A1.

En cualquier caso, se debe recordar que para maximizar tanto la transferencia de energía como las comunicaciones, es recomendable situar las antenas de los prototipos alineadas verticalmente y en paralelo una respecto a la otra.

5.2.1 PRUEBAS DE COMUNICACIÓN MEDIANTE NFC

En este subapartado se describen las pruebas realizadas con las placas de expansión NFC integradas en los prototipos del Dispositivo IoUT y de la Estación Base, para demostrar su capacidad de comunicación inalámbrica y documentar los resultados obtenidos.

De manera inicial, se ha comenzado revisando la situación de aplicación más simple posible. Donde, al igual que en la Ilustración 99, se sitúa la antena del tag dinámico NFC directamente sobre la antena del lector NFC.

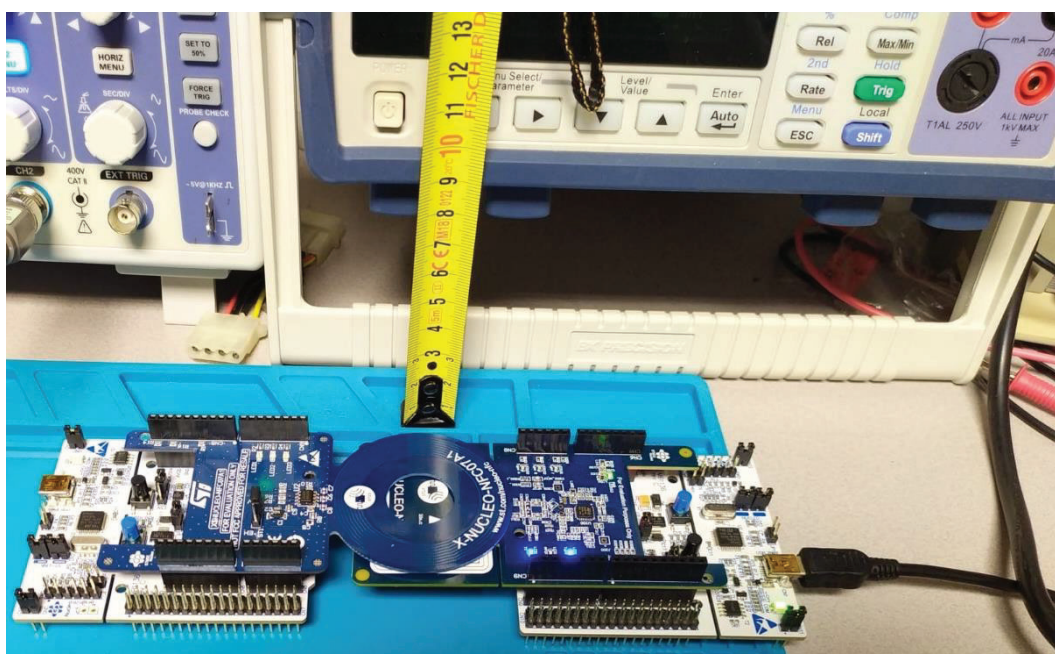


Ilustración 100: Distancia mínima de comunicación NFC documentada

Como resultado de dicha prueba, se ha observado que el lector NFC ha respondido de la manera esperada. Es decir, se han iluminado los LED 4 y LED 6 de la plataforma para indicar que se ha detectado un dispositivo NFC compatible y se ha procedido a la lectura de datos.

Para poder observar el intercambio de mensajes realizados entre ambos prototipos, es necesario haber seguido las indicaciones del subapartado 4.1.1. Así, se puede observar en la consola de conexión serie de SW4STM32 los mensajes recibidos por el lector NFC.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

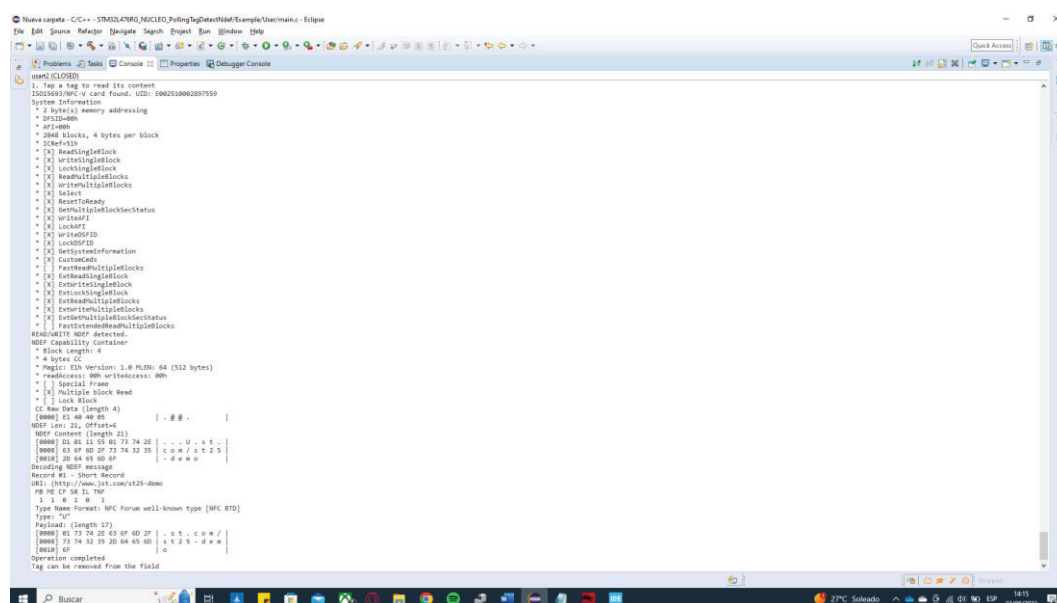


Ilustración 101: Prueba de comunicación NFC al acercar las antenas de los prototipos

En la consola de conexión, se pueden observar múltiples mensajes de información que indican la capacidad de comunicación detectada en la etiqueta de la que se han leído estos datos. En este caso, el contenido útil del mensaje que provee el proyecto de ejemplo “NDEF_URI” es la URI “st.com/st25-demo”.

Por otra parte, también se ha tratado de documentar la distancia máxima a la cual son capaces de comunicarse los prototipos en los que se basa este trabajo. Para ello, se han mantenido las antenas de ambos dispositivos verticalmente alineadas y paralelas unas a otras, tratando de no desalinear las antenas a pesar de la distancia entre ellas.

