



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



HiveCare: Monitoreo no invasivo de colmenas mediante sensores RFID

MEMORIA DE PROYECTO PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR

Rodrigo Blanco, Nicolás Gugliucci, Lucas Olivera

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS
PARA LA FINALIZACIÓN DE LA CARRERA DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA.

TUTORES

Andrés Seré..... Universidad de la República
Leonardo Steinfeld..... Universidad de la República

TRIBUNAL

Rocío Cabral..... Universidad de la República
Pablo Pérez Nicoli..... Universidad de la República
Claudina Rattaro..... Universidad de la República

Montevideo
viernes 31 julio, 2026

HiveCare: Monitoreo no invasivo de colmenas mediante sensores RFID, Rodrigo Blanco, Nicolás Gugliucci, Lucas Olivera.

Esta tesis fue preparada en L^AT_EX usando la clase iietesis (v1.2).
Contiene un total de 180 páginas.
Compilada el viernes 31 julio, 2026.
<http://iie.fing.edu.uy/>

If you can meet with Triumph and Disaster
And treat those two impostors just the same;

If you can fill the unforgiving minute
With sixty seconds' worth of distance run,
Yours is the Earth and everything that's in it,
And—which is more—you'll be a Man, my son!

— Rudyard Kipling, *If*—

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Agradecimientos

Primero que nada agradecer a nuestros tutores Leo y Andrés que siempre estuvieron al tanto para resolver problemas. En segundo lugar, agradecer a Pablo Cracco quien le puso toda la onda nos llevó a ver las colmenas, nos explicó cómo funcionaban y, en fin, fue un pilar de esta tesis.

Asimismo, agradecer a familiares y amigos que nos tuvieron que bancar durante el desarrollo de la carrera, tantas comidas perdidas por tener que estudiar, tantas salidas a las que no pudimos ir debido a diferentes tareas que se debieron realizar.

Estamos eternamente agradecidos con todos.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Resumen

La apicultura moderna enfrenta desafíos asociados a la pérdida de colonias, enfermedades y condiciones ambientales adversas, lo que genera la necesidad de herramientas de monitoreo continuo y no invasivo. En este contexto, la apicultura de precisión propone la incorporación de tecnologías de monitoreo que permiten obtener información objetiva sobre el estado de las colmenas, facilitando la detección temprana de anomalías y mejorando la toma de decisiones por parte del apicultor. Entre las variables de interés, la temperatura de la cámara de cría constituye un indicador relevante del estado fisiológico y la actividad de la colonia.

En este trabajo se presenta HiveCare, una plataforma IoT (Internet of Things) para el monitoreo inalámbrico de temperatura en colmenas tipo Langstroth mediante sensores RFID (Radio Frequency Identification)/NFC (Near Field Communication). La propuesta constituye una solución novedosa al eliminar la necesidad de cableado interno dentro de la colmena, característica presente en la mayoría de las soluciones de apicultura de precisión reportadas hasta la fecha. De esta forma, HiveCare representa un avance hacia sistemas de monitoreo con menor impacto sobre las tareas habituales de manejo e inspección realizadas por el apicultor, al evitar las dificultades asociadas a la presencia de cables en el interior de la colmena.

La solución propuesta se basa en una arquitectura compuesta por Colmenas HiveCare, cada una de las cuales contiene varios Marcos HiveCare y un Lector HiveCare. Los marcos incorporan sensores de temperatura y tags NFC pasivos capaces de operar sin baterías, permitiendo la adquisición de datos en múltiples puntos de la cámara de cría sin introducir fuentes de energía potencialmente riesgosas en el interior de la colmena. Además, su diseño minimiza el área intervenida del marco, preservando prácticamente la totalidad de su superficie útil para el desarrollo de la colonia. El lector realiza la recolección inalámbrica de datos utilizando RFID/NFC y su transmisión remota mediante NB-IoT (Narrowband Internet of Things) hacia una infraestructura en la nube para almacenamiento, procesamiento y visualización. Asimismo, incorpora una batería recargable alimentada por un panel solar, permitiendo la operación autónoma del sistema durante períodos prolongados.

El trabajo abarca el diseño integral del sistema, desde su concepción hasta su validación en campo. Esto incluye la definición de la arquitectura general, la selección y evaluación de tecnologías de sensado, y el diseño de antenas NFC orientadas a incrementar la distancia de lectura. Como resultado, se logró extender el alcance típico de esta tecnología, de aproximadamente 5 a 10 cm, hasta 35 cm, permitiendo acceder desde el exterior de la colmena a zonas de interés para el monitoreo. Asimismo, se desarrollaron el hardware de los Marcos HiveCare y del Lector Hi-

veCare, el firmware embebido asociado y la infraestructura de software para el almacenamiento y visualización de datos.

Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad de implementar un sistema de monitoreo apícola no invasivo, capaz de obtener perfiles térmicos de la cámara de cría sin utilizar cableado ni baterías en el interior de la colmena, reduciendo las necesidades de mantenimiento y minimizando el impacto sobre la dinámica natural de la colonia.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	III
Resumen	V
1. Introducción	1
1.1. Abejas y su importancia	1
1.2. Apicultura y contexto productivo	3
1.3. Funcionamiento de la colmena	4
1.4. Problemática en la apicultura	5
1.5. Apicultura de precisión	6
1.6. Descripción del problema	8
1.7. Objetivos generales	9
1.8. Solución propuesta	9
2. Diseño general	11
2.1. Consideraciones del entorno apícola	12
2.2. Requerimientos del sistema	13
2.3. Arquitectura general del sistema	15
2.4. Flujo de operación del sistema	16
2.5. Diseño del sistema de sensado: Marco HiveCare	18
2.6. Diseño del sistema lector: Lector HiveCare	20
2.7. Diseño de interfaz de usuario	22
3. Near-field communication (NFC)	25
3.1. RFID	26
3.1.1. Clasificación de tags RFID	28
3.1.2. Near-field-based RFID	28
3.1.3. Far-field-based RFID	29
3.1.4. Diferencias entre RFID LF, HF y UHF	30
3.2. Fundamentos técnicos de NFC	31
3.2.1. Protocolos y estándares	31
3.2.2. Técnicas de modulación digital	33
3.2.3. Alcances y condiciones de operación	33
3.2.4. Tags NFC	34
3.2.5. Lectores NFC	36

Tabla de contenidos

3.3. Dispositivos relevados	37
3.3.1. Tags analizados	37
3.3.2. Lectores analizados	38
4. Arquitectura del Marco HiveCare	41
4.1. Configuraciones evaluadas	42
4.1.1. Sensores de temperatura	42
4.1.2. Tags NFC	43
4.1.3. Lectores NFC	44
4.2. Evaluación de las configuraciones	44
4.2.1. Caracterización energética de los tags	44
4.2.2. Medición de consumo de las configuraciones	46
4.2.3. Medición del alcance de comunicación	49
4.2.4. Costos y área ocupada	51
4.3. Discusión y selección de la solución	51
5. Diseño de antenas	53
5.1. Caracterización del campo de los lectores	53
5.2. Diseño de la antena del Marco HiveCare	55
5.2.1. Construcción y determinación de parámetros	55
5.2.2. Verificación con VNA	58
5.2.3. Resultados de alcance	58
5.3. Diseño de la antena del Lector HiveCare	58
5.3.1. Estrategia de diseño	58
5.3.2. Parámetros de la antena original del lector	60
5.3.3. Diseño de la nueva antena	60
5.3.4. Verificación con VNA	61
5.3.5. Resultados de alcance	61
6. Hardware	63
6.1. Diseño del Marco HiveCare	63
6.1.1. Diseño de circuito	63
6.1.2. Diseño de layout	67
6.1.3. Prototipo integrado	72
6.2. Diseño del Lector HiveCare	72
6.2.1. Intervenciones en los módulos	74
6.2.2. Diseño de la alimentación	77
6.2.3. Construcción mecánica	80
7. Firmware	83
7.1. Sistema	83
7.1.1. Inicialización del sistema	85
7.1.2. Adquisición de datos	86
7.1.3. Comunicación NB-IoT	88
7.1.4. Modo de bajo consumo	90
7.2. Estructura de firmware	90

7.2.1. Capa Application	91
7.2.2. Capa Platform	92
7.2.3. Capa Driver	94
7.2.4. Capa Core	95
7.3. Configuraciones	95
7.4. Portabilidad, escalabilidad y extensibilidad	95
8. Software	97
8.1. Raspberry Pi	97
8.2. Interfaz gráfica: Grafana	101
8.3. Base de datos: MariaDB	103
8.4. Conexión remota	106
9. Resultados experimentales y pruebas de campo	109
9.1. Validación de la comunicación NFC	110
9.2. Impacto de la tensión de alimentación en la distancia de lectura . .	110
9.3. Frecuencia de resonancia de la antena del marco diseñado	111
9.4. Transmisión de datos mediante NB-IoT	112
9.5. Evaluación del uso del <i>RSSI</i> para posicionamiento	113
9.6. Consumo energético y autonomía	113
9.7. Aceptación del sistema por parte de la colonia	115
9.8. Análisis de datos de temperatura relevados	115
9.9. Evaluación del sistema en condiciones reales	116
10. Conclusiones y trabajo futuro	119
10.1. Trabajo a futuro	121
Apéndices	124
A. Fundamentos del acoplamiento inductivo en sistemas NFC/RFID	
HF	125
A.1. Generación del campo magnético	125
A.2. Voltaje inducido	126
A.3. Inductancia de la bobina	126
A.4. Resistencia serie y pérdidas	127
A.5. Factor de calidad	127
A.6. Capacitancias parásitas y frecuencia de resonancia	128
A.7. Compromisos de diseño en antenas NFC	128
A.8. Acoplamiento inductivo	129
B. Cálculo de resistencias <i>pull-up</i> para el bus I²C	131
B.1. Resistencia mínima	131
B.2. Resistencia máxima	132
B.2.1. Estimación de la capacitancia del bus	132
B.3. Selección final	134

Tabla de contenidos

C. Fabricación y ensamblaje de las PCB	135
C.1. Fabricación de la PCB	135
C.2. Proceso de ensamblaje	135
C.2.1. Perfil térmico utilizado	136
C.3. Pruebas realizadas durante el ensamblaje	136
D. Manual de usuario	137
D.1. Puesta en marcha	137
D.1.1. Configuración del acceso remoto	137
D.1.2. Obtención del IMEI	138
D.1.3. Registro y configuración de la colmena	139
D.2. Instalación del hardware	140
D.3. Uso de la interfaz gráfica	142
Referencias	145
Acrónimos	151
Definiciones	153
Índice de tablas	156
Índice de figuras	159
Índice de temas	167

Capítulo 1

Introducción

En el presente capítulo se introduce el contexto general del proyecto, abordando tanto los aspectos biológicos y productivos asociados a la apicultura, como las problemáticas actuales que enfrenta el sector. Asimismo, se presenta la motivación para el desarrollo de soluciones tecnológicas orientadas al monitoreo de colmenas, enmarcadas dentro del concepto de apicultura de precisión.

En particular, se describe la importancia de las abejas como agentes polinizadores, el funcionamiento interno de la colmena y el rol de la temperatura en la cámara de cría como indicador del estado de la colonia. A partir de este análisis, se identifican las limitaciones de los métodos tradicionales de monitoreo y se plantea la necesidad de contar con herramientas no invasivas y de bajo consumo energético que permitan la adquisición de datos de forma continua.

Finalmente, se presenta la problemática específica abordada en este trabajo, junto con la propuesta de solución desarrollada y los objetivos del proyecto.

El presente documento se organiza de la siguiente manera: en el Capítulo 2 se presenta la arquitectura general del sistema y los requerimientos de diseño; en el Capítulo 3 se introducen los fundamentos teóricos de la tecnología Radio Frequency Identification/Near Field Communication utilizada; en los Capítulos 4 y 5 se describen las pruebas realizadas para la elección de los distintos componentes y el diseño de antenas para lograr un mayor desempeño de los mismos; en el Capítulo 6 se presenta el diseño del hardware desarrollado; en el Capítulo 7 se describe el firmware implementado; en el Capítulo 8 se detalla el software tanto de la infraestructura remota como de la interfaz gráfica desarrollada; en el Capítulo 9 se presentan los resultados experimentales de validación del sistema tanto en campo como en laboratorio; y finalmente en el Capítulo 10 se exponen las conclusiones del trabajo y las líneas de trabajo futuro.

1.1. Abejas y su importancia

Las abejas melíferas (*Apis mellifera*) son insectos sociales pertenecientes a la familia *Apidae*, ampliamente distribuidos a nivel mundial y de gran relevancia tanto ecológica como productiva [1]. Se caracterizan por su organización en colonias

Capítulo 1. Introducción

altamente estructuradas y por su estrecha relación con el ser humano, quien las ha domesticado y manejado durante siglos para la obtención de diversos productos y servicios.

Una colonia de abejas melíferas está compuesta por tres castas, cada una con funciones, características y comportamientos diferentes [1]:

- Las obreras, son hembras estériles y representan la mayoría de la población. Las mismas realizan todas las tareas necesarias para el funcionamiento de la colmena, como ser limpieza, alimentación de larvas, producción de cera, recolección de néctar, polen y agua, vigilancia y ventilación. Éstas además, cambian su rol según su edad.
- La reina, es la única hembra fértil y su principal función es la reproducción; pone miles de huevos a lo largo de su vida. Al mismo tiempo, produce feromonas que mantienen la cohesión social de la colonia. El tamaño de la reina es mayor que las abejas obreras, por ello es que se la puede confinar mediante una malla excluidora para que se mantenga únicamente en cierta sección de la colmena.
- Por último, los zánganos son los machos de la colmena y su función principal es fecundar a la reina durante el vuelo nupcial. Los mismos no recolectan alimento ni participan de tareas de mantenimiento y suelen ser expulsados de la colmena al acercarse el invierno.

La actividad de las abejas permite la obtención de productos de alto valor económico como miel, cera, propóleo y jalea real. Además, desde el punto de vista ecológico, las abejas cumplen un rol esencial como agentes polinizadores. Durante la recolección de néctar y polen, transportan granos de polen entre flores, facilitando la reproducción de numerosas especies vegetales. Este proceso no solo sostiene la biodiversidad de los ecosistemas, sino que también impacta directamente en la producción agrícola. Se estima que una fracción significativa de los cultivos destinados al consumo humano depende, en mayor o menor medida, de la polinización realizada por insectos, siendo las abejas uno de los principales contribuyentes [2].

Sin embargo, en las últimas décadas se ha observado un declive en las poblaciones de abejas a nivel global, asociado a múltiples factores como el uso de pesticidas, la aparición de enfermedades y parásitos, la pérdida de hábitat y el cambio climático. Esta situación representa una amenaza tanto para la seguridad alimentaria como para la estabilidad de los ecosistemas, lo que ha impulsado el desarrollo de nuevas herramientas y tecnologías orientadas al monitoreo y cuidado de las colmenas [3].

Una de las características más relevantes de *Apis mellifera* es su capacidad para mantener condiciones ambientales controladas dentro de la colmena, particularmente en la cámara de cría. Este es el lugar en donde las larvas son criadas, en la Figura 1.1 se puede ver la ubicación de la misma en una colmena tipo Langstroth. En este espacio, las abejas obreras regulan activamente la temperatura en un rango estrecho, típicamente entre 33,5 °C y 34,5 °C, mediante mecanismos como la generación de calor por contracción muscular y la ventilación mediante el batido de sus

1.2. Apicultura y contexto productivo

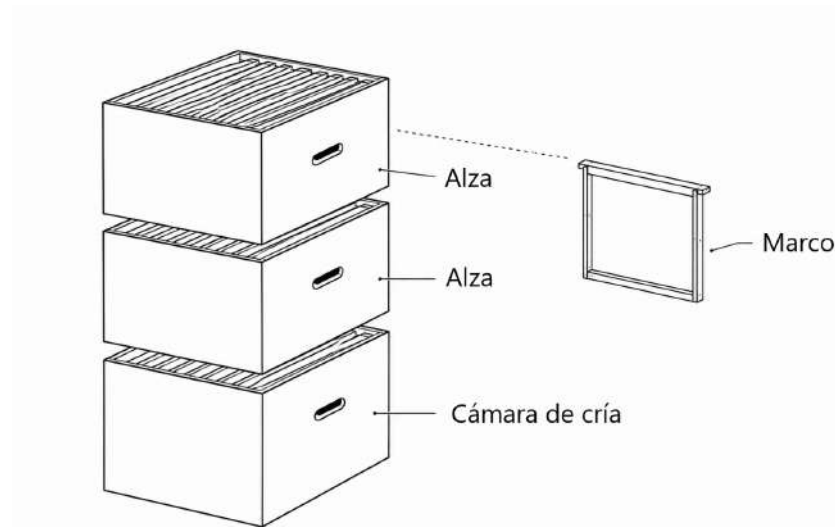


Figura 1.1: Esquema simplificado de una colmena tipo Langstroth. Generado con asistencia de ChatGPT (OpenAI).

alas. Esta regulación térmica resulta fundamental para el correcto desarrollo de las larvas y constituye un indicador directo del estado fisiológico de la colonia [4].

En este contexto, resulta de especial interés el monitoreo remoto de colmenas para predecir eventos de intoxicación o mortandad de abejas. En ese sentido, el monitoreo de temperatura de la cámara de cría permite inferir el estado de salud y la dinámica de la colonia.

1.2. Apicultura y contexto productivo

La apicultura es la actividad dedicada a la cría y manejo de colonias de abejas, principalmente de la especie *Apis mellifera*, con el objetivo de obtener productos como miel, cera, propóleo y jalea real, así como brindar servicios de polinización [5]. Esta práctica combina conocimientos biológicos, técnicos y productivos, y desempeña un rol relevante tanto en la economía agropecuaria como en la conservación de los ecosistemas [6].

El apicultor es el encargado de gestionar las colmenas, realizando tareas como el control sanitario, la alimentación suplementaria en períodos de escasez, la prevención de enjambrazón —proceso natural mediante el cual una colonia se divide y parte de las abejas abandona la colmena junto con una reina para formar una nueva colonia— y la cosecha de productos apícolas [7]. Asimismo, debe monitorear el estado general de las colonias, evaluando factores como la presencia de la reina, la cantidad de cría, las reservas de alimento y las condiciones ambientales. Tradicionalmente, estas evaluaciones se realizan mediante inspecciones periódicas, que implican la apertura de la colmena y la observación directa de los cuadros [8].

Capítulo 1. Introducción

Desde el punto de vista productivo, la apicultura presenta múltiples beneficios, entre ellos su bajo requerimiento de superficie, su compatibilidad con otras actividades agropecuarias y su contribución indirecta a la producción agrícola a través de la polinización [6]. En este sentido, el valor económico de las abejas no solo radica en los productos que generan, sino también en el impacto positivo que tienen sobre el rendimiento y la calidad de diversos cultivos [9].

En Uruguay, la apicultura constituye un sector agropecuario consolidado, con una fuerte orientación exportadora [10]. El país cuenta con condiciones naturales favorables para su desarrollo, tales como una amplia disponibilidad de recursos florales y una baja industrialización en extensas áreas del territorio [10]. Estas características han permitido posicionar a Uruguay como un productor de miel de alta calidad, con reconocimiento en mercados internacionales [11–13].

La producción nacional de miel supera ampliamente el consumo interno, destinándose un alto porcentaje a la exportación [10]. Este perfil exportador expone al sector a variaciones en los precios internacionales y a exigencias crecientes en términos de calidad, trazabilidad e inocuidad [14]. En este contexto, la incorporación de tecnologías que permitan mejorar la gestión de las colmenas y garantizar la calidad del producto adquiere una relevancia estratégica.

No obstante, el sector apícola enfrenta diversos desafíos. Entre ellos se destacan las pérdidas recurrentes de colonias, la disminución en los rendimientos productivos por colmena y los problemas sanitarios asociados a enfermedades y parásitos [15, 16]. A su vez, factores externos como el uso de agroquímicos, la competencia de mieles adulteradas en el mercado internacional y las condiciones climáticas variables afectan la sostenibilidad de la actividad [10].

En este escenario, resulta fundamental avanzar hacia prácticas de apicultura más eficientes y basadas en información objetiva. La incorporación de herramientas de monitoreo continuo permite mejorar la toma de decisiones, reducir la incertidumbre y detectar de manera temprana posibles anomalías en las colmenas [17]. De esta forma, la integración de tecnologías de Internet of Things en la apicultura se presenta como una estrategia clave para fortalecer la competitividad del sector y mitigar los riesgos asociados a su producción.

1.3. Funcionamiento de la colmena

El correcto funcionamiento de la colmena depende de una organización altamente eficiente de las abejas obreras, las cuales adaptan sus tareas en función de su edad y de las necesidades de la colonia. Entre estas tareas se incluyen la alimentación de las larvas, la limpieza de las celdas, la recolección de recursos y el mantenimiento de condiciones internas adecuadas [18]. Dentro de estas últimas, la regulación de la temperatura en la cámara de cría reviste una importancia fundamental.

El desarrollo adecuado de la cría requiere condiciones térmicas muy específicas. En particular, las abejas mantienen la temperatura del nido de cría en un rango estrecho, típicamente entre $33,5^{\circ}\text{C}$ y $34,5^{\circ}\text{C}$, independientemente de las condiciones externas. Esta estabilidad térmica es lograda mediante mecanismos activos de

1.4. Problemática en la apicultura

termorregulación por parte de las obreras. Cuando la temperatura desciende, las abejas generan calor a través de la contracción de los músculos de vuelo sin mover las alas, elevando la temperatura local. Por el contrario, cuando la temperatura aumenta, las abejas ventilan la colmena mediante el batido coordinado de sus alas y pueden transportar agua para favorecer el enfriamiento por evaporación [4].

La distribución espacial de la temperatura dentro de la cámara de cría no es uniforme, sino que está estrechamente relacionada con la ubicación y el tamaño del nido de cría. Las zonas con mayor densidad de cría tienden a presentar temperaturas más estables y cercanas al valor óptimo, mientras que las regiones periféricas exhiben mayores variaciones térmicas [19]. Esta característica permite utilizar la temperatura como un indicador indirecto del estado y la extensión del nido de cría.

Alteraciones en la dinámica de la colonia, tales como la pérdida de la reina, la presencia de enfermedades, la falta de recursos o la preparación para el enjambrazón, pueden afectar la capacidad de las abejas para mantener la regulación térmica [19]. Como consecuencia, se producen desviaciones en el perfil de temperatura que pueden ser utilizadas como señales tempranas de anomalías dentro de la colmena.

En este contexto, el estudio del funcionamiento térmico de la cámara de cría adquiere particular relevancia, ya que proporciona una base fisiológica para el monitoreo del estado de la colonia. La medición de temperatura en distintos puntos de la colmena permite inferir la dinámica interna de la misma sin necesidad de intervenciones invasivas, constituyendo un enfoque adecuado para sistemas de monitoreo continuo.

1.4. Problemática en la apicultura

A pesar de su relevancia ecológica y productiva, la apicultura enfrenta actualmente múltiples desafíos que afectan tanto la salud de las colonias como la sostenibilidad económica del sector. En las últimas décadas, se ha observado una tendencia preocupante de pérdidas recurrentes de colmenas a nivel global, fenómeno asociado a una combinación de factores biológicos, ambientales y antrópicos [3].

Entre los principales factores que afectan a las colonias se encuentran las enfermedades y parásitos. En particular, la presencia de ácaros como la *Varroa destructor* constituye una de las amenazas más significativas, ya que debilita a las abejas al alimentarse de ellas y actúa como vector de diversos virus. Asimismo, existen otras patologías de origen bacteriano, fúngico y viral que pueden comprometer el desarrollo de la cría y la estabilidad de la colonia [20].

Otro factor crítico es la exposición a agroquímicos utilizados en la producción agrícola. Los pesticidas, en especial los insecticidas sistémicos, pueden afectar el sistema nervioso de las abejas, alterar su comportamiento y reducir su capacidad de orientación y recolección. En muchos casos, estos efectos no provocan la muerte inmediata de las abejas, pero generan un deterioro progresivo de la colonia que puede derivar en su colapso [21, 22].

A estos factores se suman las condiciones ambientales adversas, tales como cambios bruscos de temperatura, sequías o la pérdida de biodiversidad floral, que

Capítulo 1. Introducción

limitan la disponibilidad de recursos alimenticios. En conjunto, estas condiciones incrementan el estrés de la colonia y reducen su capacidad de adaptación.

Desde el punto de vista productivo, uno de los problemas más relevantes es la pérdida de colonias y la disminución en el rendimiento por colmena. Estas pérdidas tienen un impacto directo en la rentabilidad del apicultor, especialmente en países con fuerte orientación exportadora, donde la competitividad depende de mantener niveles constantes de producción y calidad.

A pesar de la magnitud de estos problemas, el monitoreo del estado de las colmenas continúa realizándose mayoritariamente mediante métodos tradicionales basados en inspecciones manuales. Estas inspecciones implican la apertura de la colmena y la observación directa de los marcos, lo que presenta varias limitaciones. En primer lugar, se trata de un proceso invasivo que altera el comportamiento natural de las abejas y puede generar estrés en la colonia. En segundo lugar, su frecuencia está limitada por el tiempo y los recursos disponibles del apicultor, lo que dificulta la detección temprana de anomalías. Finalmente, estas evaluaciones dependen en gran medida de la experiencia del apicultor, introduciendo un componente subjetivo en la interpretación del estado de la colmena.

En los últimos años, se han propuesto diversas soluciones tecnológicas para el monitoreo de colmenas, incluyendo sistemas basados en sensores cableados, balanzas, micrófonos y sensores ambientales. Si bien estas alternativas permiten obtener información adicional sobre el estado de la colonia, suelen presentar limitaciones en términos de costo, complejidad de instalación o grado de invasividad, lo que dificulta su adopción a gran escala [23].

En este contexto, existe una necesidad creciente de desarrollar sistemas de monitoreo que permitan obtener información continua, objetiva y no invasiva sobre el estado de las colmenas. La capacidad de detectar de manera temprana desviaciones en variables clave, como la temperatura de la cámara de cría, resulta fundamental para anticipar problemas y mejorar la toma de decisiones en la gestión apícola.

1.5. Apicultura de precisión

En los últimos años, el sector agropecuario ha experimentado un proceso creciente de digitalización, impulsado por la incorporación de tecnologías de IoT. En este contexto, surge el concepto de apicultura de precisión, entendido como la aplicación de tecnologías digitales para el monitoreo y la optimización del manejo de colmenas. En otras palabras, la apicultura de precisión es una estrategia de gestión apiaria que se enfoca en el monitoreo de colonias individuales de abejas para minimizar el consumo de recursos y maximizar la productividad. La misma involucra tres fases: recolección de datos, su análisis y la utilización de la información obtenida para optimizar las prácticas apícolas [24].

La apicultura de precisión busca superar las limitaciones de los métodos tradicionales mediante la implementación de sistemas capaces de medir variables relevantes de forma continua y no invasiva [25]. Entre las variables de interés se encuentran la temperatura [26], la humedad, el peso de la colmena, la actividad acústica y el flujo de abejas en la piquera. Estas magnitudes permiten inferir el

1.5. Apicultura de precisión

estado interno de la colonia, su nivel de actividad y la disponibilidad de recursos, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones.

Como antecedente a este proyecto, se encuentra el proyecto de fin de carrera de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Beesmart [23] que propuso realizar el monitoreo de temperatura y humedad en la cámara de cría y peso total de la colmena. Dicha solución presenta la desventaja que los sensores se encuentran cableados, dificultando el manejo de la colmena en las tareas apícolas. Asimismo, Zapecepins et al. [25] utilizan sensores cableados para identificar la enjambración. Al igual que Meikle et. al [26] donde se buscaron indicadores de que la temperatura dentro de la colmena tuviera una correlación con el estado de salud de la misma, pero utilizando sensores cableados.

Otro antecedente relevante es el trabajo de Rodríguez Echeverry y Sánchez Giménez [27], realizado en la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República, donde se evaluó el uso de sensores de temperatura para el monitoreo de colmenas de *Apis mellifera*. En dicho estudio se analizó el comportamiento térmico de la colonia y la utilidad de la temperatura como indicador biológico del estado interno de la colmena.

En paralelo, durante los últimos años han surgido diversas soluciones comerciales orientadas a la apicultura de precisión. Entre ellas destacan plataformas como BroodMinder [28], HiveWatch [29], Arnia [30] y Label Abeille [31], las cuales integran sensores para el monitoreo de variables como temperatura, humedad, peso y actividad de vuelo.

Particularmente, algunas soluciones recientes incorporan sensores directamente sobre los marcos de la colmena, permitiendo obtener perfiles térmicos más representativos del nido de cría. Sin embargo, muchas de estas alternativas presentan limitaciones asociadas al costo, la dependencia de baterías dentro de la colmena, el uso de cableado o la necesidad de realizar modificaciones estructurales sobre la misma.

En este contexto, el presente proyecto propone una solución de monitoreo térmico basada en sensores integrados directamente en los marcos de la colmena y comunicación inalámbrica mediante RFID. De esta manera, se busca eliminar la necesidad de cableado interno sin introducir baterías, reducir el mantenimiento asociado al sistema de sensado y minimizar el impacto sobre la dinámica natural de la colonia y sobre la operativa apícola.

Con el objetivo de resumir las principales características de las soluciones comerciales y antecedentes relevados, en la Tabla 1.1 se presenta una comparación entre distintos sistemas de monitoreo apícola y la propuesta desarrollada en este proyecto. Se observa que las soluciones existentes presentan distintas aproximaciones al monitoreo de colmenas, aunque muchas de ellas continúan dependiendo de sensores cableados, baterías dentro de la colmena o mediciones globales que no permiten caracterizar espacialmente el nido de cría. La propuesta desarrollada en este proyecto busca combinar monitoreo térmico, comunicación inalámbrica y bajo impacto sobre la operativa apícola, evitando el uso de cableado y reduciendo la necesidad de mantenimiento dentro de la colmena.

Capítulo 1. Introducción

Tabla 1.1: Comparación entre soluciones de monitoreo apícola.

Sistema	Sensado en marcos	Sin cableado interno	Sin baterías dentro de la colmena	Perfil térmico del nido de cría
BeeSmart	No	No	No	Parcial
BroodMinder	Sí	Sí	No	No
HiveWatch	No	Sí	Sí	No
Arnia	Sí	Sí	No	No
Label Abeille	No	Sí	Sí	No
HiveCare	Sí	Sí	Sí	Sí

1.6. Descripción del problema

A partir del análisis del funcionamiento de la colmena y de las problemáticas actuales de la apicultura, se identifica la necesidad de contar con herramientas que permitan monitorear de manera continua y no invasiva el estado interno de las colonias. En particular, la cámara de cría constituye una región de interés crítico, ya que su dinámica refleja directamente la salud y evolución de la colonia.

Como se mencionó anteriormente, las abejas mantienen la temperatura del nido de cría en un rango estrecho, siendo esta una variable estrechamente vinculada al desarrollo de larvas y al equilibrio fisiológico de la colmena. Alteraciones en esta regulación térmica pueden estar asociadas a distintos eventos, tales como la pérdida de reina, la presencia de enfermedades, la falta de recursos o la preparación para la enjambrazón. En consecuencia, la temperatura se presenta como una variable adecuada para inferir el estado de la colonia.

Sin embargo, la medición de temperatura en el interior de la colmena plantea diversos desafíos. Por un lado, el entorno es hostil desde el punto de vista físico, con presencia de humedad, cera, propóleo y actividad constante de las abejas. Por otro lado, cualquier intervención debe minimizar su impacto sobre el comportamiento natural de la colonia y no interferir con las prácticas habituales del apicultor. Asimismo, resulta deseable evitar soluciones que impliquen cableado complejo, mantenimiento frecuente o introducción de elementos potencialmente contaminantes como baterías en el interior de la colmena.

En este contexto, el problema a resolver consiste en el diseño e implementación de un sistema capaz de medir la temperatura en múltiples puntos de la cámara de cría, de forma no invasiva y con bajo consumo energético, permitiendo obtener información representativa del estado térmico del nido de cría.

Adicionalmente, el sistema debe ser capaz de recopilar y transmitir los datos hacia una infraestructura remota, de manera que puedan ser almacenados, procesados y utilizados para el monitoreo continuo de la colmena. Esto implica considerar restricciones asociadas a la disponibilidad energética, la conectividad en entornos rurales y la necesidad de garantizar un funcionamiento autónomo durante períodos prolongados.

1.7. Objetivos generales

Por lo tanto, el problema no se limita únicamente a la medición de temperatura, sino que abarca el desarrollo de una solución integral que contemple el sensado de temperatura, la recolección de datos, la gestión eficiente de la energía y la comunicación remota, todo ello bajo las restricciones propias dentro del entorno apícola.

1.7. Objetivos generales

El objetivo del presente proyecto es desarrollar un sistema no invasivo para la medición de temperatura en la cámara de cría de colmenas tipo Langstroth. Adicionalmente, se contempla el desarrollo de una *GUI (Graphical User Interface)* que permita el acceso y la visualización de los datos de forma clara e intuitiva.

El propósito final del sistema es brindar al apicultor una herramienta práctica que permita disponer de información sobre la temperatura en la cámara de cría, facilitando el análisis de eventos indeseados —tales como enjambrazón, plagas o condiciones climáticas adversas— y contribuyendo a la detección temprana de anomalías. De esta manera, se busca mejorar la toma de decisiones en el manejo de colmenas y mitigar pérdidas productivas.

1.8. Solución propuesta

Con el objetivo de abordar las limitaciones identificadas en el monitoreo de colmenas, se propone el desarrollo de un sistema integral denominado Sistema HiveCare, orientado a la medición de temperatura en la cámara de cría y al monitoreo remoto del estado de la colonia. La solución planteada se basa en una arquitectura modular compuesta por dos elementos principales:

- Colmena HiveCare compuesta por:
 - Marco HiveCare encargado del sensado de temperatura y de la transmisión de los datos hacia el Lector HiveCare mediante tecnología RFID. Está compuesto por sensores de temperatura y un tag RFID integrados en un marco de colmena.
 - Lector HiveCare responsable de la recopilación de datos de los Marcos HiveCare y su envío a través de internet hacia una infraestructura remota para su posterior visualización por parte del apicultor.
- Infraestructura remota, cuyo objetivo es el manejo, almacenamiento y disposición de los datos al usuario.

Esta solución se muestra diagramada en la Figura 1.2. La comunicación entre los Marcos HiveCare y el Lector HiveCare se realiza de forma inalámbrica y con tecnologías de comunicación de corto alcance, permitiendo la lectura de sensores de temperatura de múltiples marcos. La integración de los sensores directamente en los marcos permite realizar mediciones de temperatura sin interferir significativamente con la estructura de la colmena ni con las tareas habituales del apicultor.