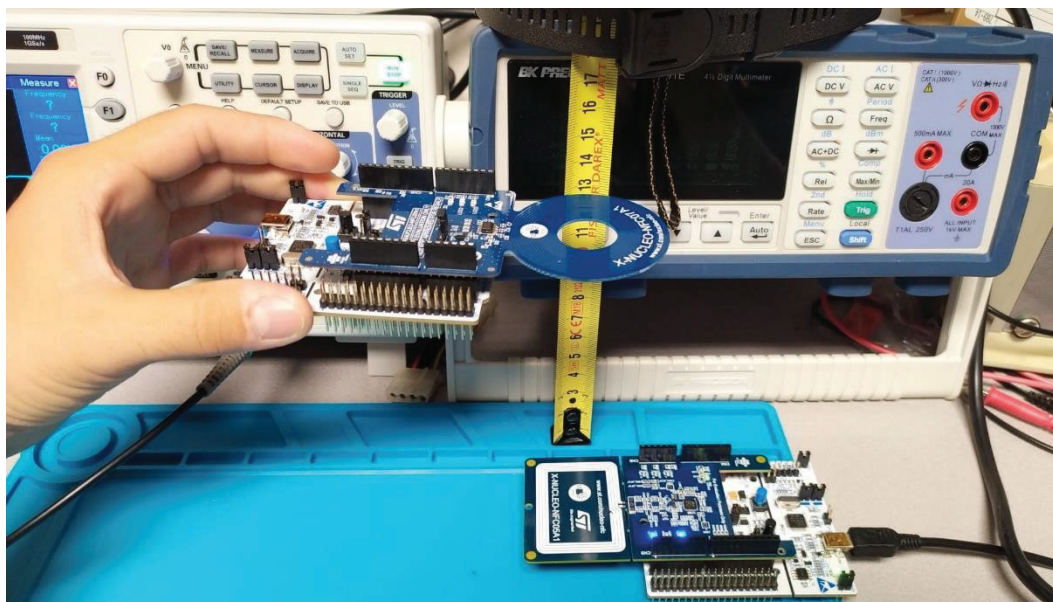


Ilustración 102: Distancia máxima de comunicación NFC documentada

En la ilustración anterior se puede observar que la distancia máxima a la cual el lector NFC es capaz de detectar y leer los datos procedentes de la etiqueta dinámica NFC, es de 13 cm aproximadamente. Esta distancia puede variar dependiendo, principalmente, de las propiedades de las antenas de ambos prototipos y el ángulo entre ellas, entre otros condicionantes.

Tras haber registrado que la comunicación entre los prototipos es exitosa, tanto para la distancia mínima de conexión como para la distancia máxima. Se ha decidido manipular el jumper ST1 del

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

X-NUCLEO-NFC07A1 para que el dispositivo se alimente mediante la energía recolectada por éste a través del pin “EH”.

Con ello, se han obtenido prácticamente los mismos resultados que con el jumper ST1 en su configuración inicial. Sin embargo, si se ha podido apreciar que la información proporcionada por el lector NFC se ha reducido considerablemente.



Ilustración 103: Datos obtenidos por el lector NFC al acercar el tag dinámico NFC con el jumper en EH

De hecho, en los mensajes de información del lector NFC visibles en la Ilustración 103, ya no aparecen las distintas posibilidades de comunicación con el Dispositivo IoUT. Simplemente, se muestran los mensajes que notifican la detección de una nueva etiqueta compatible que está preparada para la lectura y escritura basada en NDEF. El contenido del mensaje recibido sigue siendo la URI “st.com/st25-demo”.

Con esto, se dan por concluidas las pruebas de demostración del funcionamiento de las comunicaciones mediante la tecnología NFC. En el siguiente subapartado, se documentan los resultados obtenidos en el tag dinámico NFC para recolectar la energía transferida por la Estación Base.

5.2.2 PRUEBAS DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE NFC

En esta última subsección, se documentan los resultados obtenidos por el estudiante a la hora de medir la tensión generada por la plataforma a la salida del pin “EH”, situado en el jumper ST1 del X-NUCLEO-NFC07A1.

De acuerdo con lo descrito en apartados anteriores, la recolección de energía del tag dinámico NFC depende de múltiples factores. Como la capacidad del lector NFC para transferir energía, las propiedades de la antena del tag para resonar a la misma frecuencia que la antena emisora, entre otros.

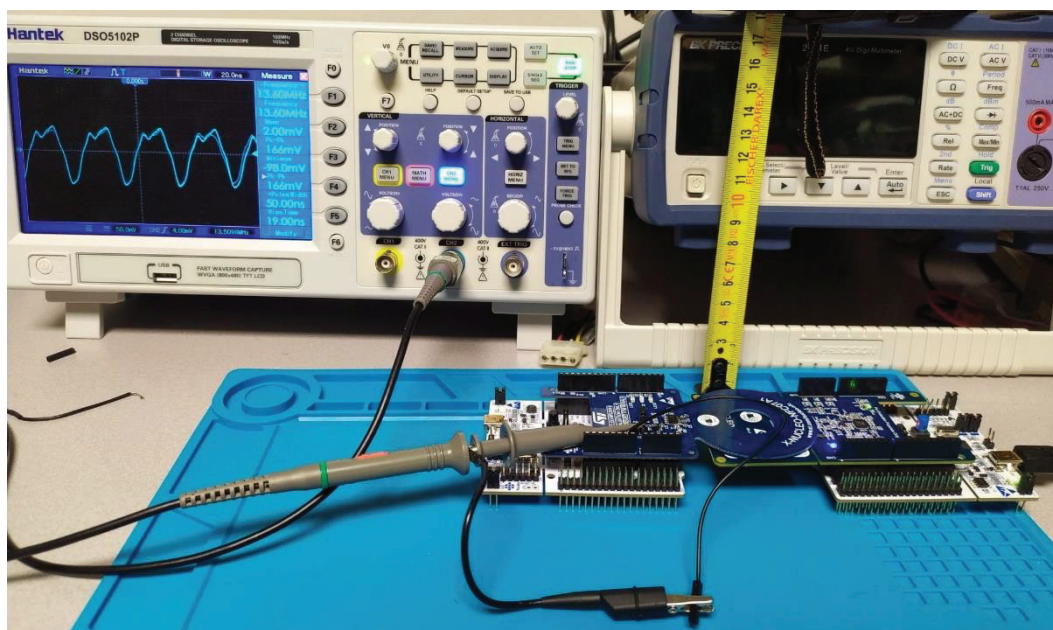


Ilustración 104: Resultados de la recolección de energía a la distancia mínima documentada

Tras medir con la sonda del osciloscopio del laboratorio la salida del pin mencionado al comienzo

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

de este subapartado. Se ha observado que, manteniendo las antenas NFC directamente una encima de la otra, la señal sinusoidal de recolección de energía que se debería recibir a 13.56 MHz, se observa distorsionada.

Este resultado se puede deber a las propiedades de las antenas de cada uno de los prototipos. Es decir, el hecho de que se traten de antenas con geometrías diferentes puede explicar por qué la señal recibida se distorsiona cuando las antenas están casi unidas una sobre la otra.

El origen de ello es el campo electromagnético generado por el lector NFC justo en la antena de transmisión, aunque en esta memoria no se estudia matemáticamente este campo ni sus propiedades asociadas a la fuente de transmisión más allá de la potencia transmitida que se indica en la hoja técnica del X-NUCLEO-NFC05A1.

Para continuar, se verifica la distancia máxima a la que el tag dinámico NFC aun es capaz de recolectar energía transmitida por el lector NFC. De manera similar a la documentada en la Ilustración 102, se ha elevado la antena del prototipo del Dispositivo IoUT sobre la antena de la Estación Base hasta que se dejaba de observar una señal de salida del pin “EH” en el osciloscopio.