Capítulo 1. Introducción

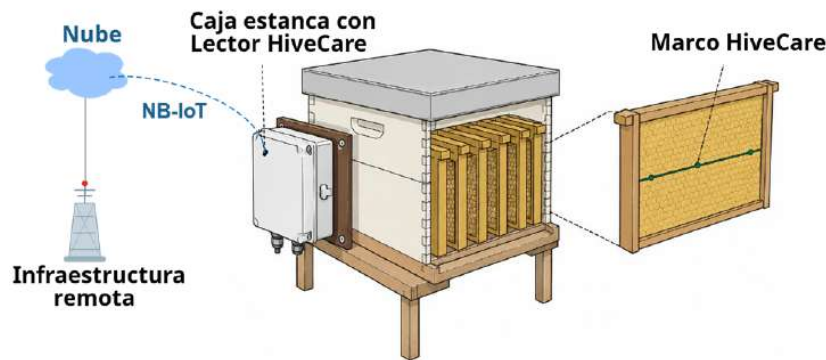


Figura 1.2: Esquema simplificado de la integración del Sistema HiveCare en una colmena tipo Langstroth, conformando así una Colmena HiveCare. Se muestran los Marcos HiveCare ubicados dentro de la cámara de cría y el Lector HiveCare instalado en el exterior de la colmena dentro de una caja estanca. Además se muestra como esta manda los datos hacia la infraestructura remota. Generado con asistencia de Claude (Anthropic).

El Lector HiveCare constituye el nodo central del sistema y se encarga de gestionar la adquisición de datos, coordinando la interacción con los distintos dispositivos de sensado. Una vez recopilada la información, el lector la transmite hacia un servidor remoto utilizando tecnologías de comunicación de largo alcance y bajo consumo, permitiendo el acceso a los datos desde plataformas externas para su almacenamiento, visualización y análisis. Al mismo tiempo, se agrega un sensor de temperatura al Lector HiveCare para llevar un registro de la temperatura externa a la colmena.

Otro aspecto de la solución propuesta es su diseño orientado a la eficiencia energética. Dado que el sistema debe operar en entornos rurales y de difícil acceso, se prioriza el uso de estrategias que permitan maximizar la autonomía, tales como la utilización de fuentes de energía renovable y la correcta gestión del consumo de los distintos componentes del sistema.

Desde el punto de vista funcional, el sistema permite obtener un perfil térmico de la cámara de cría a partir de mediciones en múltiples puntos. Esta información posibilita inferir el tamaño y la ubicación del nido de cría, así como detectar desviaciones respecto al comportamiento esperado. De esta manera, se habilita la identificación temprana de eventos anómalos, contribuyendo a una gestión más eficiente de la colmena.

Capítulo 2

Diseño general

Las colmenas utilizadas en apicultura moderna suelen ser de tipo Langstroth, desarrolladas por Lorenzo Lorraine Langstroth y patentadas en 1852 [32]. Estas colmenas están compuestas por una serie de cajones apilables, denominados alzas que contienen en su interior marcos móviles donde las abejas construyen los panales. Esta configuración permite inspeccionar y manipular la colonia de forma relativamente sencilla sin alterar completamente su organización interna.

En una disposición típica, el cajón inferior se denomina cámara de cría, y constituye la región más importante desde el punto de vista biológico. Es en esta zona donde la abeja reina deposita los huevos y donde se desarrolla la cría en sus distintos estados (larvas y pupas). Por encima de la cámara de cría se ubican las alzas mielarias, destinadas principalmente al almacenamiento de miel. Para evitar que la reina acceda a estas secciones superiores y deposite huevos, se emplea una rejilla excluidora, que permite el paso de las obreras pero no de la reina debido a su mayor tamaño.

La organización interna de la colmena, junto con las condiciones ambientales y biológicas propias de la actividad apícola, imponen diversas restricciones que deben considerarse en el diseño de un sistema de monitoreo. En este capítulo se presenta el diseño general del Sistema HiveCare, considerando estas restricciones y los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema.

En primer lugar, en la sección de consideraciones del entorno apícola y requerimiento del sistema (Secciones 2.1 y 2.2 respectivamente), se analizan las condiciones ambientales, mecánicas y de operación propias de las colmenas, así como las capacidades esperadas para el monitoreo de temperatura, comunicación y autonomía energética. Posteriormente, en la Sección 2.3, se describe la arquitectura general propuesta, basada en Marcos HiveCare ubicados dentro de la cámara de cría y un Lector HiveCare externo encargado de recolectar y transmitir la información hacia una infraestructura remota. A continuación, en la Sección 2.4, se presenta la secuencia de funcionamiento del sistema, desde la adquisición de datos en los marcos hasta su transmisión y visualización por parte del usuario. Finalmente, se desarrollan los lineamientos de diseño del Marco HiveCare en la Sección 2.5, del Lector HiveCare en la Sección 2.6 y de la interfaz gráfica de usuario en la Sección 2.7, justificando las decisiones adoptadas en términos de integración mecánica,

comunicación inalámbrica, gestión energética y experiencia de uso.

2.1. Consideraciones del entorno apícola

El diseño de un sistema de monitoreo para colmenas de abejas requiere contemplar una serie de condiciones particulares impuestas por el entorno apícola. Estas condiciones abarcan tanto aspectos físicos de la colmena como el comportamiento de las abejas y las características del ambiente en el que se desarrolla la actividad, y constituyen factores determinantes en la definición de la arquitectura del sistema.

Las colmenas utilizadas en apicultura moderna suelen ser de tipo Langstroth, compuestas por cajones modulares que contienen marcos móviles. Se puede observar una colmena de este tipo en la Figura 2.1. Estos marcos presentan dimensiones estandarizadas y son manipulados frecuentemente por el apicultor durante tareas de inspección, mantenimiento y cosecha. En este contexto, cualquier dispositivo incorporado al sistema debe adaptarse a estas dimensiones y no interferir con la manipulación habitual de los elementos de la colmena. Asimismo, dado que los marcos se pueden cambiar de posición por disposiciones del apicultor, el sistema debe ser capaz de operar correctamente independientemente de la ubicación y orientación de cada componente.

Desde el punto de vista biológico, las abejas presentan comportamientos que impactan directamente en el diseño de dispositivos electrónicos. En particular, tienden a recubrir con propóleo o cera cualquier elemento extraño introducido en la colmena, lo que puede afectar tanto el funcionamiento mecánico como la interacción electromagnética de los dispositivos. Además, las abejas suelen evitar utilizar celdas que contengan objetos ajenos, lo que implica que la intervención sobre los marcos debe ser mínima para no alterar la dinámica de la colonia ni reducir el área útil para la cría o el almacenamiento de alimento. [1]

El ambiente interno de la colmena presenta condiciones exigentes para los dispositivos electrónicos. Se trata de un entorno con alta humedad relativa, presencia de sustancias como miel, cera y propóleo, y temperaturas que pueden variar dependiendo de la actividad de la colonia y de las condiciones externas. Estas características imponen la necesidad de considerar aspectos como la protección frente a la humedad, la resistencia a la corrosión y la robustez mecánica de los componentes.

Por otro lado, la ubicación típica de las colmenas en entornos rurales o de difícil acceso introduce restricciones adicionales. En muchos casos, no se dispone de acceso a fuentes de energía convencionales ni a infraestructura de comunicaciones cableadas, lo que obliga a diseñar sistemas con alta autonomía energética y capacidades de comunicación inalámbrica de largo alcance.

En lo que respecta a la comunicación dentro de la colmena, la presencia de materiales como madera, cera y fluidos (por ejemplo, miel) puede afectar la propagación de señales electromagnéticas, especialmente a altas frecuencias. En este sentido, resulta conveniente emplear tecnologías de comunicación inalámbrica robustas frente a este tipo de condiciones y adecuadas para operar en el entorno de la colmena.

2.2. Requerimientos del sistema

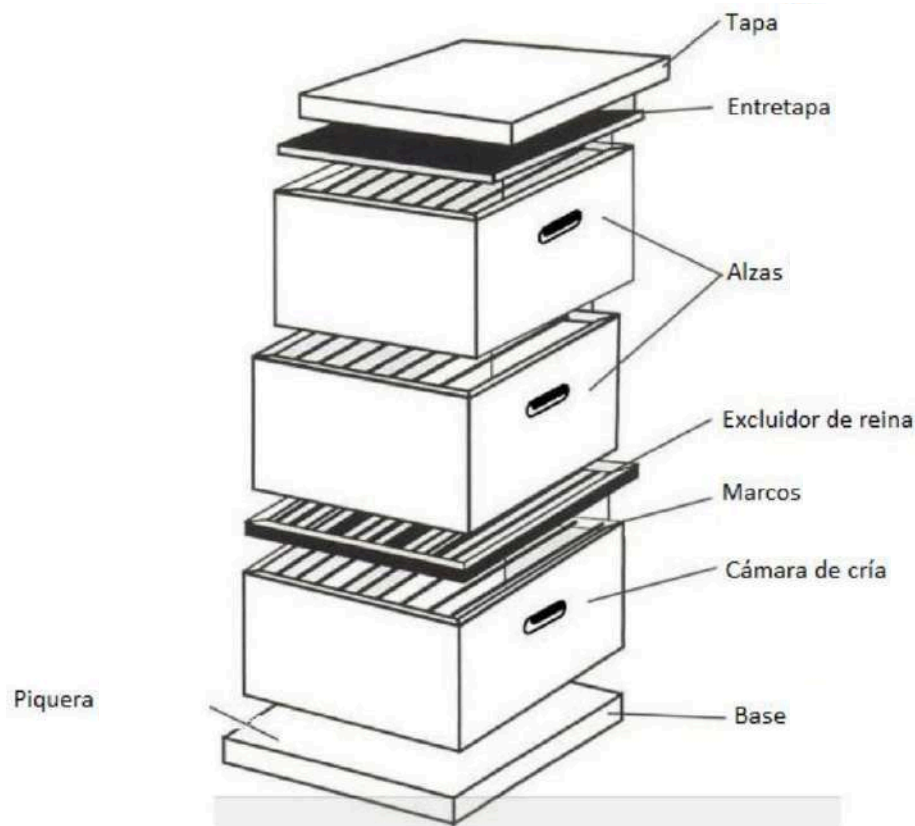


Figura 2.1: Esquema de colmena tipo Langstroth, donde se observan sus diferentes componentes. Adaptada de [18].

A partir de las consideraciones anteriores, se desprenden una serie de lineamientos de diseño para el sistema propuesto: minimizar la invasividad sobre la estructura de los marcos, evitar el uso de cableado interno, garantizar la robustez frente a condiciones ambientales adversas, permitir la operación independientemente de la posición de los elementos, asegurar una elevada autonomía energética y utilizar tecnologías de comunicación poco susceptibles a la atenuación causada por los materiales presentes en la colmena. Estos lineamientos constituyen la base sobre la cual se desarrolla la arquitectura del sistema presentada en las secciones siguientes.

2.2. Requerimientos del sistema

Requerimientos funcionales

Los requerimientos funcionales del sistema definen las capacidades que debe poseer la solución desarrollada para cumplir con los objetivos del proyecto. En primer lugar, el sistema deberá ser capaz de medir la temperatura en la cámara de cría

Capítulo 2. Diseño general

de colmenas tipo Langstroth de manera no invasiva. Se requiere a su vez, que la adquisición de datos se dé en múltiples puntos distribuidos dentro de la colmena, para obtener así un perfil térmico representativo del estado del nido de cría.

Asimismo, el sistema deberá permitir la recolección de las mediciones desde un dispositivo externo a la colmena, evitando la necesidad del apicultor de realizar intervenciones manuales frecuentes. Esta recolección deberá realizarse de forma inalámbrica, garantizando la integridad de los datos obtenidos. Una vez adquirida la información, el sistema deberá ser capaz de transmitir los datos hacia una infraestructura remota, donde serán almacenados y procesados. Esta capacidad resulta fundamental para habilitar el monitoreo continuo de las colmenas sin requerir la presencia del apicultor en el sitio.

Adicionalmente, se deberá proporcionar una interfaz de usuario que permita la visualización de los datos de temperatura de forma clara e intuitiva. Esta interfaz deberá presentar la información histórica y actual del sistema, facilitando el análisis del comportamiento térmico de la colmena. Por último, el sistema deberá permitir la configuración de parámetros operativos, en particular la frecuencia de muestreo de las mediciones, de modo de adaptarse a distintos escenarios de uso y requerimientos del apicultor.

Requerimientos no funcionales

Los requerimientos no funcionales establecen las condiciones de operación y restricciones que debe cumplir el sistema para ser viable en el entorno apícola. En primer lugar, el sistema deberá ser no invasivo, de modo que su integración en la colmena no altere significativamente el comportamiento de las abejas ni interfiera con las tareas habituales del apicultor. En particular, se deberá minimizar la intervención sobre los marcos y evitar la incorporación de elementos que reduzcan el área útil para la cría.

Asimismo, el sistema deberá presentar un bajo consumo energético, permitiendo su operación en entornos donde no se dispone de acceso a fuentes de energía convencionales. En este sentido, se deberá garantizar una autonomía prolongada, reduciendo la necesidad de mantenimiento y recarga.

El sistema deberá ser robusto frente a las condiciones ambientales propias del entorno apícola, incluyendo la exposición a humedad, variaciones de temperatura, presencia de cera, miel y propóleo, así como condiciones climáticas adversas en el caso de los dispositivos ubicados en el exterior.

Por otro lado, se deberá asegurar la facilidad de instalación y operación del sistema, de manera que pueda ser utilizado por apicultores sin requerir conocimientos técnicos avanzados. Esto implica que la solución debe integrarse de forma sencilla en colmenas existentes y no dificultar su manipulación.

Finalmente, el sistema deberá ser escalable, permitiendo su adaptación a colmenas con distinta cantidad de marcos y facilitando la incorporación de nuevos dispositivos sin modificaciones significativas en la arquitectura.

2.3. Arquitectura general del sistema

Requerimientos de comunicación

Los requerimientos de comunicación definen las condiciones bajo las cuales debe realizarse la transmisión de datos tanto dentro de la colmena como hacia el sistema externo.

En lo que respecta a la comunicación interna, el sistema deberá permitir la lectura inalámbrica de los dispositivos de sensado ubicados en los marcos desde un punto externo a la colmena. En particular, se requiere que la distancia de lectura sea suficiente para permitir la interacción desde el lateral de la colmena, evitando la necesidad de modificaciones en la estructura para acceder a las medidas de los sensores.

Asimismo, el sistema deberá ser capaz de operar independientemente de la orientación de los marcos, considerando que estos pueden ser rotados o intercambiados durante las tareas de manejo. Esto implica que la comunicación debe ser robusta frente a variaciones en la distribución entre los dispositivos.

Por otro lado, se deberá garantizar la comunicación con múltiples dispositivos de sensado dentro de una misma colmena, permitiendo la lectura secuencial de todos los puntos de medición disponibles.

En cuanto a la comunicación externa, el sistema deberá ser capaz de transmitir los datos hacia una infraestructura remota desde ubicaciones rurales, donde la disponibilidad de conectividad puede ser limitada. Para ello, se requiere el uso de tecnologías de comunicación inalámbrica de largo alcance y bajo consumo, que permitan el envío periódico de información con un costo energético reducido.

Finalmente, el sistema deberá ser resiliente a interrupciones en la conectividad, garantizando la integridad de los datos mediante mecanismos de almacenamiento local y reintentos de transmisión.

2.3. Arquitectura general del sistema

El sistema se compone de un conjunto de Marcos HiveCare ubicados dentro de la cámara de cría, encargados de realizar el sensado de temperatura en distintos puntos, y de un Lector HiveCare instalado en el exterior de la colmena dentro de una caja estanca.

Los Marcos HiveCare se comunican de manera inalámbrica con el Lector HiveCare mediante tecnología *NFC (Near Field Communication)*, permitiendo la transferencia de datos sin necesidad de conexiones físicas. Esta disposición posibilita la adquisición inalámbrica de información sin interferir significativamente con la estructura ni con la operación habitual de la colmena.

El Lector HiveCare, ubicado en el exterior de la colmena, actúa como nodo central del sistema, encargándose de recopilar la información proveniente de los distintos marcos. Una vez recolectados, los datos son transmitidos hacia una infraestructura remota mediante tecnología *NB-IoT (Narrowband Internet of Things)*, permitiendo su almacenamiento y procesamiento.

Finalmente, la información es puesta a disposición del usuario a través de una *GUI (Graphical User Interface)*, la cual accede a los datos almacenados en la nube

Capítulo 2. Diseño general

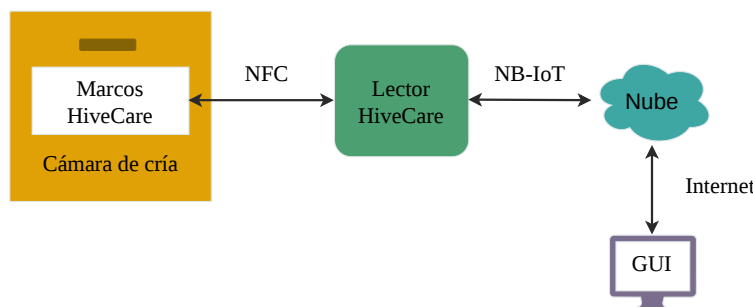


Figura 2.2: Diagrama de bloques del Sistema HiveCare. Se observa en color mostaza la cámara de cría la cual contiene los diversos Marcos HiveCare. Éstos se comunicarán con el Lector HiveCare mediante NFC, poniéndole a disposición los datos sensados. Una vez recolectados los datos el Lector HiveCare los transmitirá a la nube mediante NB-IoT, haciéndolos accesibles por el usuario mediante la GUI. El usuario a través de la GUI podrá establecer parámetros de configuración del sistema como el período de sensado. Esta información es transmitida hacia el Lector HiveCare.

y permite su visualización y análisis. El usuario tendrá a disposición ciertos parámetros configurables que le permitirán ajustar el funcionamiento del sistema a sus necesidades. Entre estos parámetros se destaca el período de lectura de datos.

En la Figura 2.2 se presenta el diagrama de bloques del Sistema HiveCare, el cual se constituye por el conjunto de Colmenas HiveCare, la infraestructura remota y la interfaz gráfica. En la misma se ilustran los principales componentes del sistema y las comunicaciones involucradas en la transmisión de datos desde la cámara de cría hasta la interfaz de usuario.

Aunque la unidad básica del Sistema HiveCare consiste en una colmena con sus Marcos HiveCare y un Lector HiveCare, el sistema fue diseñado para operar en red. Como se muestra en la Figura 2.3, cada Lector HiveCare envía los datos recolectados a la infraestructura remota y lo hace mediante un identificador único. Esto permite que múltiples colmenas y apicultores compartan la misma infraestructura de forma independiente, almacenando información de distintos apiarios sin que los datos de un usuario sean accesibles para otro, garantizando así privacidad y escalabilidad.

2.4. Flujo de operación del sistema

El funcionamiento del Sistema HiveCare se basa en la adquisición de datos de temperatura dentro de la cámara de cría, su recolección mediante un dispositivo central y su posterior transmisión hacia una infraestructura remota para su visualización y análisis.

En la Figura 2.4 se presenta un esquema general del flujo de operación del Sistema HiveCare para una colmena, donde se ilustran las distintas etapas involucradas en la adquisición, procesamiento y visualización de los datos de temperatura. El diagrama permite identificar los principales componentes del sistema y la secuencia

2.4. Flujo de operación del sistema

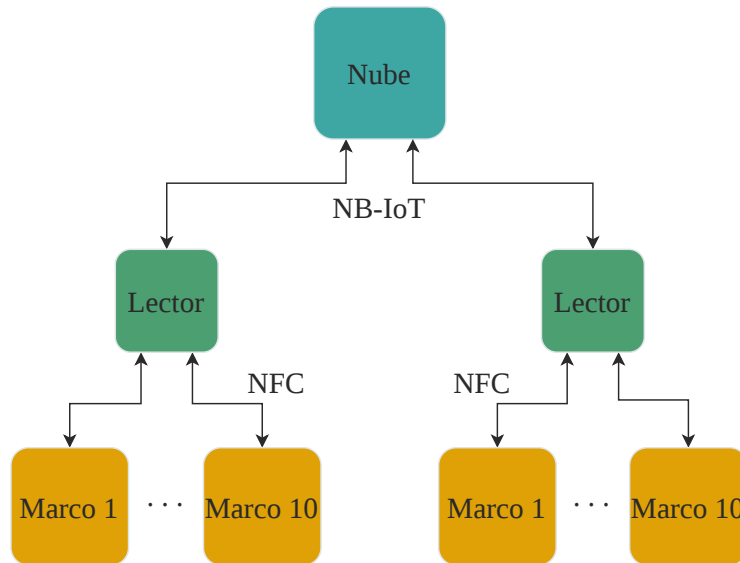


Figura 2.3: Diagrama de red del Sistema HiveCare. Se ilustra la arquitectura multicolumna del sistema, donde cada Lector HiveCare recolecta los datos de sus Marcos HiveCare mediante NFC y los transmite de forma independiente hacia la infraestructura remota.

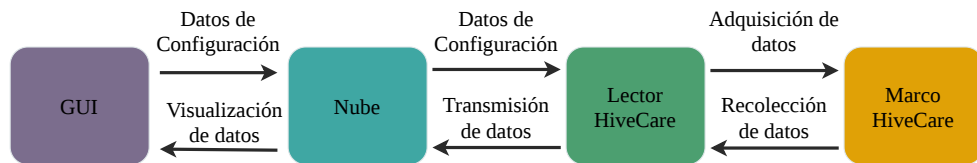


Figura 2.4: Flujo de operación del Sistema HiveCare. Se muestran las etapas de adquisición, recolección, transmisión y visualización de datos, junto con los componentes involucrados en cada una de ellas: Marco HiveCare, Lector HiveCare, nube e interfaz gráfica de usuario.

de interacción entre ellos, desde la medición en los Marcos HiveCare hasta la presentación de la información en la interfaz de usuario. A continuación, se describe en detalle cada una de las etapas del flujo representado.

Adquisición de datos

El proceso de adquisición de datos comienza cuando el Lector HiveCare inicia una solicitud de lectura hacia los Marcos HiveCare. A partir de esta interacción, cada marco se energiza y ejecuta la medición de temperatura en los distintos puntos de sensado disponibles. Al energizarse, el tag NFC del marco consulta a los sensores de temperatura, obteniendo las mediciones correspondientes. Estos valores son posteriormente almacenados de forma temporal dentro del propio tag, quedando disponibles para su lectura por parte del lector.

Una vez que los datos han sido recabados por cada Marco HiveCare presente dentro del cajón, el Lector HiveCare procede a realizar la lectura de la información

Capítulo 2. Diseño general

previamente almacenada en la memoria interna del tag NFC. Este proceso se repite de forma secuencial para todos los marcos presentes en la cámara de cría. Durante esta etapa, el lector organiza los datos recolectados, asociándolos a cada marco correspondiente y preparándolos para su posterior transmisión hacia el servidor.

Transmisión de datos

Luego de completar la recolección de información, el Lector HiveCare envía los datos hacia una infraestructura remota mediante una red de comunicación inalámbrica de largo alcance (NB-IoT). La información transmitida incluye tanto las mediciones de temperatura como datos adicionales de estado, permitiendo su almacenamiento y posterior análisis.

Visualización

Finalmente, los datos almacenados en la infraestructura remota son accedidos por la interfaz gráfica, la cual permite su visualización de forma clara e intuitiva. A través de esta herramienta, el usuario puede analizar la evolución temporal de las temperaturas, así como configurar parámetros del sistema según sus necesidades.

2.5. Diseño del sistema de sensado: Marco HiveCare

En esta sección se presenta el diseño general del Marco HiveCare, el cual constituye el elemento encargado del sensado de temperatura dentro de la cámara de cría. Se describen las decisiones de diseño adoptadas, considerando tanto las restricciones del entorno apícola como los requerimientos funcionales del sistema.

Objetivo del diseño

El objetivo del Marco HiveCare es permitir la medición de temperatura en múltiples puntos del interior de la colmena de forma no invasiva, sin afectar el comportamiento de las abejas ni interferir con la manipulación habitual de los marcos.

Para ello, el diseño debe integrarse en la estructura física del marco, minimizando el volumen ocupado y evitando la introducción de elementos que puedan alterar la dinámica de la colonia. Asimismo, se busca que el dispositivo opere sin necesidad de una fuente de energía propia, reduciendo la complejidad del sistema, eliminando tareas de mantenimiento asociadas y asegurando una mejor compatibilidad biológica con la colmena, evitando la introducción de sustancias potencialmente dañinas.

Arquitectura del Marco HiveCare

El Marco HiveCare se compone de un conjunto de sensores de temperatura distribuidos a lo largo del marco, un dispositivo de control encargado de gestionar las mediciones y un módulo de comunicación inalámbrica que permite la interacción con el Lector HiveCare.

El sistema se encuentra diseñado para operar sin baterías, activándose únicamente cuando es energizado desde el exterior. De esa forma, el marco permanece

2.5. Diseño del sistema de sensado: Marco HiveCare

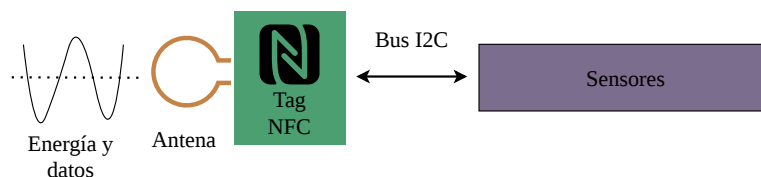


Figura 2.5: Diagrama conceptual del Marco HiveCare. Se muestran los sensores de temperatura, el módulo de control y comunicación (tag NFC), y la interfaz de acoplamiento con el Lector HiveCare, utilizada tanto para la transferencia de datos como de energía.

en un estado de reposo la mayor parte del tiempo, contribuyendo a minimizar el consumo energético global del sistema.

En la Figura 2.5 se presenta un diagrama conceptual del Marco HiveCare, donde se ilustran los componentes principales del sistema de sensado y su interconexión. Se puede observar el módulo de comunicación y control (tag NFC), así como la interfaz utilizada para la transferencia de energía y datos (antena).

Comunicación y alimentación

Dada la necesidad de alimentar el circuito del Marco HiveCare sin utilizar baterías, las tecnologías basadas en *RFID* (*Radio Frequency Identification*) representan una alternativa adecuada, ya que permiten energizar el sistema mediante el campo electromagnético generado por un lector ubicado en el exterior de la colmena. Por otra parte, deben evitarse frecuencias altamente susceptibles a la atenuación producida por los materiales presentes en el interior de la colmena, tales como madera, cera, miel y otros elementos con elevado contenido acuoso, como las propias abejas. En este contexto, el empleo de frecuencias relativamente bajas resulta más conveniente debido a su mayor robustez frente a dichas condiciones de propagación. Considerando además la amplia disponibilidad comercial de módulos y circuitos integrados compatibles, que simplifican la implementación del sistema, se seleccionó la tecnología NFC, que trabaja a una frecuencia de 13,56 MHz, como solución para la comunicación y transferencia de energía entre el Lector y los Marcos HiveCare.

Integración mecánica

Desde el punto de vista mecánico, el diseño del Marco HiveCare busca integrarse de forma transparente en la estructura del marco tradicional utilizado en apicultura. Para ello, los elementos de sensado se disponen de manera que no interfieran con el uso normal del marco ni con la actividad de las abejas. Además, previendo posibles cambios de orientación de los marcos dados por el trabajo habitual de manejo de la colmena por parte del apicultor, se mantiene un diseño simétrico en los puntos de sensado.

En particular, se procura minimizar la cantidad de material añadido y evitar la obstrucción de las celdas, asegurando que el área útil del marco se mantenga prácticamente inalterada. En la Figura 2.6 se puede ver de forma esquemática los distintos componentes del marco y como éstos se integran de la forma menos invasiva posible. Asimismo, se consideran las condiciones ambientales presentes en

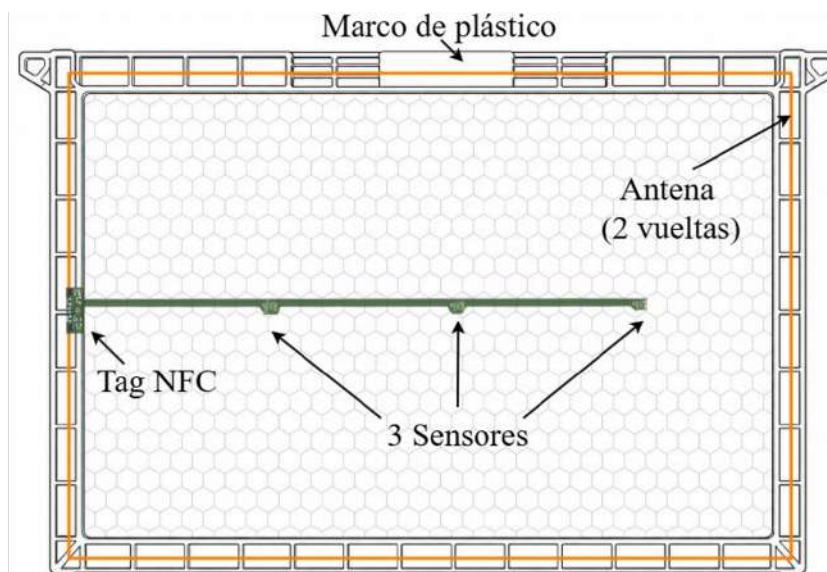


Figura 2.6: Esquema del Marco HiveCare. Generado con asistencia de ChatGPT (OpenAI).

la colmena, garantizando la resistencia del sistema frente a humedad, temperatura y acumulación de sustancias como cera y propóleo. Como solución, se recubre el circuito con la misma cera utilizada como base de construcción para las abejas.

Consideraciones de fabricación

Tanto para el Marco HiveCare como para el Lector HiveCare, el diseño contempla aspectos vinculados a la fabricación y replicabilidad del sistema. Se procura que los dispositivos puedan ser construidos utilizando procesos y materiales accesibles, facilitando su producción y eventual escalabilidad. Además, se consideran criterios de compatibilidad con normativas ambientales y de seguridad, promoviendo el uso de componentes que minimicen el impacto ambiental del sistema.

2.6. Diseño del sistema lector: Lector HiveCare

En esta sección se presenta el diseño general del Lector HiveCare, el cual constituye el nodo central de la Colmena HiveCare. Este dispositivo es responsable de la adquisición de datos provenientes de los Marcos HiveCare, la gestión del funcionamiento global del sistema y la transmisión de la información hacia la infraestructura remota.

Objetivo del diseño

El objetivo del Lector HiveCare es proporcionar una interfaz entre el entorno interno de la colmena y los sistemas externos de almacenamiento y visualización de datos. Para ello, debe ser capaz de comunicarse con múltiples dispositivos de sensado, recolectar la información generada y transmitirla de manera confiable.

2.6. Diseño del sistema lector: Lector HiveCare

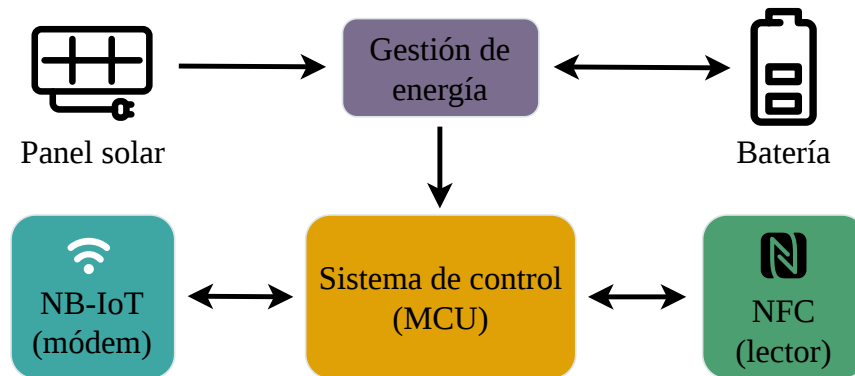


Figura 2.7: Diagrama de bloques del Lector HiveCare. Se muestran los subsistemas principales, incluyendo la fuente de energía, el sistema de control y los módulos de comunicación utilizados para la interacción con los Marcos HiveCare y la transmisión de datos hacia la infraestructura remota.

Adicionalmente, el diseño debe garantizar una operación autónoma en entornos rurales, donde el acceso a fuentes de energía y conectividad puede ser limitado. En este sentido, se prioriza el bajo consumo energético, la robustez del sistema y la mínima necesidad de intervención por parte del usuario.

Arquitectura del Lector HiveCare

En la Figura 2.7 se presenta un diagrama de bloques del Lector HiveCare, donde se ilustran los principales subsistemas que lo componen y sus interacciones.

El Lector HiveCare se compone de cuatro bloques funcionales principales: un sistema de gestión energética, un sistema de control, un módulo de comunicación de corto alcance (NFC) y un módulo de comunicación de largo alcance (NB-IoT) para la conexión con la infraestructura remota. El sistema de gestión energética es el encargado de administrar la energía proveniente de las fuentes de alimentación del dispositivo, regulando su distribución hacia los distintos módulos y permitiendo la operación autónoma del sistema. Por su parte, el sistema de control es el encargado de coordinar las distintas operaciones del dispositivo, incluyendo la gestión de las lecturas, el almacenamiento temporal de datos y la planificación de las transmisiones. Por otro lado, el módulo de comunicación de corto alcance permite la interacción con los Marcos HiveCare, facilitando tanto la adquisición de datos como la provisión de energía a los mismos. Finalmente, el módulo de comunicación de largo alcance permite la transmisión de la información hacia una infraestructura remota, posibilitando el acceso a los datos desde ubicaciones externas al apiario. La elección de NB-IoT como tecnología de largo alcance se fundamenta en el requerimiento de cobertura en entornos rurales y su optimización para el envío de pequeñas cantidades de datos de forma periódica.

Estrategia de operación

El funcionamiento del Lector HiveCare se basa en la ejecución de ciclos perió-

Capítulo 2. Diseño general

dicos de lectura y transmisión. Durante cada ciclo, el dispositivo realiza la lectura de los Marcos HiveCare mediante el módulo de comunicación de corto alcance y posteriormente activa el módulo de comunicación de largo alcance para transmitir la información hacia la infraestructura remota. Entre ciclos de operación, el sistema permanece en un estado de bajo consumo, con el objetivo de maximizar la autonomía energética.

Gestión energética

Dado que el Lector HiveCare debe operar de manera autónoma durante períodos prolongados, la gestión energética constituye un aspecto central del diseño. En particular, se requiere un sistema capaz de almacenar energía y regular su distribución hacia los distintos módulos del dispositivo. El diseño contempla una batería, un panel solar, y un mecanismo que permita desenergizar los componentes no usados para optimizar el consumo, activando únicamente los módulos necesarios en cada etapa del ciclo de operación.