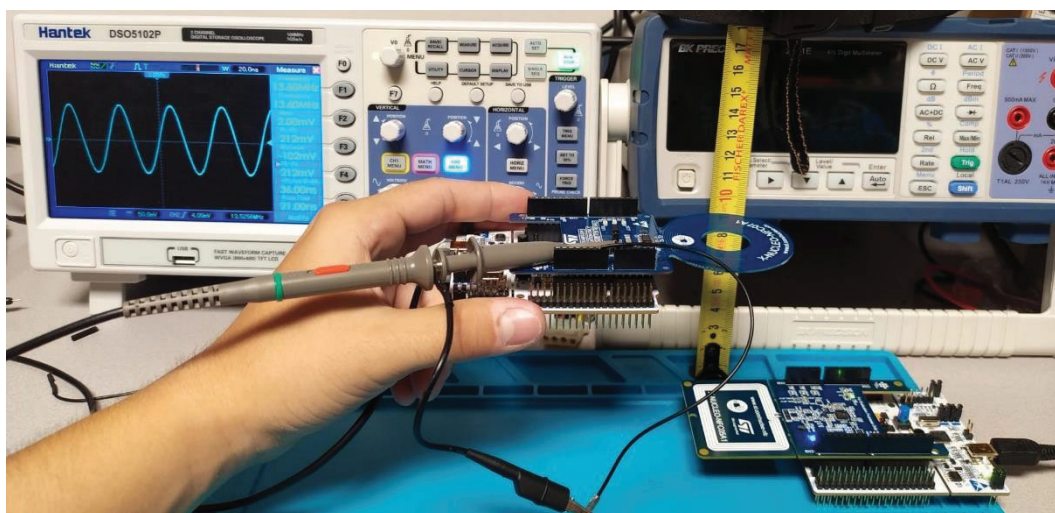


Ilustración 105: Resultados de la recolección de energía a la distancia máxima documentada

La distancia máxima registrada en esta memoria para obtener una señal de tensión originada por la recolección de energía del Dispositivo IoUT, es de aproximadamente 10cm. Llegando a obtener una señal de aproximadamente 200 mV pico a pico.

Por otra parte, se ha decidido verificar que, en teoría, situar las antenas de los prototipos perpendicularmente una respecto a la otra. No debería posibilitar la transferencia de energía entre los dispositivos.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

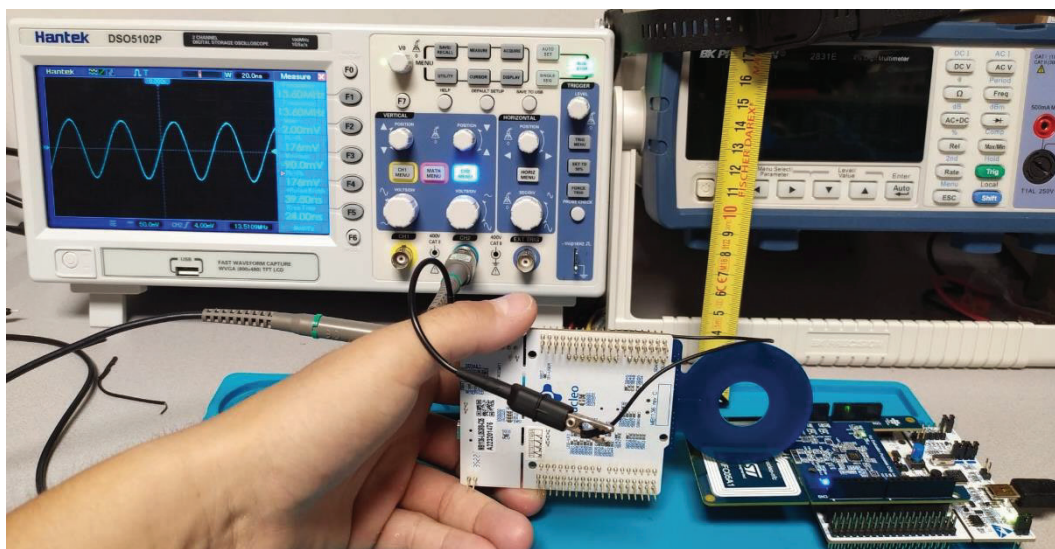


Ilustración 106: Resultados de la recolección de energía situando las antenas perpendicularmente entre ellas

A pesar de las indicaciones teóricas de esta tecnología, al mantener lo más cerca posible las antenas de los prototipos y situarlas perpendicularmente, se ha registrado señal de salida en el pin “EH” de la plataforma del tag dinámico NFC. Aunque esta señal es considerablemente baja, de menos de 200 mV de pico a pico, no se debería conseguir la recolección de energía.

No obstante, este asunto tiene mucho que ver con la geometría de las antenas de transmisión y recepción de energía y con las propiedades del campo electromagnético generado por el lector NFC.

Adicionalmente, se ha observado que la geometría de estas antenas genera algunos resultados inesperados al desplazar horizontalmente la antena del prototipo del Dispositivo IoUT sobre la antena del prototipo de la Estación Base.

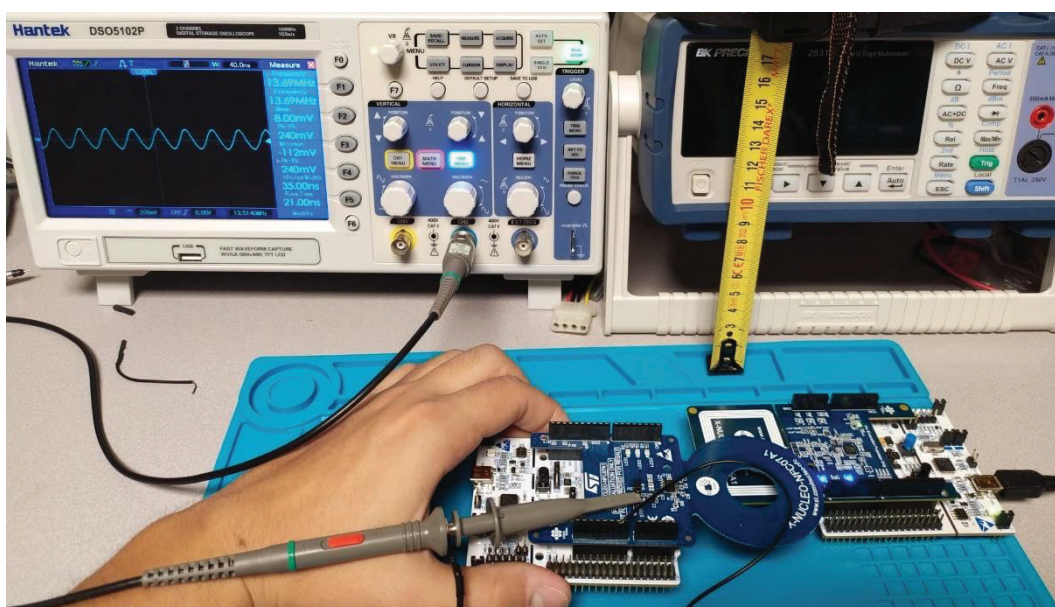


Ilustración 107: Peor registro de recolección de energía desplazando horizontalmente la antena del Dispositivo IoUT sobre el lector NFC

Tomando como referencia la forma rectangular de la antena del lector NFC, al desplazar la antena de la etiqueta dinámica por 3 de sus 4 lados, se registra que la recolección de energía por parte de este último varía en el orden de decenas o cientos de mV.