Integración y consideraciones ambientales

El Lector HiveCare se encuentra ubicado en el exterior de la colmena, por lo que debe soportar condiciones ambientales adversas, incluyendo exposición a lluvia y radiación solar. En consecuencia, el diseño debe contemplar aspectos como la protección mecánica del dispositivo y la resistencia a la humedad. Para solucionar esto, se protege todo el circuito dentro de una caja estanca IP65. Asimismo, se busca que el sistema sea fácilmente montable y desmontable, permitiendo su utilización en distintas colmenas sin afectar las tareas habituales del apicultor. Dentro de esto se contempla también el peso del dispositivo, tratando de ser de bajo peso para evitar complicaciones en la manipulación.

2.7. Diseño de interfaz de usuario

La interfaz gráfica de usuario constituye el punto de interacción entre el Sistema HiveCare y el apicultor, permitiendo el acceso a la información recolectada por el sistema y la configuración de sus parámetros de operación. Al mismo tiempo, la GUI está accesible remotamente sin necesidad de encontrarse físicamente en el apiario.

Objetivos del diseño

El objetivo de la interfaz es proporcionar una herramienta clara e intuitiva que permita al usuario visualizar y analizar los datos de temperatura de la cámara de cría, facilitando la interpretación del estado de la colmena y la detección de posibles anomalías. Asimismo, la interfaz debe permitir la gestión de múltiples colmenas y adaptarse a distintos escenarios de uso, considerando que un mismo apicultor puede supervisar varias colmenas, o que una colmena puede ser monitoreada por distintos usuarios.

Visualización de datos

La interfaz proporciona distintas representaciones de los datos de temperatura, con el objetivo de ofrecer múltiples niveles de análisis. Por un lado, se dispone de una visualización espacial de la colmena, donde se representan los marcos y las mediciones asociadas a cada uno de ellos. Esta representación permite al usuario identificar rápidamente la distribución térmica dentro de la cámara de cría. Adicionalmente, se incluye una vista superior simplificada de la colmena, donde se muestran las temperaturas internas y externas de forma resumida, facilitando una interpretación rápida del estado general. Por otro lado, la interfaz ofrece visualizaciones temporales de las mediciones, permitiendo analizar la evolución de la temperatura en cada punto de sensado a lo largo del tiempo. Estas gráficas resultan fundamentales para detectar tendencias, variaciones anómalas o eventos relevantes en la dinámica de la colmena. Las distintas vistas implementadas en la GUI y sus funcionalidades se describen en detalle en el Capítulo 8.

Gestión de colmenas y usuarios

El sistema permite la gestión de múltiples colmenas por parte de un mismo usuario, posibilitando el monitoreo simultáneo de diferentes unidades productivas. Cada colmena puede presentar configuraciones propias, tales como la cantidad de marcos monitoreados o la frecuencia de muestreo del sistema.

Asimismo, se contempla la posibilidad de compartir el acceso a las colmenas entre distintos usuarios, permitiendo la colaboración en la supervisión y gestión de las mismas. Esta funcionalidad resulta especialmente útil en escenarios donde el responsable principal no puede realizar el seguimiento de forma directa.

Configuración del sistema

La interfaz permite al usuario modificar ciertos parámetros operativos del sistema, en particular la frecuencia de muestreo de las mediciones de temperatura. Esta capacidad de configuración permite adaptar el comportamiento del sistema a distintas necesidades, balanceando el nivel de detalle de la información con el consumo energético. Otro parámetro de configuración es la cantidad de Marcos HiveCare que el apicultor dispone en la colmena. Este parámetro resulta útil en la reducción de consumo energético al ahorrarle al lector la búsqueda de marcos inexistentes.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 3

Near-field communication (NFC)

La comunicación de campo cercano –*NFC (Near Field Communication)*– es una tecnología que provee conectividad inalámbrica de corto alcance, permitiendo interacciones bidireccionales entre dispositivos electrónicos. Es promovida y mantenida por el NFC Forum [33], una asociación industrial que busca incrementar el uso de esta tecnología en diferentes productos comerciales y garantizar la interoperabilidad entre dispositivos y servicios mediante su estandarización.

La tecnología NFC se encuentra englobada dentro de *RFID (Radio Frequency Identification)*, con un conjunto específico de estándares que aseguran, entre otras cosas, el entorno de operación, el formato de los datos, las tasas de transferencia y la modulación. Entre los estándares se encuentran ISO/IEC 15693, ISO/IEC 14443, ISO/IEC 18092, entre otros. En particular, fue utilizada para este proyecto la ISO/IEC 15693.

Para su funcionamiento, NFC opera con campos electromagnéticos en una frecuencia de 13,56 MHz, correspondiente a una banda no licenciada del espectro radioeléctrico. Un dispositivo NFC puede suministrar energía a otro mediante el campo electromagnético que genera, lo que permite que algunos funcionen de forma pasiva, es decir, sin necesidad de una batería propia. Esto los hace duraderos y de tamaño reducido, encontrándose en formas desde etiquetas (tags), adhesivos, tarjetas o controles remotos.

La tecnología define dos tipos de dispositivos, el iniciador (o *initiator* en inglés) y el objetivo (o *target*). El iniciador, como su nombre lo dice, es el dispositivo encargado de iniciar la comunicación, y adicionalmente controla el intercambio de datos. Por otro lado, el dispositivo objetivo es aquel que responde a la solicitud, y acepta la comunicación del iniciador.

Este capítulo presenta los fundamentos teóricos y tecnológicos necesarios para comprender el funcionamiento de los sistemas NFC y RFID utilizados en el presente trabajo. En primer lugar, en la Sección 3.1, se introducen los conceptos generales de RFID, sus modos de operación y la clasificación de los distintos tipos de tags. Posteriormente, se describen los mecanismos de comunicación y transferencia de energía en sistemas *near-field* y *far-field*, junto con las diferencias entre tecnologías *LF (Low Frequency)*, *HF (High Frequency)* y *UHF (Ultra High Frequency)*. A continuación, en la Sección 3.2, se desarrollan los principales estándares y pro-

Capítulo 3. Near-field communication (NFC)

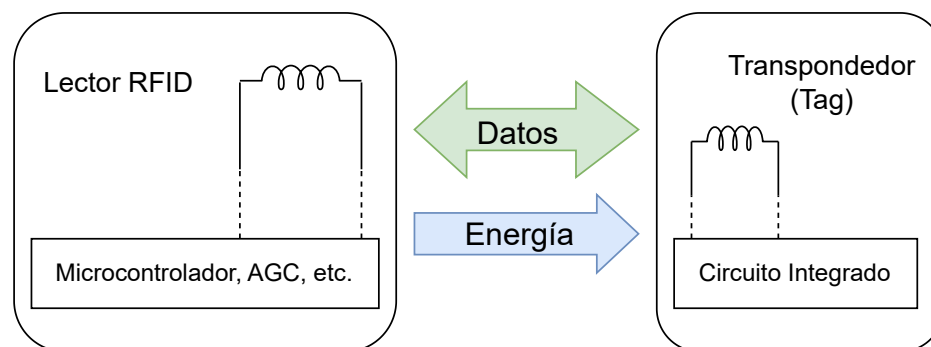


Figura 3.1: Diagrama de RFID. Se observan los componentes principales de un sistema RFID (lector y tag), con su respectiva estructura interna. Es posible visualizar también el flujo de comunicación, siendo este bidireccional, así como que la energía es entregada por el lector hacia el tag.

tos asociados a NFC, incluyendo las normas ISO/IEC 14443, ISO/IEC 15693 e ISO/IEC 18092, así como las técnicas de modulación digital utilizadas en estos sistemas. También se analizan las condiciones de operación, alcances típicos y características relevantes de tags y lectores NFC. Finalmente, en la Sección 3.3 se presenta un análisis de distintos dispositivos comerciales considerados para el desarrollo del sistema propuesto, comparando sus características técnicas, capacidades de comunicación y costos.

3.1. RFID

La Identificación por Radiofrecuencia (RFID, por sus siglas en inglés), es una forma de comunicación inalámbrica que utiliza ondas de radio para identificar y/o realizar el seguimiento de objetos, animales o personas. Un sistema RFID está constituido por dos componentes: un transpondedor (ubicado en el objeto a ser identificado) y un lector, que además puede tener la capacidad de escritura. Si bien hay diferencia en la jerga entre RFID e NFC, se puede pensar al iniciador de NFC como el lector de RFID, y al *target* de NFC como el transpondedor (o tag) de RFID. Se seguirá con la notación de RFID en el resto del documento por ser la más general. Aún así, se aclara que se utilizará NFC para éste proyecto.

En RFID, un lector está constituido por una antena, y componentes para generar la frecuencia de la portadora, codificar los datos en la modulación, y hacer un control de ganancia –AGC (*Automatic Gain Control*)–. El tag es más simple, estando constituido por su antena, un circuito integrado o chip que puede ir desde una simple memoria hasta la inclusión de un microcontrolador y sensores. Se omitirá la descripción de tags “chipless”, es decir sin chip, dado que no son relevantes para este trabajo.

En la Figura 3.1 se observa un diagrama de bloques de un sistema RFID, donde es posible visualizar los componentes del lector y del tag. El lector no solo

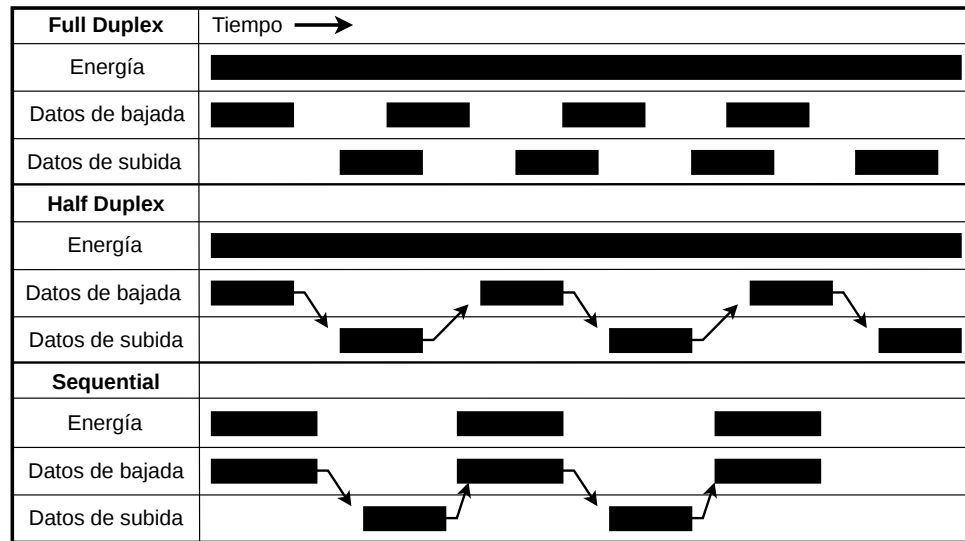


Figura 3.2: Diagrama de FDX, HDX y SEQ. Se puede observar los tres tipos de comunicación temporalmente. Los datos de bajada corresponden a los transmitidos desde el lector al tag y los datos de subida a los transmitidos en la dirección opuesta. La energía corresponde a la entregada a través del campo electromagnético por el lector. Para la comunicación tanto *Full* como *Half Duplex* la energía que el lector provee al tag se mantiene encendida durante toda la comunicación. La diferencia entre estos es que, en el primero, los datos de subida y bajada pueden suceder a la vez, no así en el segundo. En el caso secuencial, se observa que el campo es encendido únicamente mientras el lector transmite datos, respondiendo el tag mientras el campo está apagado. Reproducido de [34].

intercambia datos con el tag, sino que además le suministra la energía necesaria para que éste pueda responder con los datos solicitados. No obstante, hay tags con fuente de alimentación propia que le permiten generar su propio campo para la comunicación. Asimismo, ciertos tags pueden utilizar esta energía para alimentar sensores, microcontroladores u otros dispositivos.

Los sistemas RFID pueden clasificarse, según su modo de operación, en sistemas *FDX* (*Full Duplex*), en sistemas *HDX* (*Half Duplex*) o en *SEQ* (*Sequential*). En este proyecto, se utilizó *half duplex*, debido a que es el que acepta la norma ISO/IEC 15693. En sistemas *full* y *half duplex*, la respuesta del tag es transmitida en simultáneo con el campo de *RF* (*radio frequency*) generado por el lector. Por el contrario, los sistemas secuenciales emplean un sistema donde el lector apaga su campo de *RF* a intervalos regulares de tiempo. Estos huecos donde el lector apaga su campo de *RF* son utilizados por el tag para enviar los datos. En la Figura 3.2 se ilustran estos mecanismos para comunicación RFID, donde los datos de bajada corresponden a los transmitidos desde el lector al tag y los datos de subida a los transmitidos en la dirección opuesta, mientras que la energía corresponde a la entregada a través del campo electromagnético por el lector.

Capítulo 3. Near-field communication (NFC)

3.1.1. Clasificación de tags RFID

Los tags RFID se pueden clasificar en tres tipos, según su forma de alimentación energética: tags pasivos, tags activos y tags semi-pasivos. En Los tags activos poseen baterías para alimentar sus circuitos internos, sensores, entre otros, y generar su propio campo electromagnético. Por otro lado, los tags pasivos no poseen fuentes de alimentación propias, teniendo que cosechar energía de la radiación electromagnética emitida por la antena del lector para alimentar su circuito interno y realizar sus operaciones. Cabe destacar que un tag pasivo puede contener métodos para realizar un almacenamiento temporal de la energía recolectada del lector. Los tags activos, entonces, poseen una mayor distancia de comunicación con sus respectivos lectores debido a que no necesitan extraer energía del campo electromagnético proveniente del lector. Es por esto que pueden modular la señal saliente con campos que superan los mínimos dados por las normas ISO/IEC (ver Sección 3.2.1) con distancias mayores a sus contrapartes (los tags pasivos).

En algunos textos, como [35], se suele definir una tercera clasificación, los tags semi-pasivos. Los cuales se definen como tags que poseen fuentes de alimentación internas, pero que no son suficientes para crear un campo electromagnético por sí solos y responder al lector, por lo que aún necesitan extraer del campo electromagnético del lector energía para modular la señal saliente. Para simplificar, se tomarán en este texto los tags semi-pasivos como una sub-categoría de tags activos, dado que poseen baterías (o algún tipo de fuente de alimentación propia).

Por ser de interés para el presente proyecto evitar el uso de baterías, debido a que se trabaja en contacto con seres vivos, se decide hacer un énfasis en los tags pasivos. Para alimentar de forma inalámbrica a un tag pasivo, existen dos métodos ampliamente utilizados [34]: inducción magnética, y captura de ondas electromagnéticas. El método de inducción magnética (o acople inductivo) se utiliza en cortas distancias, lo que se conoce como *near-field-based RFID*, y la captura de ondas electromagnéticas se emplea a mayores distancias y se conoce como *far-field-based RFID*. Se puede discriminar entre el *far-field* y el *near-field* dependiendo de la distancia. Un criterio que se puede utilizar como regla para el caso de antenas bobinadas es que el *near-field* va desde la antena del lector hasta $\frac{\lambda}{2\pi}$, siendo λ la longitud de onda de la portadora y el *far-field* desde dónde termina el *near-field* hasta el infinito [34].

3.1.2. Near-field-based RFID

Un lector RFID hace circular corriente alterna a través de una bobina, generando un campo magnético alterno en su proximidad. Si un tag con una bobina entra en dicho campo magnético, aparece en los bornes de la bobina un voltaje inducido, según la ley de Maxwell-Faraday [34]. Este voltaje será rectificado por el tag para la carga de un capacitor que utilizará como fuente de energía hacia el chip. El tag luego utiliza *load-modulation* para responder al lector. *Load-modulation* se basa en la codificación de datos según la carga que se aplica sobre el enlace. En el caso de un tag, cuando se encuentra inmerso en un campo magnético emitido por el lector, el chip del tag drena corriente de la bobina. Este drenaje de corriente se traduce

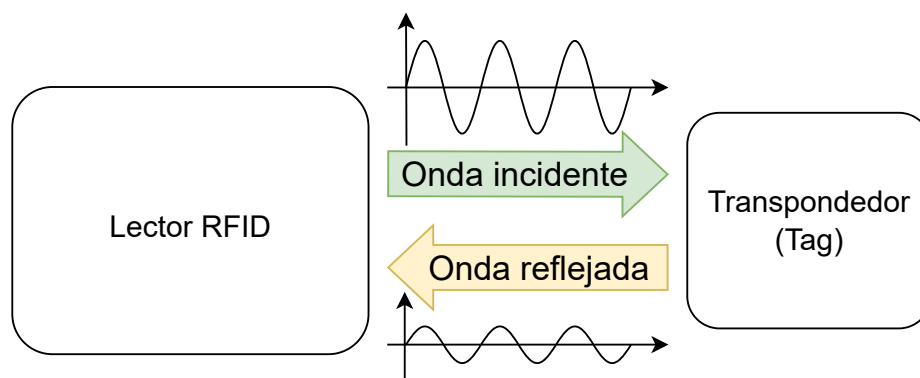


Figura 3.3: Diagrama de bloques de la comunicación bidireccional. Se puede observar que el lector emite una onda hacia el tag que será luego reflejada por el mismo y receptionada por el lector.

en una generación de campo magnético en la bobina del tag, generando un cambio en el campo magnético total, que a su vez se refleja en un cambio en la intensidad de corriente que circula por la bobina del lector.

Esta lógica de comunicación posee algunas limitantes, como que la distancia del campo cercano decrece con el aumento de frecuencia a la que se trabaja ($d = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{c}{2\pi f}$, siendo c la constante de velocidad de la luz en el vacío, f la frecuencia de operación y d la distancia desde la antena, siendo $d \approx 3,5$ m en NFC). Además, se encuentra la limitante de la energía disponible hacia el tag, la cual disminuye en una razón de $1/x^3$. Siendo x la distancia entre el lector y el tag.

3.1.3. Far-field-based RFID

Far-field based RFID es principalmente utilizada en UHF (ver Sección 3.1.4). En far-field se utiliza una técnica denominada “Back-Scattering”, que codifica la información mediante la modulación de las ondas electromagnéticas reflejadas. Para ello, el chip del tag modifica dinámicamente la impedancia de carga vista por la antena, alterando el coeficiente de reflexión y produciendo variaciones en la amplitud y fase de la onda reflejada. De esta manera, el lector puede detectar dichas variaciones y recuperar la información transmitida por el tag. En la Figura 3.3 se puede observar las ondas incidentes y reflejadas, notándose una menor amplitud en estas últimas.

En este caso, una de las principales limitantes es la disminución de la energía de la onda con la distancia. La energía disminuye en un factor cuadrático con la distancia, y dado que debe recorrer la distancia dos veces (una de ida y otra de vuelta), la energía total disminuye como $\frac{1}{x^4}$. Se deben tener en cuenta además otras variables de diseño como las ganancias de las antenas y la potencia transmitida.

Capítulo 3. Near-field communication (NFC)

Tabla 3.1: Comparación de características de tags RFID según banda de frecuencia.

	LF	HF/NFC	UHF
Rango de frecuencia	30–300 kHz	3–30 MHz (13.56 MHz)	0.3–3 GHz
Método de acoplamiento	Inducción magnética	Inducción magnética	Propagación electromagnética
Método de respuesta	Load modulation o Secuencial	Load modulation	Back-scattering
Codificaciones típicas	Manchester, Bi-phase	Miller modificada, Manchester	PIE, FM0, Miller
Alcance típico	Centímetros	5–10 cm (NFC/PICC), hasta ~1 m (ISO/IEC 15693)	Varios metros
Normas comunes	ISO/IEC 11784, 11785	ISO/IEC 14443, 15693, 18092	EPC Gen2, ISO/IEC 18000-63
Tecnologías y ejemplos de uso	Caravanas de ganado e identificación animal	Tarjetas STM, tarjetas MIFARE, control de acceso a edificios, pagos NFC y bibliotecas	Tags de peajes, logística, trazabilidad e inventario en supermercados y tiendas de ropa

3.1.4. Diferencias entre RFID LF, HF y UHF

Una vez descritas las formas de energizar el tag y las técnicas que éste tiene para responder al lector, se puede hacer una breve comparación de las distintas características que tiene el tag en frecuencia, separando en los distintos grupos: *Low Frequency* (LF), *High Frequency* (HF) y *Ultra High Frequency* (UHF). Un resumen de esta comparación puede verse en la Tabla 3.1.

Low Frequency, es la banda de frecuencia que se encuentra entre 30 - 300 kHz. Los tags que trabajan en esta banda de frecuencia se energizan por inducción, y responden al lector utilizando modulación por carga (load modulation) o respuesta secuencial. La distancia a la que se puede llegar a leer un tag que opere en estas frecuencias es de unas decenas de centímetros. Esta distancia depende en gran parte del tamaño de la antena, la cual suele tener un núcleo de ferrita o aire, pero suele ser relativamente pequeña (2 - 10 cm de diámetro).

High Frequency es la banda de frecuencia que se encuentra entre 3 - 30 MHz. En particular, se encuentra la frecuencia de 13,56 MHz utilizada por el estándar NFC. Los tags que operen en esta frecuencia también se energizan por inducción,

3.2. Fundamentos técnicos de NFC

y responden al lector utilizando modulación por carga. La distancia a la que se pueden leer estos tags está entre unos pocos centímetros y algo más de un metro. Nuevamente, esto depende en gran parte del tamaño de la antena. El diseño de la misma es plana, en espiras circulares o cuadradas sobre un sustrato. Estas antenas se pueden considerar de un tamaño más grande que las de LF (entre 3 - 10 cm de diámetro).

Ultra *High Frequency* corresponde a la banda de frecuencia que se encuentra en el rango 0,3 - 3 GHz. Los tags que operan en esta banda de frecuencia utilizan para energizarse el método de captura electromagnético, y para responder al lector, la técnica de “Back-Scattering”. La distancia a la que se pueden llegar a leer estos tags es de varios metros. Para este rango de frecuencias se utilizan generalmente antenas de tipo dipolo de tamaños que van desde los 2,5 - 25 cm.

En este proyecto se utiliza el estándar de NFC el cual trabaja a 13,56 MHz, por lo que banda de trabajo es *High Frequency*.

3.2. Fundamentos técnicos de NFC

3.2.1. Protocolos y estándares

Como fue mencionado previamente, el protocolo NFC está estandarizado por el NFC Forum y por diversas normas ISO/IEC. Dentro de estas normas, resultan de interés la ISO/IEC 14443 e ISO/IEC 15693, debido a que en ellas se estandariza lo relativo a distancias. Se recuerda al lector que se utiliza la ISO/IEC 15693 para este proyecto.

La norma ISO/IEC 15693-1 define las denominadas *VICC* (*Vicinity Integrated Circuit Card*) y sus correspondientes lectores *VCD* (*Vicinity Coupling Devices*). Esta familia de normas distingue a los sistemas de vecindad de los sistemas de proximidad definidos en la ISO/IEC 14443, donde se utilizan las denominaciones *PICC* (*Passive Integrated Circuit Card*) y *PCD* (*Proximity Coupling Device*). Mientras que los sistemas de proximidad operan típicamente a distancias de hasta algunos centímetros, los sistemas de vecindad permiten alcances mayores, del orden de hasta 1 m, dependiendo del diseño de las antenas y de las condiciones de operación [36]. Los dispositivos definidos bajo ISO/IEC 15693 deben operar con campos magnéticos en el rango de 0,15 a 5 A/m rms.

Asimismo, la norma ISO/IEC 15693-2 establece que la modulación para la comunicación se debe dar por ASK (ver Sección 3.2.2) entre 100 % y 10 % - 30 % para el *downlink* (comunicación del lector hacia los tags) desde las VCD hasta las VICC. También define la forma de los pulsos de inicio de la trama (SOF, del inglés *Start Of Frame*) y la forma de los pulsos de fin de trama (EOF, del inglés *End Of Frame*). Al mismo tiempo, establece cómo deben enviarse los bits, que son enventanados y se envían de a pares (mediante codificación de Miller modificado). La norma ISO/IEC 14443-2 [37] maneja distancias menores que la ISO/IEC 15693.

Para solucionar la colisión de paquetes, la norma ISO/IEC 14443 otorga dos posibilidades, ambas basadas en el comportamiento donde el lector es el que inicia la comunicación y la colisión puede darse en la respuesta de múltiples tags. El primer

Capítulo 3. Near-field communication (NFC)

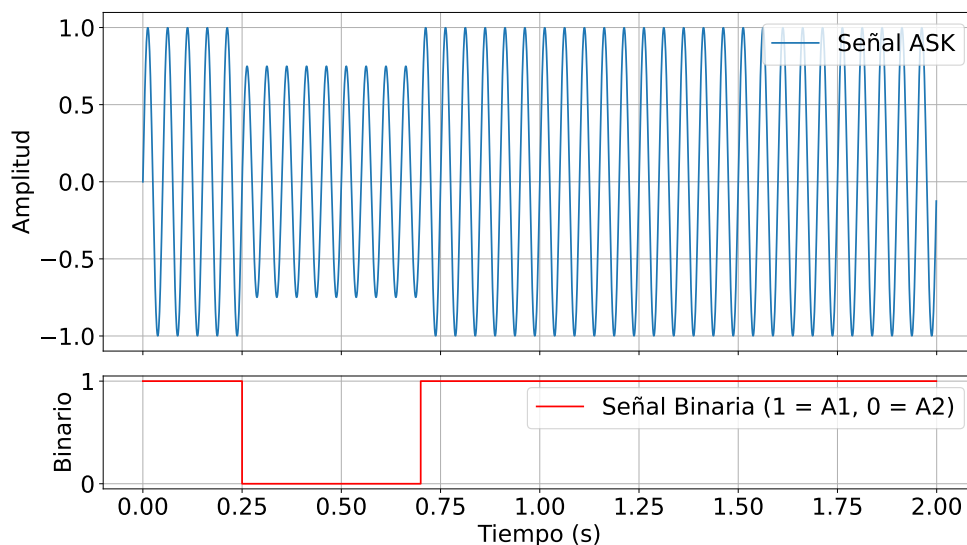


Figura 3.4: Señal de ASK evaluada en el dominio temporal, con una portadora de 20 Hz. El gráfico azul muestra la onda sinusoidal y el rojo la decodificación binaria que se obtiene de la onda. Se puede observar que a los 0,25 s la amplitud de la onda azul disminuye y es interpretada como un cero lógico (reflejado en el gráfico rojo). Al momento que la onda aumenta la amplitud nuevamente (a los 0,75 s), la señal binaria refleja un uno lógico.

método se basa en la detección de la colisión por el lector que posteriormente envía una serie de mensajes especiales a todos los tags y chequea los identificadores (NF-CID) de los tags bit a bit hasta obtener el identificador completo. Una vez el lector obtiene el NFCID de uno de los tags, le pide que no responda hasta que termine el proceso de anticolidión. El segundo método se basa en generar ventanas de tiempo (time slots) y los tags eligen de forma aleatoria una de las ventanas, reduciendo la probabilidad de otra colisión [38]. Adicionalmente, la norma ISO/IEC 15693 define un método de anticolidión híbrido entre los anteriores.

La norma ISO/IEC 18092 define los modos de comunicación para la interfaz y los protocolos de comunicación de campo cercano (Near Field Communication Interface and Protocols, NFCIP) utilizando dispositivos apareados inductivamente que operan con una portadora de frecuencia 13,56 MHz [39]. Más específicamente, estipula los esquemas de modulación, códigos, velocidad de transferencia, formatos de trama de radiofrecuencia, etc. El estándar ISO/IEC 18092 es el estándar fundamental de la tecnología NFC estipulando las bases de la capa física, su interfaz y la compatibilidad con los estándares RFID existentes como ISO/IEC 14443 y Felica.

Con respecto al NFC Forum, se definen varias categorías para los tags, asegurando la interoperabilidad de los mismos con los lectores NFC. Los tipos más comunes son: *NFC Forum Type 2*, *NFC Forum Type 4* y *NFC Forum Type 5*. Cada uno de estos tipos tiene como base una de las normas ISO/IEC mencionadas anteriormente. Esto implica que, dependiendo del tipo de tag, será la norma en la que está basado, y por ende, será la norma a la que el lector debe soportar para poder comunicarse correctamente con el tag.

3.2. Fundamentos técnicos de NFC

El *NFC Forum Type 2* indica que el tag está basado en la ISO/IEC 14443 A y están pensados para funciones simples. El *NFC Forum Type 4* se basa en la ISO/IEC 14443 A/B, estando pensados para aplicaciones que requieran seguridad como encriptación de datos y soporte de ciertos métodos de autenticación. Finalmente, el *NFC Forum Type 5* tiene como base la ISO/IEC 15693, permitiendo el uso con lectores de vecindad, pensado para aplicaciones que requieran mayores distancias de lectura.

3.2.2. Técnicas de modulación digital

En NFC se suelen utilizar las técnicas de modulación ASK (*Amplitude Shift Keying*), FSK (*Frequency Shift Keying*) o PSK (*Phase Shift Keying*). La modulación por desplazamiento de amplitud (ASK) es un tipo de modulación digital que muestra datos digitales como la variación en la amplitud en la forma de onda de una portadora, como puede observarse en la Figura 3.4. La variación en la amplitud de la forma de onda, suele representarse con un porcentaje de la amplitud total, por ejemplo, una señal ASK de 10 % implica que un símbolo se representa con la amplitud A de la onda, mientras que otro símbolo se representa con un $0,9 \cdot A$.

La modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) codifica los datos digitales en la variación de frecuencia de una portadora. Para el caso específico de BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) un cero lógico se representa como una frecuencia f_a y un uno lógico mediante una frecuencia f_b . En la Figura 3.5 se puede observar una señal FSK, donde luego de 0,25 s se nota el cambio de frecuencia de la señal del gráfico superior, mientras que en el gráfico inferior se observa que el significado de este cambio de frecuencia es el cambio desde un uno lógico a un cero lógico.

La modulación por desplazamiento de fase (PSK) es otro tipo de modulación digital donde los datos digitales se codifican en la variación de la fase de una portadora. En la Figura 3.6 se puede observar, en el cambio del uno lógico al cero lógico de la señal del gráfico inferior, cómo la señal en el gráfico superior cambia su fase por 180° .

Dado la tecnología que se usa para este proyecto es *NFC Forum Type 5* (ISO/IEC 15693) la técnica de modulación que corresponde utilizar es ASK.

3.2.3. Alcances y condiciones de operación

En la literatura es posible encontrar diversos rangos reportados para el estándar NFC. Esto es debido a que se suele dejar implícito el modo de operación y el estándar utilizado. En modo pasivo, los rangos dependen del estándar empleado: hasta 10 cm para ISO/IEC 14443 (Proximity) y hasta 20 cm para ISO/IEC 15693 (Vicinity) [35]. Para modo activo, donde ambos dispositivos generan campo RF, se reportan distancias de hasta 1,5 m [40].

Se han reportado diferentes estrategias para aumentar la distancia entre el lector y el sensor por ejemplo utilizando los repetidores intermedios (*Intermediate Relay*, IR). Estos son sistemas inductivo-resistivo-capacitivo (RLC) colocados entre

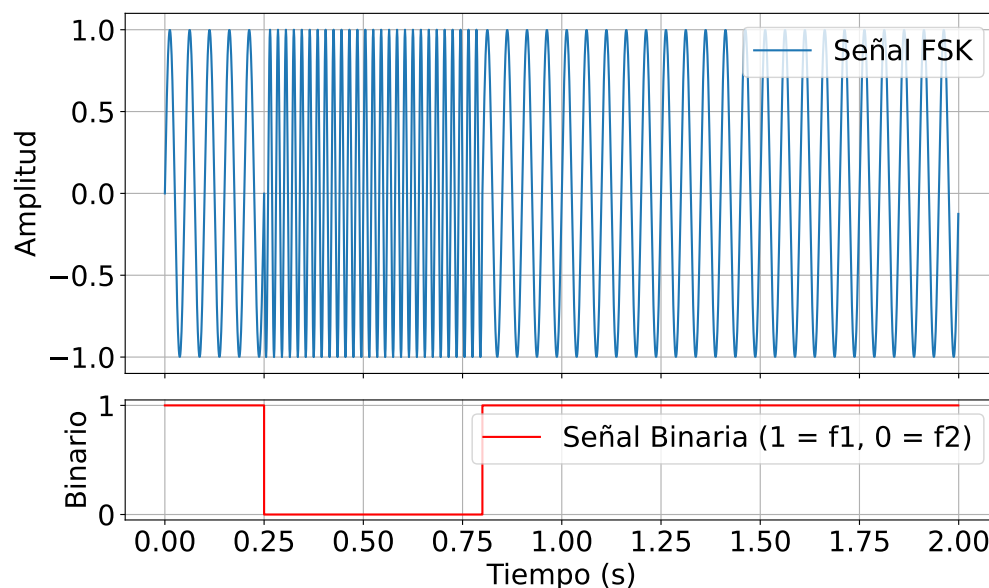


Figura 3.5: Señal de FSK evaluada en el dominio temporal, con portadoras de 20 Hz y de 60 Hz. El gráfico azul muestra la onda sinusoidal y el rojo la decodificación binaria que se obtiene de la onda. Se puede observar que a los 0,25s la onda sinusoidal aumenta su frecuencia (y se produce un desfase producto de este cambio de frecuencia), lo que pasa a interpretarse como un cero lógico por la señal binaria hasta el momento que se vuelve a la frecuencia original, interpretándose como un uno lógico.

el lector y el tag para repetir la señal y configurar una etapa de amplificación que permite lograr mayores distancias [41]. En la Figura 3.7 puede observarse un esquema de un sistema RFID con un IR.

3.2.4. Tags NFC

Existen diversas características que determinan la adecuación de un tag RFID para aplicaciones específicas, además de la clasificación presentada en la Sección 3.1.1 (tags pasivos, activos y semi-activos). Estas características abarcan tanto aspectos físicos como funcionales.

Una primera característica es la capacidad de memoria. Los tags pasivos pueden ir desde implementaciones muy simples, que almacenan un identificador único de unos pocos bytes, hasta dispositivos con varios kilobytes disponibles para datos de usuario, configuraciones o información de aplicación.

Otra característica clave es el nivel de seguridad. Algunos tags permiten el acceso libre a toda su memoria, mientras que otros implementan contraseñas, autenticación o cifrado de datos para restringir la lectura y/o escritura. Estos mecanismos resultan esenciales en aplicaciones de autenticación, control de acceso o protección de información sensible, y pueden incluir configuraciones para limitar permanentemente la escritura en ciertas áreas de memoria.