Este suceso puede observarse en la Ilustración 107, donde se ha obtenido la recolección de energía

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

más baja documentada para las pruebas de desplazamiento horizontal de las antenas. Sin embargo, este suceso no ocurre en todos los lados de la antena por igual.

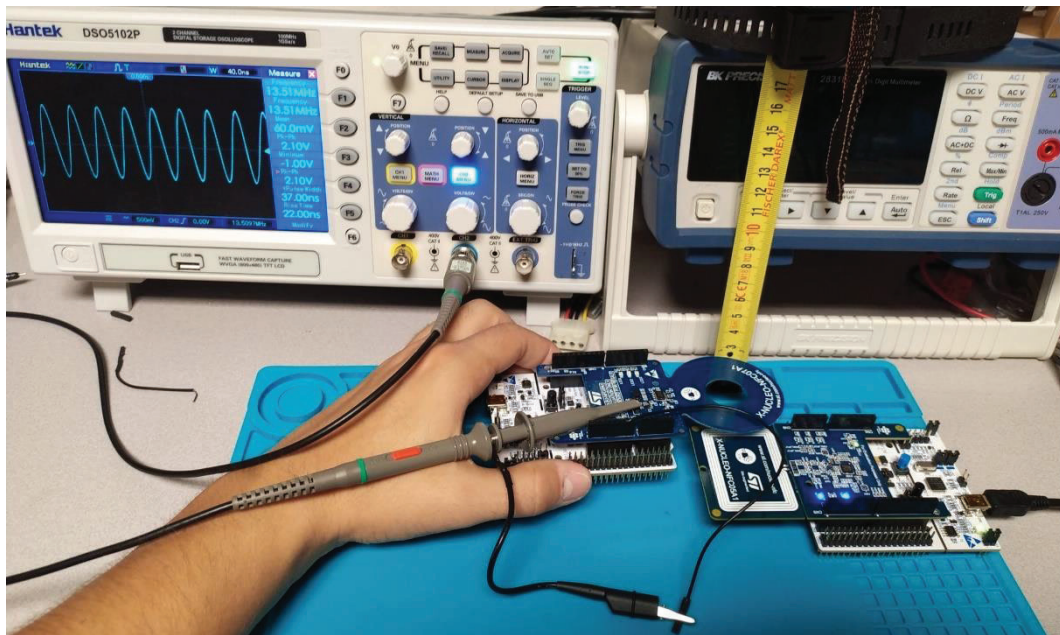


Ilustración 108: Mejor registro de recolección de energía desplazando horizontalmente la antena del Dispositivo IoUT sobre el lector NFC

En la Ilustración 108 se puede observar que, sólo en uno de los lados de la antena transmisora de energía se puede obtener una tensión de salida de el pin “EH” del X-NUCLEO-NFC07A1 superior a los 2 V.

Las lecturas registradas durante las pruebas realizadas confirman que esta tecnología presenta la robustez y durabilidad suficientes para garantizar un medio de comunicación inalámbrico entre los prototipos.

Además, se permite la transferencia de energía entre los dispositivos, lo que impulsa la posibilidad de incluir en aplicaciones futuras un sistema de alimentación propio del Dispositivo IoUT que se podría recargar inductivamente.

6 PRESUPUESTO

En este apartado se describe detalladamente el presupuesto del presente TFM, el cual se divide en recursos hardware, recursos software y recursos humanos.

6.1 RECURSOS HARDWARE

Para el desarrollo de este trabajo de fin de máster se han necesitado diferentes recursos hardware recogidos en la tabla incluida en este subapartado, estos recursos tienen un costo asociado. Dichos costos, han sido extraídos de DigiKey.

Cabe destacar que, en la tabla siguiente se resume el coste de la fabricación del prototipo para el receptor VLC, dado que el diseño en KiCad proporciona una lista detallada de los elementos necesarios para su fabricación. El coste de estos componentes queda englobado dentro del recurso hardware denominado “Prototipo receptor VLC”, y no se ha tenido en cuenta los costes por el transporte de los productos.

Tabla VII: Presupuesto de recursos hardware

Recursos hardware	Coste estimado
NUCLEO-L053R8	12,60 €
NUCLEO-L476RG	13,17 €
X-NUCLEO-NFC05A1	14,32 €
X-NUCLEO-NFC07A1	15,60 €
Prototipo receptor VLC	17,50 €
Sustratos para prototipos	20,00 €
Total:	93,19 €

6.2 RECURSOS SOFTWARE

En la tabla 2 se recogen los recursos software utilizados en este proyecto.

Tabla VIII: Presupuesto de recursos software

Recursos software	Tipo de licencia	Amortización	Coste estimado
STM32CubeIDE 1.12.0	Pública	-	0,00 €
STM32CubeMx	Pública	-	0,00 €
SW4STM32	Pública	-	0,00 €
KiCad 7.0	Pública	-	0,00 €
CircuitCAM 5.0	Universitaria	Amortizada	0,00 €
BoardMaster 5.0	Universitaria	Amortizada	0,00 €
Total:			0,00 €

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

6.3 RECURSOS HUMANOS

En la tabla siguiente está recogido el coste total de un contrato para un investigador titulado de máster, con una dedicación semanal de 20 horas, dicho coste queda estipulado en [55]. Para sacar el coste por horas, se divide la retribución mensual entre el número de horas trabajadas en un mes, este cálculo se puede seguir con las ecuaciones siguientes:

$$20 \frac{h}{semana} * 4 semanas = 80 h/mes$$

$$Coste investigador por horas = \frac{755,61€/mes}{80h/mes} = 9,45 €/h$$

Tabla IX: Presupuesto de recursos humanos

Investigador titulado (MECES 3)	Coste por horas (€/h)	Horas (h)	Total
Salario	9,45	300	2835,00 €

6.4 COSTE TOTAL

El coste total del proyecto se obtiene mediante la suma de los costes de los recursos hardware, software y humanos. Estos recursos son indispensables para completar el proyecto, y a continuación, se representan en una tabla de la que se obtiene el valor total.

Tabla X: Presupuesto total

Presupuesto	Coste
Recursos hardware	93,19 €
Recursos software	0,00 €
Recursos humanos	2835,00 €
Costes totales sin IGIC:	2928,19 €
IGIC (7%):	204,97 €
Total:	3133,16 €

Yo David Garcia Santana que el presupuesto final de este TFM asciende a tres mil ciento treinta y tres con dieciséis céntimos (3133,16 €).

Las Palmas de Gran Canaria, a 1 de septiembre de 2023.

Fdo.

Firmado por GARCIA SANTANA DAVID -
***4374** el día 29/08/2023 con un
certificado emitido por AC FNMT
Usuarios

7 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1 CONCLUSIONES

En este trabajo de fin de máster, se han alcanzado los objetivos previstos al haber llevado a cabo un estudio exhaustivo sobre la integración de las tecnologías VLC y NFC, explorando su posible aplicación para IoUT. Además, se ha buscado una solución escalable, de bajo consumo, con un diseño compacto y adaptable. Todo el estudio realizado ha quedado plasmado en el apartado 2.

Con este fin, se han documentado los resultados del estudio y desarrollo de un prototipo de receptor VLC planteado para recibir transmisiones de 4 KHz. Siendo emitidas por un transmisor basado en un LED blanco instalado en un dispositivo independiente al del receptor VLC. La base teórica de este proceso se desarrolla en el subapartado 3.1.