Algunos tags pasivos, denominados “tags dinámicos”, incorporan interfaces adi-

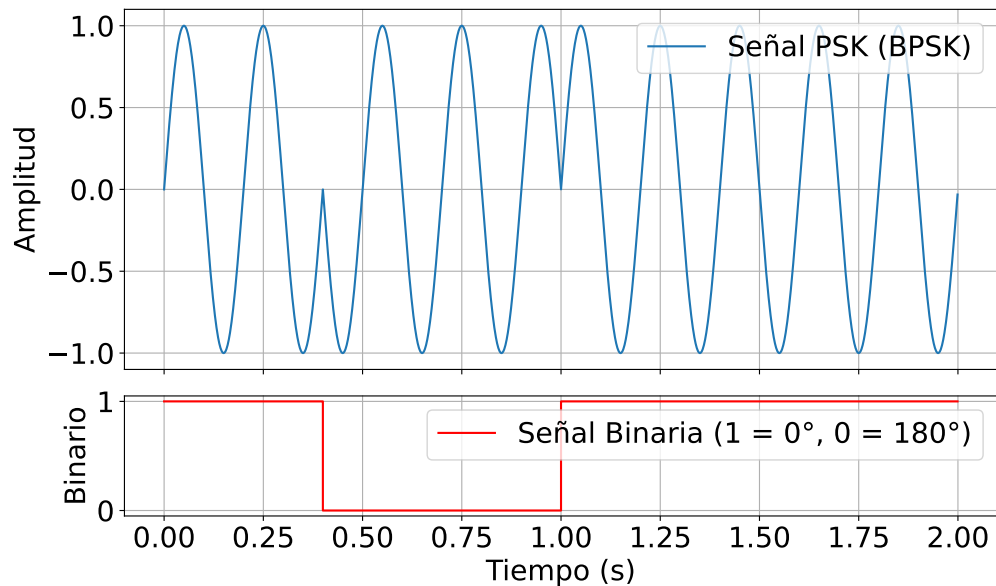


Figura 3.6: Señal de PSK evaluada en el dominio temporal, con una portadora de 5 Hz. El gráfico azul muestra la onda sinusoidal y el rojo la decodificación binaria que se obtiene de la onda. Se puede observar, entre los 0,25 y los 0,5 s cómo la fase de la señal azul cambia 180°, lo que se refleja en un cero lógico en la señal binaria. Este nivel se mantiene hasta que se vuelve a producir un desfase de la señal en el tiempo 1 s.

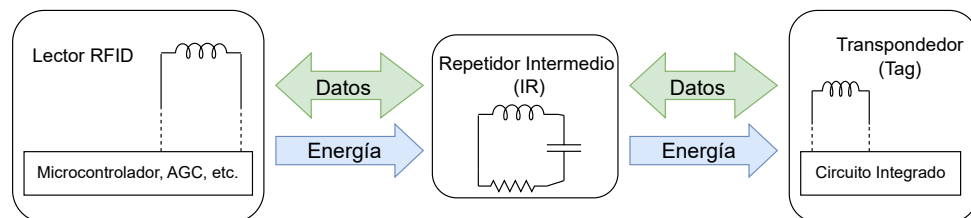


Figura 3.7: Diagrama de bloques de la comunicación con un IR. Se puede observar aquí, el flujo tanto de los datos como de la energía. Siendo la energía emitida por el lector y extendida espacialmente por el repetidor.

cionales, como *I²C* (*Inter-Integrated Circuit*), *SPI* (*Serial Peripheral Interface*) o *SWI* (*Single Wire Interface*), que permiten su integración directa con microcontroladores u otros sistemas electrónicos. Esta capacidad posibilita que el tag actúe como puente entre el lector NFC y un dispositivo embebido, facilitando la configuración, actualización o lectura de datos sin necesidad de acceso físico al sistema.

Otra funcionalidad es la recolección de energía o *energy harvesting*. En estos casos, el tag aprovecha la energía captada del campo del lector para alimentar circuitos externos de baja potencia, como sensores.

También es relevante considerar la retención de datos y su vida útil. La mayoría de los tags utilizan memoria EEPROM o similar, con una retención típica de 10 a 50 años y un número finito de ciclos de escritura/borrado (desde 10^4 hasta 10^6). Para

Capítulo 3. Near-field communication (NFC)

sensado de variables físicas, como temperatura o humedad, se prefieren tags con interfaz cableada y *energy harvesting*, que permiten alimentar sensores y transferir sus lecturas al lector NFC.

3.2.5. Lectores NFC

Existen distintos tipos de lectores NFC, con diferentes capacidades en términos de potencias de salida y protocolos soportados. Existen desde lectores puros, que precisan de un microcontrolador para funcionar, hasta lectores completamente programables.

NXP Semiconductors clasifica sus soluciones NFC en distintas categorías según el nivel de integración y programabilidad ofrecido. En primer lugar, define los *NFC Frontends*, dispositivos orientados a extender aplicaciones basadas en microcontroladores con soporte NFC. Estos lectores están optimizados para bajo consumo y tienen disponibles librerías de código para su rápida incorporación a la aplicación. En segundo lugar, define los *NFC Controllers with Integrated Firmware*, como chips que combinan un *NFC Frontend* con un microcontrolador pre-cargado con firmware integrado, pensados para ofrecer una incorporación rápida a aplicaciones con sistemas operativos como Linux, Android o Windows. Finalmente, definen los *NFC Controllers with Customizable Firmware*, como chips que combinan un *NFC Frontend* con un microcontrolador totalmente programable, pensado para darle un uso personalizado al lector.

Dentro de las funcionalidades que se pueden encontrar en los lectores están *Dynamic Power Output* (DPO), que asegura un ajuste de potencia de salida de forma de mantenerla siempre dentro de los límites establecidos y un rango de lectura óptimos. *Inductive Wake-Up* (IWU), permite al lector entrar en modo de bajo consumo, despertándose cuando un tag se aproxima; *Automatic Antenna Tuning* (AAT), maneja la adaptación de la antena de forma automática para garantizar un factor de calidad estable en ambientes hostiles y compensando la deriva que tenga; *Noise Suppression Receiver* (NSR), permite un filtrado de ruido garantizando una comunicación robusta en ambientes ruidosos, y *RSSI (Received Signal Strength Indicator)*, que permite obtener una medida de qué tan fuerte es la señal de respuesta que recibe de un tag, facilitando la identificación de diversos tags en función de la distancia.

Las antenas compatibles con los distintos lectores NFC pueden clasificarse en antenas diferenciales y antenas *single-ended*. Una antena diferencial es una antena con dos terminales de entrada que reciben una fuente de señal diferencial (V_d), mientras que una antena *single-ended* posee solamente una terminal de entrada la cual recibe una fuente de señal respecto de tierra (V_s). En la Figura 3.8 se puede ver la diferencia entre ambos tipos de antenas. Las antenas diferenciales son más eficientes en aplicaciones de alto rendimiento, dado que ofrecen un mejor acoplamiento inductivo y una mayor inmunidad al ruido. Por más detalles del acoplamiento inductivo ver Apéndice A. Por otro lado, las antenas *single-ended* son más simples, contienen una menor cantidad de elementos pasivos y son útiles en diseños compactos y de bajo costo.

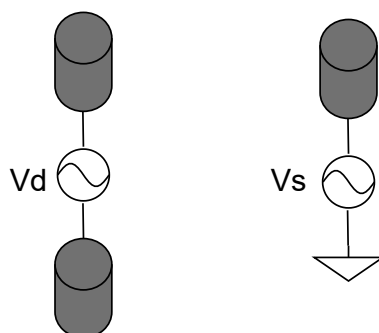


Figura 3.8: Ilustración de una antena diferencial (izquierda) y una antena Single-ended (derecha). Reproducida de [42]

3.3. Dispositivos relevados

A continuación se presentan los principales dispositivos relevados. Para esto se tuvo en cuenta tanto las características principales que se ajustan a los requerimientos, así como el costo de los kits de desarrollo y los dispositivos integrados. En el siguiente capítulo se realizan pruebas preliminares de los tags y lectores aquí seleccionados con el fin de analizar cuál se comporta mejor en la aplicación a desarrollar.

3.3.1. Tags analizados

Para el caso de los tags, se buscó principalmente que el integrado soportara la norma ISO/IEC 15693, para lograr mayores distancias en la comunicación, que contenga memoria interna para poder guardar los datos sensados previo a transmitirlos por RF, que permita el *energy harvesting* para poder alimentar el resto de los componentes del Marco HiveCare y que se trate de un tag dinámico para poder comunicarse con los sensores.

Con respecto a los kits de desarrollo, se buscó que tuviesen tanto antena integrada, para una fácil evaluación inicial del sistema, como la posibilidad de conectar una antena externa, de forma que permita una fácil experimentación con las antenas que se diseñen posteriormente.

Inicialmente se seleccionaron como principales alternativas los siguientes integrados: *ST25DV* de STMicroelectronics, *NTP5332* de NXP Semiconductors y *MAX66242* de Analog Devices. Cuyos *development kits* son Adafruit ST25DV16K, NTAG 5 Link Click y MAX66250EVKIT respectivamente. Estos chips tienen algunas características comunes: el soporte de la ISO/IEC 15693, pin de *energy harvesting* y memoria para almacenar datos. Además, todos presentan interfaz I²C, pudiendo comportarse, los integrados *NTP5332* y *MAX66242* como maestros o esclavos en la comunicación, mientras que el *ST25DV* solo permite comunicación como esclavo. Esta diferencia resulta de particular importancia si se trabaja con

Capítulo 3. Near-field communication (NFC)

Tabla 3.2: Comparación de tags RFID/NFC comerciales considerados

Característica	NTP5332	MAX66242	ST25DV
Fabricante	NXP Semiconductors	Analog Devices	STMicroelectronics
Protocolo RF	ISO/IEC 15693, NFC Type 5	ISO/IEC 15693	ISO/IEC 15693, NFC Type 5
I ² C	maestro/esclavo	maestro/esclavo	esclavo
EEPROM	4 kB	2 kB	(4, 8, 16 o 64) kB
Energy harvesting	Sí	Sí	Sí
Retención de datos	<40 años	<10 años	<40 años
Ciclos de escritura	1 M	0.1 M	0.6 M
Costo chip	USD 1.51	USD 2.93 (discontinuado)	USD 1.26
Costo placa	USD 14.00	USD 44.95	USD 3.95

sensores de temperatura con interfaz I²C, en cuyo caso, para los primeros dos integrados, la configuración hardware no requiere de un microcontrolador entre el tag y los sensores. Por otro lado el *ST25DV* sí lo precisa. Con respecto a la memoria, se encuentran desde los 2 hasta los 64 kB de EEPROM, con retención de datos de 10 a 40 años y 0,1 - 1 m ciclos de escritura. Finalmente, en cuanto a costos, los integrados se encuentran aproximadamente a USD 1,26 el *ST25DV*, USD 1,51 el *NTP5332* y USD 2,93 (actualmente discontinuado) el *MAX66242*. Por otra parte, las placas de desarrollo necesarias para la prueba de concepto se encuentran a USD 3,95 el *ST25DV*, USD 14,0 el *NTP5332* y USD 44,95 el *MAX66242*. En la Tabla 3.2 se encuentra resumida la comparación de los tags considerados.

3.3.2. Lectores analizados

Para el caso de los lectores, se buscó dentro de sus características principales que soporten la ISO/IEC 15693, de forma de tener compatibilidad con los tags relevados, que la potencia de salida sea alta, para lograr mayores distancias en la comunicación y que tuviese tanto antena integrada, para una primera aproximación al sistema, como la posibilidad de conectar una antena externa, de forma que permita una fácil experimentación con las antenas que se diseñen posteriormente. Como principales variantes se manejan los kits de desarrollo de los integrados

Tabla 3.3: Comparación de lectores RFID/NFC comerciales considerados.

Característica	ST25R3911B	ST25R3916B	TRF7970A
Fabricante	STMicroelectronics	STMicroelectronics	Texas Instruments
ISO 14443A/B	Sí	Sí	Sí
ISO 15693	Sí	Sí	Sí
FeliCa™	Sí	Sí	Sí
18000-3	No	No	Sí
Microcontrolador integrado	Sí	No	No
Antena integrada	Sí	Sí	Sí
Antena intercambiable	Sí	Sí	No
Potencia de salida (W)	1.4	1.7	N/E*
Costo placa	USD 47.53	USD 37.49	USD 34.80

* No especifica.

3.3. Dispositivos relevados

ST25R3911B (ST25R3911B-DISCO) y *ST25R3916B* (X-NUCLEO-NFC08A1) de STMicroelectronics, y *TRF7970A* (DLP-7970ABP) de Texas Instruments. Dentro de los lectores de STMicroelectronics, la principal diferencia entre ambos radica en la potencia de salida, siendo de 1,4 W la del *ST25R3911B*, y de 1,7 W la del *ST25R3916B*. Ambos soportan topologías de antenas single-ended, otorgando gran flexibilidad a la hora de desarrollar la antena. Al mismo tiempo, poseen compatibilidad con múltiples protocolos como NFC A/B (ISO/IEC 14443-A/B), ISO/IEC 15693, Felica y NFC Forum. En la Tabla 3.3 se encuentra resumida la comparación de los lectores considerados.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 4

Arquitectura del Marco HiveCare

Previo al desarrollo del prototipo final de la Colmena HiveCare, fue necesario realizar una etapa de pruebas preliminares orientada a evaluar distintas alternativas de hardware para el subsistema de sensado ubicado en el Marco HiveCare. Debido a las restricciones propias de la aplicación, particularmente la necesidad de operar sin batería en el interior de la colmena y alimentarse exclusivamente de la energía transmitida inalámbricamente desde el lector, la selección de componentes no podía basarse únicamente en criterios funcionales, sino también en su desempeño energético y en la viabilidad real de comunicación dadas las circunstancias a las que se podrían llegar a someter.

El desafío principal de esta etapa consistió en encontrar una configuración que permitiera maximizar la distancia de lectura entre el Lector HiveCare y los Marcos HiveCare, manteniendo simultáneamente un consumo lo suficientemente bajo como para ser abastecido mediante *energy harvesting*. En este contexto, variables como el tipo de tag *NFC (Near Field Communication)* utilizado, la tecnología de sensado de temperatura, la electrónica asociada, el lector seleccionado y las antenas empleadas tienen una influencia directa sobre el rendimiento global del sistema.

Con este objetivo, se analizaron y compararon distintas combinaciones de tags y sensores de temperatura disponibles comercialmente, buscando identificar la alternativa más conveniente para el desarrollo posterior del diseño definitivo. Para ello, se definió una secuencia de ensayos experimentales encadenados. En primer lugar, en la Sección 4.1, se describen las configuraciones de hardware consideradas durante esta etapa, incluyendo los sensores de temperatura, tags NFC y lectores utilizados. Posteriormente, en la Sección 4.2, se presenta la metodología experimental utilizada para comparar objetivamente cada alternativa.

Además, se caracterizó la capacidad de entrega energética de cada tag mediante curvas corriente-voltaje, con el fin de establecer qué corriente máxima puede proveer el sistema a distintas distancias. Luego, se midió el consumo eléctrico de cada configuración completa, permitiendo contrastar dicha demanda con la energía disponible y anticipar la viabilidad operativa de cada alternativa. Posteriormente, se verificó experimentalmente el alcance máximo de comunicación, confirmando las predicciones derivadas de las etapas anteriores. Finalmente, se consideraron aspectos de complejidad de implementación y área ocupada.

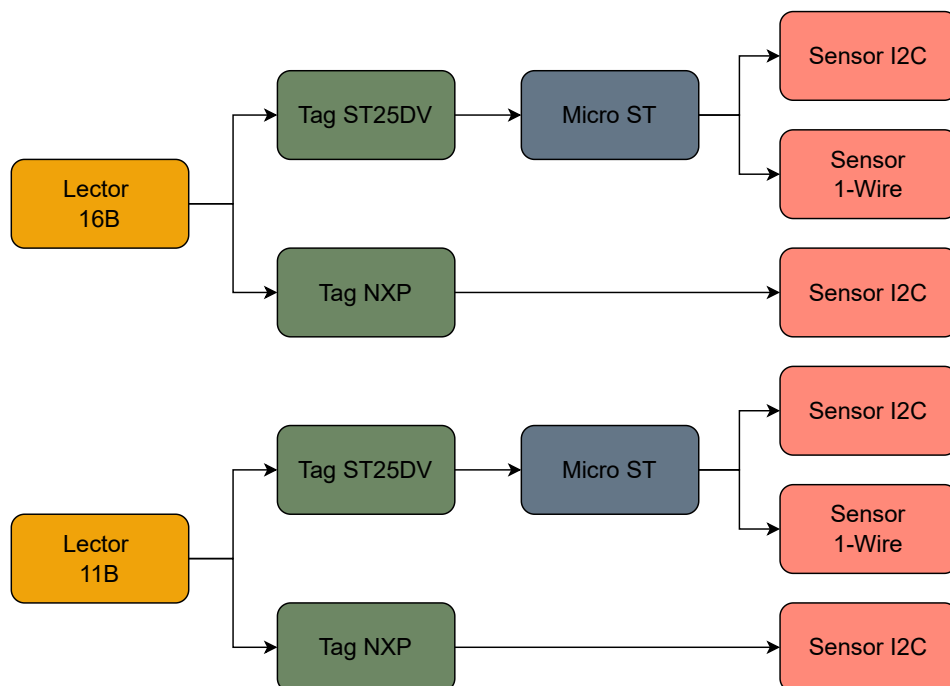


Figura 4.1: Esquema de las distintas configuraciones evaluadas durante la etapa de pruebas preliminares. Cada alternativa combina un lector NFC, un tag y uno o más sensores de temperatura.

El conjunto de estos resultados permitió seleccionar la arquitectura adoptada para el sistema final. La discusión comparativa y la justificación de la solución seleccionada se presentan en la Sección 4.3

4.1. Configuraciones evaluadas

La Figura 4.1 presenta de forma esquemática las configuraciones consideradas durante esta etapa preliminar, totalizando seis diferentes opciones. Las pruebas realizadas se centran en confirmar qué arquitectura será utilizada en el Marco HiveCare. Si bien se hacen ciertas comparaciones entre lectores, la elección final del lector se realiza en el Capítulo 5.