Además, en el subapartado 3.2 se ha estudiado la tecnología NFC con el fin de garantizar un medio de comunicación inalámbrico cuya solución fuera robusta y versátil para garantizar, no solo la transferencia de datos, sino también la transferencia de energía.

La solución proporcionada para este trabajo de fin de máster queda plasmada en los subapartados 3.3, 4.3.1 y 4.3.2. Se basa en un prototipo desarrollado en el laboratorio, que corresponde con el receptor VLC. Y en cuatro PCB de desarrollo independientes, que al integrarse por parejas representan los denominados dispositivo IoUT y estación base. Estos prototipos representan el objetivo de implementar un sistema de comunicación robusto que permitiera la recarga inductiva del primer dispositivo.

Por un lado, uno de los logros principales de este trabajo se documenta en el subapartado 5.2, Donde se demuestra que la implementación de un sistema de comunicaciones y recarga inductiva compacto, basado en la tecnología NFC, puede ser implementable con relativamente poco esfuerzo y bajo presupuesto, si se cuenta con las herramientas adecuadas, en este caso, proporcionadas por STMicroelectronics.

Los resultados obtenidos indican que la distancia de comunicación máxima, documentada en las pruebas de la tecnología NFC, es de 13 cm, situando el tag dinámico en paralelo al lector NFC y quedando la antena del primero sobre la antena del segundo. Aunque la distancia máxima para registrar alguna señal en el pin V_EH del X-NUCLEO-NFC07A1 es de 10 cm.

También se ha observado durante las pruebas que acercar demasiado las antenas NFC de los prototipos finales no aumenta la recolección de energía, de hecho, puede llegar a reducirse. Sin embargo, las pruebas realizadas no son suficientes como para justificar el origen de estas observaciones.

Como conclusión, se considera que se han cumplido los objetivos propuestos para este TFM. Sin embargo, es necesario continuar el estudio, desarrollo e implementación de las tecnologías abordadas en este proyecto si se desea implementar alguna aplicación futura basada en esta memoria.

7.2 TRABAJOS FUTUROS

En este último subapartado se pretenden exponer algunas de las opciones contempladas en este TFM para los trabajos futuros extraíbles de esta memoria. Por un lado, existen múltiples opciones para desarrollar futuros proyectos basados en la tecnología VLC y NFC descrita en este documento.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

Sin embargo, en las siguientes subsecciones se comentan algunos de los posibles proyectos futuros que se pueden llevar a cabo para mejorar los prototipos en los que se basa este trabajo de fin de título.

7.2.1 DISEÑO MÁS COMPACTO DEL DISPOSITIVO IOUT

Teniendo en cuenta que tanto el prototipo del Dispositivo IoUT como el prototipo de la Estación Base están basados en la integración de múltiples plataformas de desarrollo y de expansión. De cara a una aplicación futura, no se considera necesario modificar hardware del lector NFC para mantener el funcionamiento de la estación base mediante la tecnología NFC.

Sin embargo, se considera que el Dispositivo IoUT podría escalarse para que su diseño sea más compacto. De manera que se implemente una plataforma específica sobre la que se integran los elementos necesarios para su aplicación concreta, manteniendo su papel como tag dinámico NFC.

En [56] se puede encontrar la hoja técnica para las etiquetas de STMicroelectronics basadas en la familia ST25DVxxKC. Si se revisa este documento, se podrá observar que, los pads de conexión de los tags utilizados en este trabajo están claramente diferenciados según sus funciones:

- 2 de los pads, AC0 y AC1, son para la conexión con la antena de la etiqueta.
- 2 de los pads, SCL y SDA, son para la interfaz de comunicación I2C necesaria para el intercambio de información entre la etiqueta y el microcontrolador.
- 2 de los pads, Vcc y Vss, corresponden a la alimentación positiva y negativa del circuito integrado, es altamente recomendable consultar la hoja técnica de estos dispositivos antes de alimentarlos.
- 1 pad, V_EH, corresponde con la salida de tensión generada por el chip al conseguir recolectar la energía transferida inductivamente por una fuente independiente.
- 1 pad, GPO, este es un pin de interrupción configurable para alertar de múltiples eventos de RF y eventos de I²C.

Con esta información, se puede integrar el ST25DV64KC en el que se basa el tag dinámico NFC de este proyecto, en una pequeña PCB de aproximadamente 324 mm^2 . Tal y como se muestra a continuación:

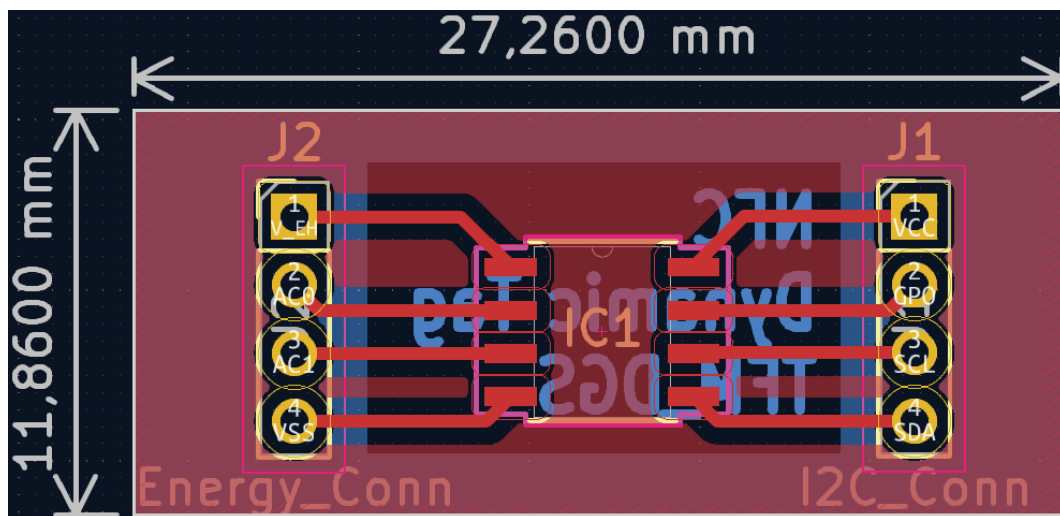


Ilustración 109: PCB para la integración compacta del ST25DVxxKC

Otro aspecto fundamental en este diseño sería la antena de la etiqueta dinámica NFC. Esta antena debe cumplir con las condiciones y propiedades descritas en [57]. Para ejemplificar una posible implementación de la antena basada en dicha referencia.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

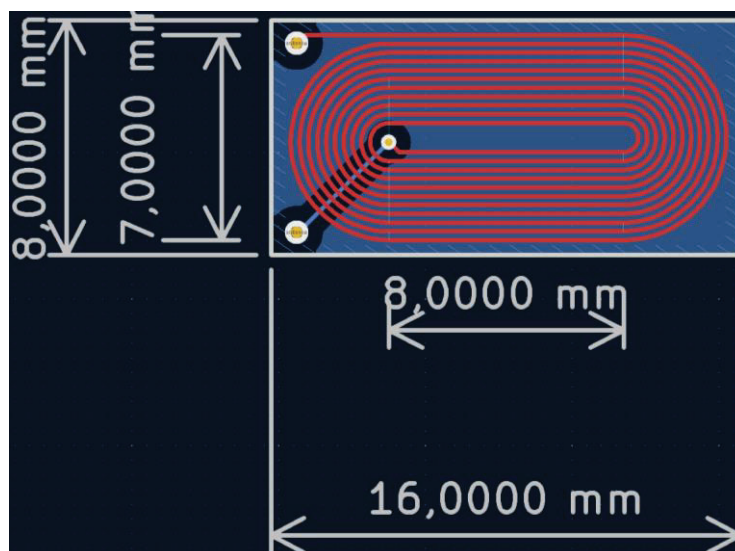


Ilustración 110: Antena milimétrica para el tag dinámico NFC

Se propone la fabricación de una antena de 2 capas sobre un sustrato rígido o flexible. Sin embargo, uno solo de estos diseños no dispone de la inductancia suficiente como para permitir el funcionamiento esperado del tag dinámico. Por lo que se considera necesario fabricar cuatro de estas antenas y probarlas tras conectarlas en serie, o fabricar un diseño multicapa que integre las 4 antenas.

Con estos elementos, faltaría introducir la conexión de la interfaz SPI entre el ST25 y el microcontrolador, la alimentación de la etiqueta y las conexiones que se consideren para los pines “V_EH” y “GPO”.

7.2.2 INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN QUE GESTIONE LA RECARGA INDUCTIVA.

La integración de un sistema de alimentación para controlar la recarga inductiva de una batería mediante el pad “V_EH” del ST25 requiere de un enfoque cuidadoso y la consideración de varios elementos clave:

- La selección de componentes para este sistema, teniendo en cuenta que se toma la señal de tensión a la salida del ST25 para recargar la batería incluida en el sistema de alimentación planteado
- El diseño del circuito que permita que controle la tensión generada por la recarga inductiva a la salida del tag dinámico. Además, se podría incorporar un circuito para la regulación del voltaje.
- La comunicación y el control de la recarga: Implementa la comunicación bidireccional entre el sistema de carga inductiva y la batería.
- La eficiencia energética del diseño: se debe asegurar que el sistema de alimentación diseñado sea eficiente para maximizar la energía almacenada.
- La inclusión de protecciones de seguridad: contra el sobrecalentamiento o fallo del sistema, además de medidas para prevenir sobrecargas y cortocircuitos.
- Considerar las características físicas del diseño: Se debe tener en cuenta el diseño físico de los elementos del sistema, así como su ubicación dentro del dispositivo para evitar la interferencia con otros sistemas o componentes.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

- La realización de pruebas y la optimización del diseño: Permitirá garantizar su funcionamiento, eficiencia y seguridad. Las pruebas realizadas pueden utilizarse para ajustar los parámetros según sea necesario para lograr un rendimiento óptimo.
- Las consideraciones ambientales: También se debe tener en cuenta las condiciones ambientales en las que se utilizará el sistema para garantizar su funcionamiento confiable a lo largo del tiempo.

Como conclusión, implementar un sistema de alimentación para controlar la recarga inductiva de la batería en el Dispositivo IoUT requerirá de un arduo trabajo por parte del diseñador, a parte de múltiples pruebas y prototipos para verificar la completa operatividad del nuevo prototipo con los sistemas que integre.

7.2.3 DISEÑO MÁS COMPACTO DEL RECEPTOR VLC

En una futura implementación completa del diseño del receptor VLC plateado en este proyecto, se podría escalar su diseño para que sea considerablemente más compacto al actual.

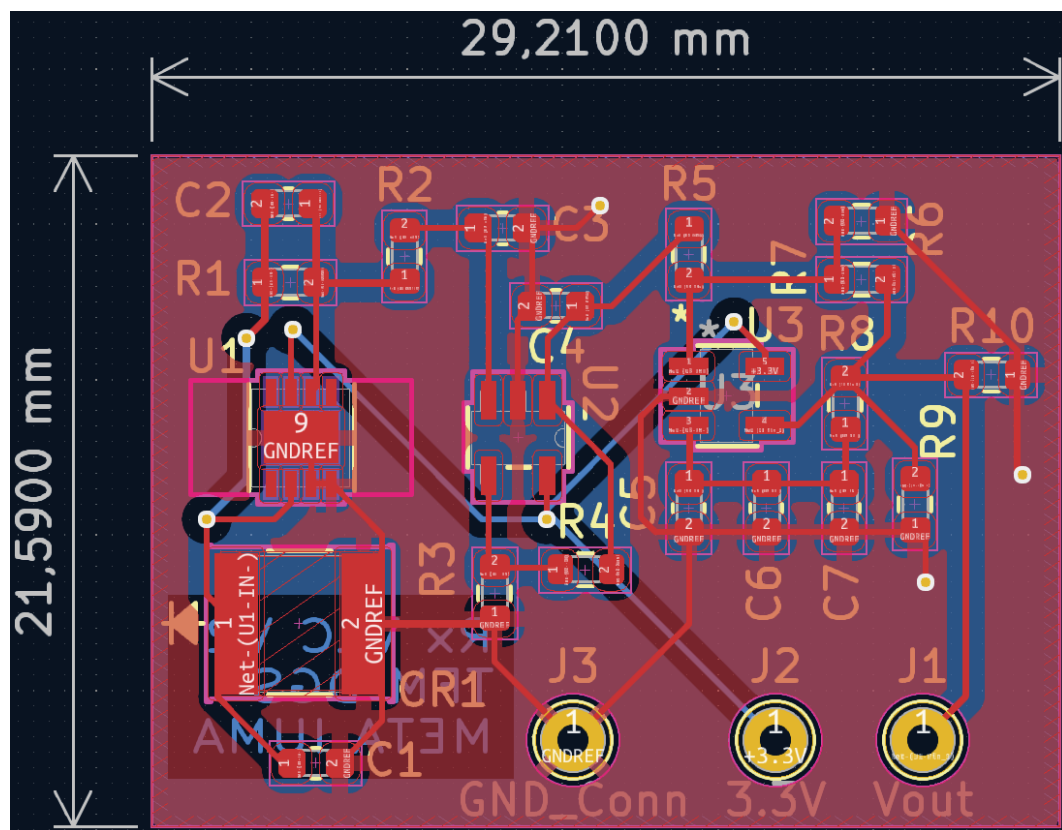


Ilustración 111: Diseño más compacto del receptor VLC

En la ilustración anterior se puede observar que el diseño implementado en este trabajo para el receptor VLC es perfectamente integrable en una PCB con lados inferiores a 30 mm. Éste es sólo un ejemplo de la escalabilidad del receptor VLC, ya que se puede reducir aún mas el diseño si se posicionan los componentes del diseño en las 2 caras de la PCB.

No obstante, no se recomienda explotar esta posibilidad hasta haber verificado el correcto funcionamiento del receptor VLC estudiado y diseñado en este proyecto. Los pines de alimentación y salida del receptor pueden adaptarse a prácticamente cualquier diseño siempre que los pads de sus redes de conexión se mantengan debidamente conectados.

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

7.2.4 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SOFTWARE ESPECÍFICO

Finalmente, otra posible mejora para las prestaciones de los prototipos de este TFM. Es el diseño e implementación de un software customizado para cada uno de los prototipos. Es decir, el software diseñado puede basarse o no en un diseño software ya existente. Pero debe implementarse teniendo en cuenta el o los protocolos de comunicación que se pretendan implantar.

Además, para trabajos futuros se recomienda aprovechar los máximos recursos posibles proporcionados por compañías como STMicroelectronics. Pero también es recomendable utilizar entornos de desarrollo conocidos por el diseñador.

De este modo, se puede evitar la curva de aprendizaje inevitable al abordar cualquier herramienta de diseño nueva. Aunque el diseño e implementación del software pueda resultar más complejo, tras este trabajo se considera que el tiempo gastado en amoldar la solución diseñada a un entorno de desarrollo conocido es menor que el requerido para aprender a implantar dicha solución en un entorno nuevo.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. T. R. Khan, Y. Z. Jembre, S. H. Ahmed, y D. Kim, «REMEDY: Receiver-initiated MAC based on energy-efficient duty-cycling in the IoUT», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 105202-105211, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2931733.
- [2] R. A. Khalil, N. Saeed, M. I. Babar, y T. Jan, «Toward the Internet of Underwater Things: Recent Developments and Future Challenges», *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 10, n.º 6, pp. 32-37, nov. 2021, doi: 10.1109/MCE.2020.2988441.
- [3] B. M. Cochenour, L. J. Mullen, y A. E. Laux, «Characterization of the beam-spread function for underwater wireless optical communications links», *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 33, n.º 4, pp. 513-521, 2008, doi: 10.1109/JOE.2008.2005341.
- [4] H. Brundage, «Designing a wireless underwater optical communication system», 2010, Accedido: 13 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/57699>
- [5] A. Lazaro, R. Villarino, y D. Girbau, «A Survey of NFC Sensors Based on Energy Harvesting for IoT Applications», *Sensors 2018, Vol. 18, Page 3746*, vol. 18, n.º 11, p. 3746, nov. 2018, doi: 10.3390/S18113746.
- [6] «RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards ... - Klaus Finkenzeller - Google Libros». <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=jAszZEqYa9wC&oi=fnd&pg=PT6&dq=%5B6%5D%09K.+Finkenzeller,+RFID+Handbook:+Fundamentals+and+Applications+in+Contactless+Smart+Cards+...+-+Klaus+Finkenzeller+-+Google+Libros.+2010.+Accedido:+9+de+julio+de+2023.+%5BEn+1%C3%ADnea%5D.+Disponible+en:+https://books.google.es/books%3Fhl%3Des%26lr%3D%26id%3DjAszZEqYa9wC%26o&ots=2KqFhl-YRn&sig=2Lc8GMcBGqr3bLSG4GoYX5OU0rE#v=onepage&q&f=false> (accedido 13 de julio de 2023).
- [7] M. A. Ferrer *et al.*, «From operculum and body tail movements to different coupling of physical activity and respiratory frequency in farmed gilthead sea bream and European sea bass. Insights on aquaculture biosensing», *Comput Electron Agric*, vol. 175, ago. 2020, doi: 10.1016/J.COMPAG.2020.105531.
- [8] J. A. Martos-Sitcha *et al.*, «Ultra-low power sensor devices for monitoring physical activity and respiratory frequency in farmed fish», *Front Physiol*, vol. 10, n.º MAY, 2019, doi: 10.3389/FPHYS.2019.00667.
- [9] J. Calduch-Giner *et al.*, «Revising the Impact and Prospects of Activity and Ventilation Rate Bio-Loggers for Tracking Welfare and Fish-Environment Interactions in Salmonids and Mediterranean Farmed Fish», *Front Mar Sci*, vol. 9, mar. 2022, doi: 10.3389/FMARS.2022.854888.
- [10] E. Rosell-Moll *et al.*, «Use of accelerometer technology for individual tracking of activity patterns, metabolic rates and welfare in farmed gilthead sea bream (*Sparus aurata*) facing a wide range of stressors», *Aquaculture*, vol. 539, jun. 2021, doi: 10.1016/J.AQUACULTURE.2021.736609.
- [11] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, y P. Mohapatra, «Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges», *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, n.º 4, pp. 2047-2077, oct. 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2476474.
- [12] «802.15.7-2018 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.7 : Short-Range Optical Wireless Communications.», 2019.
- [13] S. Jiang y S. Georgakopoulos, «Electromagnetic Wave Propagation into Fresh Water», *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, vol. 2011, n.º 07, pp. 261-266, jul. 2011, doi: 10.4236/JEMAA.2011.37042.
- [14] A. Keskin, F. Genç, S. A. Arpali, Ö. K. Catmakas, Y. Baykal, y Ç. Arpali, «Effects of focused and collimated laser beams on the performance of underwater wireless optical communication links», *2015 4th International Workshop on Optical Wireless Communications, IWOW 2015*, pp. 41-45, nov. 2015, doi: 10.1109/IWOW.2015.7342262.
- [15] W. Aman, S. Al-Kuwari, M. Muzzammil, M. Mahboob, U. Rahman, y A. Kumar, «Survey paper Security of underwater and air-water wireless communication: State-of-the-art, challenges and

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

- outlook», *Ad Hoc Networks*, vol. 142, pp. 1570-8705, 2023, doi: 10.1016/j.adhoc.2023.103114.
- [16] «NFC Forum: Members Home». https://members.nfc-forum.org/members?referring_url=%2Fkws (accedido 13 de julio de 2023).
- [17] Z. Ma, Q. Huang, Y. Yang, y S. Wang, «A Wireless Charging and NFC Integration Technique Based on High-frequency Impedance Characterization of Wireless Charging Coils», *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, vol. 2023-March, pp. 811-817, 2023, doi: 10.1109/APEC43580.2023.10131414.
- [18] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, y Z. Han, «Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications», *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 18, n.º 2, pp. 1413-1452, abr. 2016, doi: 10.1109/COMST.2015.2499783.
- [19] C. M. G. Gussen, P. S. R. Diniz, M. L. R. Campos, W. A. Martins, F. M. Costa, y J. N. Gois, «A Survey of Underwater Wireless Communication Technologies», *JOURNAL OF COMMUNICATION AND INFORMATION SYSTEMS*, vol. 31, n.º 1, 2016, doi: 10.14209/jcis.2016.22.
- [20] L. Yang *et al.*, «A review of underwater inductive wireless power transfer system», *IET Power Electronics*, 2023, doi: 10.1049/PEL2.12456.
- [21] U. M. Qureshi *et al.*, «RF Path and Absorption Loss Estimation for Underwater Wireless Sensor Networks in Different Water Environments», *Sensors 2016, Vol. 16, Page 890*, vol. 16, n.º 6, p. 890, jun. 2016, doi: 10.3390/S16060890.
- [22] «NFC (Near-Field Communication) and RFID - STMicroelectronics». <https://www.st.com/en/nfc.html> (accedido 13 de julio de 2023).
- [23] «STMicroelectronics: Our technology starts with you». https://www.st.com/content/st_com/en.html (accedido 13 de julio de 2023).
- [24] «STM32L053R8 - Ultra-low-power Arm Cortex-M0+ MCU with 64 Kbytes of Flash memory, 32 MHz CPU, USB, LCD - STMicroelectronics». <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l053r8.html> (accedido 16 de julio de 2023).
- [25] «NUCLEO-L053R8 - STM32 Nucleo-64 development board with STM32L053R8 MCU, supports Arduino and ST morpho connectivity - STMicroelectronics». <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-l053r8.html#documentation> (accedido 16 de julio de 2023).
- [26] «STM32L476RG - Ultra-low-power with FPU Arm Cortex-M4 MCU 80 MHz with 1 Mbyte of Flash memory, LCD, USB OTG, DFSDM - STMicroelectronics». <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l476rg.html> (accedido 16 de julio de 2023).
- [27] «NUCLEO-L476RG - STM32 Nucleo-64 development board with STM32L476RG MCU, supports Arduino and ST morpho connectivity - STMicroelectronics». <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-l476rg.html> (accedido 16 de julio de 2023).
- [28] «ST25 NFC / RFID Tags & Readers - STMicroelectronics». <https://www.st.com/en/nfc/st25-nfc-rfid-tags-readers.html> (accedido 16 de julio de 2023).
- [29] «NFC / RFID ST25 product overview».
- [30] «ST25R3911B - High performance HF reader / NFC initiator with 1.4 W supporting VHBR and AAT - STMicroelectronics». <https://www.st.com/en/nfc/st25r3911b.html> (accedido 8 de agosto de 2023).
- [31] «X-NUCLEO-NFC05A1 - NFC card reader expansion board based on ST25R3911B for STM32 and STM8 Nucleos - STMicroelectronics». <https://www.st.com/en/ecosystems/x-nucleo-nfc05a1.html#overview> (accedido 16 de julio de 2023).
- [32] «ST25DV64KC - Dynamic NFC/RFID tag IC with 64-Kbit EEPROM, and fast transfer mode capability - STMicroelectronics». <https://www.st.com/en/nfc/st25dv64kc.html> (accedido 7 de agosto de 2023).
- [33] «X-NUCLEO-NFC07A1 - Dynamic NFC/RFID tag IC expansion board based on ST25DV64KC for STM32 Nucleo - STMicroelectronics». <https://www.st.com/en/ecosystems/x-nucleo-nfc07a1.html#overview> (accedido 7 de agosto de 2023).
- [34] «STM32Cube Development Software - STM32 Open Development Environment - STMicroelectronics». <https://www.st.com/en/ecosystems/stm32cube.html> (accedido 16 de julio de 2023).
- [35] «STM32CubeMX - STM32Cube initialization code generator - STMicroelectronics».

Dispositivo IoUT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

- <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cube.html> (accedido 16 de julio de 2023).
- [36] «STM32CubeIDE - Integrated Development Environment for STM32 - STMicroelectronics». <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html> (accedido 16 de julio de 2023).
- [37] «SW4STM32 - System Workbench for STM32: free IDE on Windows, Linux and OS X - STMicroelectronics». <https://www.st.com/en/development-tools/sw4stm32.html#get-software> (accedido 22 de agosto de 2023).
- [38] «OpenSTM32 Community Site | Home Page». <https://www.openstm32.org/HomePage> (accedido 23 de agosto de 2023).
- [39] «Home: Votre partenaire en informatique embarquée et temps-réel - ac6». <https://www.ac6.fr/> (accedido 23 de agosto de 2023).
- [40] «KiCad EDA - Schematic Capture & PCB Design Software». <https://www.kicad.org/> (accedido 16 de julio de 2023).
- [41] «Standard and White LED Basics and Operation - Application Note - Maxim», 2004.
- [42] «Ambient Light Sensor», Accedido: 30 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: www.vishay.com/doc?91000
- [43] «FEATURES D OVER 250kHz TRANSIMPEDANCE BANDWIDTH D DYNAMIC RANGE: 5 Decades D EXCELLENT LONG-TERM STABILITY D LOW VOLTAGE NOISE: 10nV/√Hz D BIAS CURRENT: 3pA D OFFSET VOLTAGE: 25μV (max) D OFFSET DRIFT: 0.1μV/°C (max) D GAIN BANDWIDTH: 18MHz D QUIESCENT CURRENT: 800μA D FAST OVERLOAD RECOVERY D SUPPLY RANGE: 2.7V to 5.5V D SINGLE AND DUAL VERSIONS D MicroPACKAGE: DFN-8, MSOP-8», Accedido: 2 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: www.ti.com
- [44] A. Devices, «Precision CMOS, Single-Supply, Rail-to-Rail, Input/Output Wideband Operational Amplifiers TOP VIEW (Not to Scale) Figure 1. 5-Lead SOT-23 (RJ Suffix) TOP VIEW (Not to Scale)», Accedido: 15 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: www.analog.com
- [45] «LMV331-N data sheet, product information and support | TI.com». https://www.ti.com/product/LMV331-N?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=ti-null-null-xref-cpc-pf-google-ww&utm_content=xref&ds_k=%7b_dssearchterm%7d&DCM=yes&gclid=Cj0KCQjwn_OlBhDhARIsAG2y6zP91Cr4n-UadYLG7gMiZrPYOO21fvwmcMlNGP8nq0zSI_nGu7CMLRIaAgGXEALw_wcB&gclsrc=aw.ds (accedido 16 de agosto de 2023).
- [46] «TodoElectrodo: Board Master 5.0». <https://todoelectrodo.blogspot.com/2012/10/board-master-50.html> (accedido 15 de agosto de 2023).
- [47] «X-CUBE-NFC5 - High performance HF reader/NFC initiator IC software expansion for STM32Cube - STMicroelectronics». <https://www.st.com/en/embedded-software/x-cube-nfc5.html> (accedido 8 de agosto de 2023).
- [48] «RF/NFC abstraction layer (RFAL)». https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2890-rfnfc-abstraction-layer-rfal-stmicroelectronics.pdf (accedido 24 de agosto de 2023).
- [49] «Introduction Description of STM32L4/L4+ HAL and low-layer drivers UM1884 User manual». Accedido: 24 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: www.st.com
- [50] «X-CUBE-NFC7 - Dynamic NFC/RFID tag IC software expansion for STM32Cube - STMicroelectronics». <https://www.st.com/en/embedded-software/x-cube-nfc7.html#documentation> (accedido 23 de agosto de 2023).
- [51] «NDEF library». Accedido: 24 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.st.com/resource/en/application_note/an5616-ndef-library-stmicroelectronics.pdf
- [52] «CMSIS-RTOS Documentation». <https://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/RTOS/html/index.html> (accedido 24 de agosto de 2023).
- [53] «CMSIS-RTOS2 Documentation». <https://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/RTOS2/html/index.html> (accedido 24 de agosto de 2023).
- [54] «Description of STM32L0 HAL and low-layer drivers». Accedido: 24 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: www.st.com
- [55] «Portal del PDI - Retribuciones - Normativa y cuadros retributivos | ULP GC - Universidad de Las Palmas de Gran Canaria». <https://www.ulpgc.es/spersonal-retribuciones/pdi-normativa> (accedido 30 de julio de 2023).

Dispositivo IoT con recarga inductiva y comunicaciones inalámbricas para seguimiento de peces en agua dulce

- [56] «Datasheet - ST25DV04KC ST25DV16KC ST25DV64KC». Accedido: 25 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/st25dv64kc.pdf>
- [57] «AN2972 Application note How to design an antenna for dynamic NFC tags», 2019, Accedido: 25 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: www.st.com