En la Tabla 4.1 se le asigna un nombre a cada configuración. Dado que las pruebas estarán centradas en la elección de tag y sensor, se resumen en tres las configuraciones mostradas en la Figura 4.1.

4.1.1. Sensores de temperatura

Para el subsistema de sensado de temperatura se evaluaron dos sensores digitales: el *DS18B20* y el *STTS22H*. Los kits de desarrollo empleados en esta etapa

4.1. Configuraciones evaluadas

Tabla 4.1: Configuraciones de hardware evaluadas en la prueba de concepto. La x en *Lector* puede tomar el valor de 1 o 6.

Configuración	Lector	Tag	Sensor
A	ST25R391xB	ST25DV + MCU	STTS22H
B	ST25R391xB	ST25DV + MCU	DS18B20
C	ST25R391xB	NTP5332	STTS22H

fueron el *Módulo Sensor de Temperatura DS18B20* y el *SparkFun STTS22H*, respectivamente. Ambos dispositivos presentan prestaciones adecuadas para el rango térmico esperado en la colmena, son de bajo consumo energético y tienen una precisión menor a $0,5^{\circ}\text{C}$. La principal diferencia entre ellos es su interfaz eléctrica.

El sensor *DS18B20* utiliza el protocolo *1-wire*, lo que permite reducir la cantidad de conductores necesarios para su conexión. Esta característica resulta atractiva desde el punto de vista constructivo, ya que simplifica el ruteo interno del Marco HiveCare. Sin embargo, presenta mayores requerimientos de tensión (mínimo 3,0 V) y corriente durante la operación.

Por otra parte, el sensor *STTS22H* emplea comunicación *I²C (Inter-Integrated Circuit)*. Si bien esta interfaz requiere de una línea de cableado adicional respecto a *1-wire*, ofrece bajo consumo y una integración directa con múltiples dispositivos. Este sensor tiene como tensión mínima de alimentación de 1,5 V. Debido a que este sensor está diseñado para bajo consumo, representó una alternativa prometedora para sistemas alimentados por *energy harvesting*.

4.1.2. Tags NFC

Se estudiaron dos *Development Kit* NFC con capacidad de *energy harvesting*: el Adafruit ST25DV16K que incluye el integrado *ST25DV* de STMicroelectronics y el NTAG 5 Link Click de Mikroelektronika que incluye el integrado *NTP5332* de NXP semiconductors.

El tag *ST25DV* es capaz de alimentar un circuito externo mediante la salida de *energy harvesting*, y presenta la capacidad de actuar como esclavo en una comunicación *I²C*. En consecuencia, para interactuar con sensores digitales fue necesario incorporar un microcontrolador intermediario encargado de inicializar los sensores, adquirir las mediciones y transferir posteriormente la información al tag. Para esto se utilizó el *development kit* NUCLEO-U031R8 que contiene al microcontrolador STM32U031F8P6. La elección de éste se basó principalmente en su bajo costo y bajo consumo.

En contraste, el tag *NTP5332* posee capacidad de operar como maestro *I²C*, permitiendo la comunicación directa con sensores compatibles sin necesidad de un microcontrolador adicional. Esta característica reduce la cantidad de componentes y, potencialmente, el consumo total del Marco HiveCare. Debe destacarse que esta arquitectura limita las opciones de sensores utilizables, ya que solamente resulta

Capítulo 4. Arquitectura del Marco HiveCare

compatible con dispositivos que presenten interfaz de comunicación I²C. Por este motivo, no se consideró una configuración con tag NXP y sensor *DS18B20*.

4.1.3. Lectores NFC

Para la unidad lectora se ensayaron dos plataformas basadas en circuitos integrados de STMicroelectronics: *ST25R3911B* y *ST25R3916B*. Ambos permiten operación NFC, aunque presentan diferencias relevantes en potencia disponible y geometría de antena en sus *development kits*.

El lector basado en *ST25R3916B* dispone de una mayor capacidad de excitación, alcanzando una potencia de hasta 1,7 W. Por su parte, la plataforma *ST25R3911B* posee una potencia algo menor, llegando hasta 1,4 W, pero incorpora una antena física de mayor tamaño.

4.2. Evaluación de las configuraciones

Con el fin de comparar objetivamente las distintas configuraciones presentadas en la sección anterior, se definió una metodología experimental basada en cuatro métricas principales de desempeño: capacidad de recolección y entrega energética del tag, consumo eléctrico durante el ciclo de medición, alcance máximo de comunicación entre lector y Marco HiveCare y complejidad de la arquitectura. Las tres primeras variables se consideran críticas dentro del contexto del proyecto, dado que el funcionamiento del marco depende exclusivamente de la energía transferida inalámbricamente por el lector.

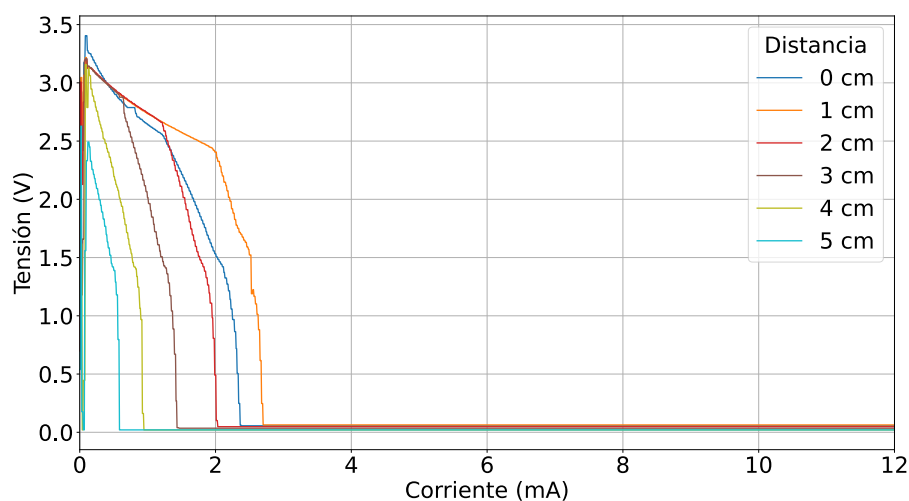
Todas las pruebas fueron realizadas en condiciones controladas de laboratorio, utilizando una única pareja lector–tag por ensayo, evitando la presencia de elementos metálicos cercanos o superficies que pudieran alterar significativamente el acoplamiento magnético entre antenas. Durante las mediciones de distancia, las antenas del lector y del tag se dispusieron enfrentadas, centradas y en planos paralelos, buscando reproducir una condición repetible y representativa del caso ideal de operación. La distancia entre lector y tag fue variada manualmente utilizando una regla milimetrada, adoptándose una incertidumbre experimental estimada de $\pm 0,5$ cm asociada al posicionamiento relativo entre antenas.

4.2.1. Caracterización energética de los tags

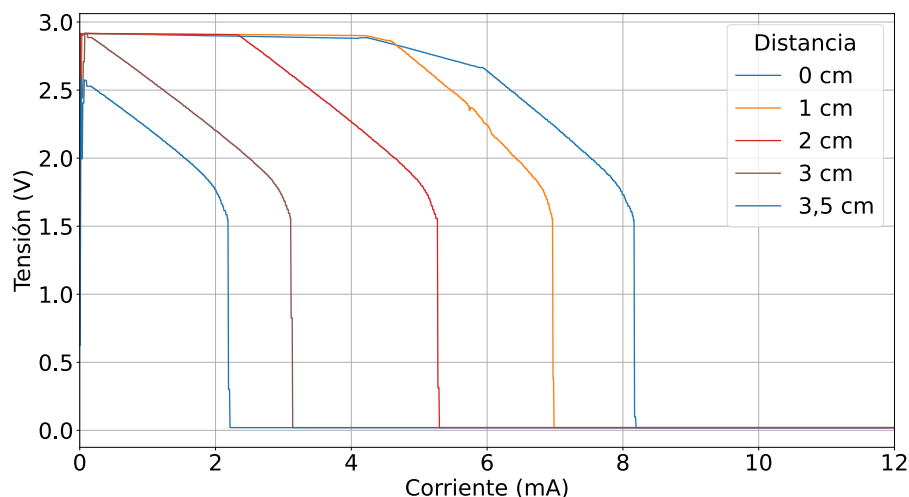
La primera etapa consistió en determinar la capacidad de cada tag para entregar energía utilizable a circuitería externa mediante *energy harvesting*. Para ello se utilizó el instrumento *Otii Arc Pro*, configurado como carga electrónica programable, dispositivo que impone una corriente controlada para simular el consumo de un circuito real, y sistema de adquisición de tensión y corriente.

El procedimiento experimental consistió en conectar la salida de la cosecha energética del tag al instrumento y aumentar progresivamente la corriente demandada, registrando simultáneamente la tensión disponible en bornes. De esta forma

4.2. Evaluación de las configuraciones



(a) Curvas corriente-voltaje del tag ST25DV para distintas distancias entre lector y tag. Para esta prueba se utilizó el *Development Kit X-NUCLEO-NFC08A1* del lector ST25R3916B.



(b) Curvas corriente-voltaje del tag NTP5332 para distintas distancias entre lector y tag. Para esta prueba se utilizó el *Development Kit X-NUCLEO-NFC08A1* del lector ST25R3916B.

Figura 4.2: Curvas corriente-voltaje obtenidas para los tags ST25DV y NTP5332 a distintas distancias entre lector y tag.

fue posible obtener curvas corriente-voltaje para distintas separaciones entre lector y tag.

Estas curvas permiten estimar la corriente máxima extraíble manteniendo una tensión suficiente para alimentar sensores y, en los casos correspondientes, el microcontrolador asociado. Asimismo, permiten observar cómo disminuye la capacidad energética disponible al aumentar la distancia de lectura.

La Figura 4.2 muestra las curvas corriente-voltaje medidas para las placas de desarrollo de los tags *ST25DV* (Adafruit ST25DV16K) y *NTP5332* (NTAG 5 Link Click) a distintas distancias respecto del lector.

Capítulo 4. Arquitectura del Marco HiveCare

En ambos casos se observa el comportamiento esperado: a medida que aumenta la separación entre antenas, disminuye la corriente máxima extraíble para mantener cierta tensión mínima. Sin embargo, el tag *NTP5332* presentó una mayor capacidad de entrega energética para distancias equivalentes, manteniendo tensiones útiles a mayores corrientes y mayores separaciones. Este resultado constituye una primera evidencia favorable hacia dicho integrado, ya que una mayor energía disponible permite alimentar sensores externos con menor restricción operativa y favorece el aumento de la distancia máxima de lectura.

4.2.2. Medición de consumo de las configuraciones

La segunda etapa experimental consistió en medir el consumo eléctrico de cada arquitectura durante un ciclo representativo de operación. Cabe mencionar que no se tiene en cuenta el consumo del lector para estas medidas. Para ello se utilizó un *Power Profiler Kit II (PPK2)*, conectado de forma de alimentar el circuito bajo ensayo y registrar la corriente consumida en función del tiempo.

En cada configuración se ejecutó una secuencia equivalente a la adquisición de tres temperaturas consecutivas, simulando el funcionamiento final previsto para un Marco HiveCare con tres sensores. En los casos que incluían microcontrolador, el perfil temporal del consumo permitió además identificar etapas de arranque, inicialización, comunicación con sensores y transferencia de datos hacia el tag.

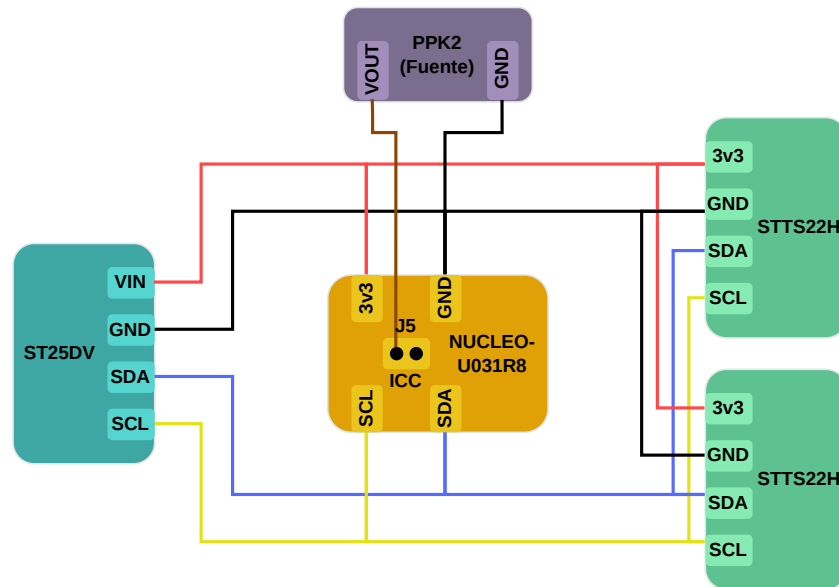
A partir de las medidas obtenidas se calculó la corriente media consumida por cada sistema, utilizándose este parámetro como indicador comparativo principal. Dado que la energía disponible por cosecha energética es limitada, configuraciones con menor consumo resultan esperablemente más favorables en términos de distancia operativa. Es importante mencionar que los módulos no fueron optimizados en consumo para estas medidas, por lo que puede haber corrientes asociadas a LEDs u integrados que serán removidos o desenergizados en la solución final, por lo que estas medidas representan una cota superior de consumo para cada configuración.

Configuración A

En la Figura 4.3a se muestran las conexiones realizadas para tomar la medida de consumo de la configuración A (tag ST25DV, microcontrolador y sensor STTS22H). En ella se observa la presencia de dos sensores de temperatura en lugar de tres, por lo cual debe tenerse en cuenta que el consumo final de la configuración será un poco más elevado que lo medido. La medida fue tomada de forma tal de cumplir un ciclo de tres lecturas a sensores, repitiendo la medida en uno de ellos. El consumo que debe sumarse es el consumo en estado de reposo de un sensor, este valor es de aproximadamente 1,75 uA, reportado en la hoja de datos [43].

La Figura 4.3b muestra el perfil de consumo correspondiente a la configuración A. Se distingue inicialmente un pico asociado al arranque del microcontrolador, seguido por una etapa de inicialización y posteriormente la comunicación I²C con los sensores. La corriente media registrada fue de aproximadamente 2,56 mA, valor que puede contrastarse directamente con las curvas corriente-voltaje obtenidas en la caracterización energética con el *Otii Arc Pro* (Figura 4.2): para que el tag

4.2. Evaluación de las configuraciones



(a) Diagrama de conexiones de la configuración A para la medida de consumo.

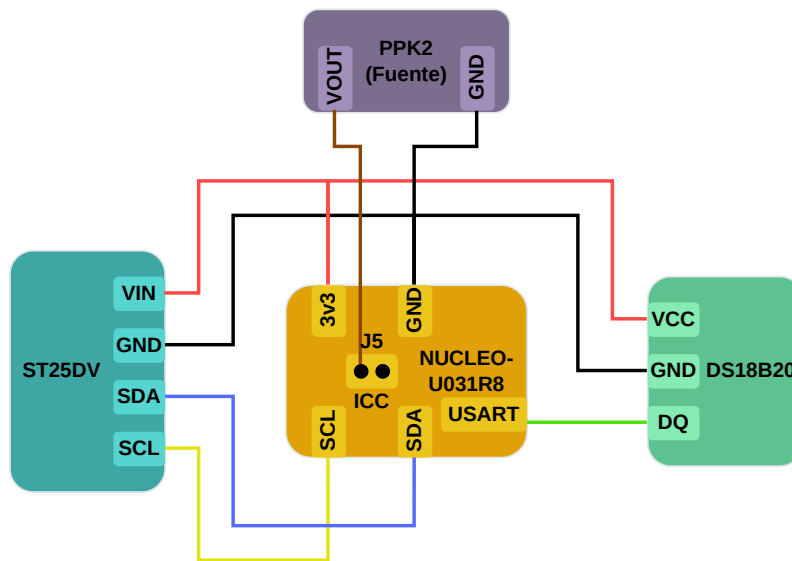


(b) Perfil de consumo para la configuración A.

Figura 4.3: Conexiones y perfil de consumo obtenidos para la configuración A.

ST25DV pueda alimentar esta configuración de forma autónoma, debe ser capaz de entregar dicha corriente manteniendo una tensión suficiente a la distancia de operación deseada. De acuerdo a las curvas relevadas, esto limita considerablemente la distancia máxima de lectura alcanzable con esta arquitectura.

Capítulo 4. Arquitectura del Marco HiveCare



(a) Diagrama de conexiones de la configuración B para la medida de consumo.



(b) Perfil de consumo para la configuración B.

Figura 4.4: Conexiones y perfil de consumo obtenidos para la configuración B.

Configuración B

En la Figura 4.4a se muestran las conexiones realizadas para tomar la medida de consumo de la configuración B (tag ST25DV, microcontrolador y sensor DS18B20). Aquí se utiliza un sensor de temperatura en lugar de tres, por lo se deberá tener en cuenta el consumo extra asociado que deberá sumarse para estimar el consumo final de la configuración. En este caso, aproximadamente $2 \times 1 \mu A = 2 \mu A$.

4.2. Evaluación de las configuraciones

La Figura 4.4b presenta las medidas realizadas. En este caso, se obtuvo una corriente media de aproximadamente 3,98 mA, superior a la configuración anterior, lo que agrava aún más la incompatibilidad con las curvas de entrega energética relevadas para el tag ST25DV. Además del mayor consumo promedio, los sensores DS18B20 presentan mayores exigencias de tensión mínima de alimentación, lo que reduce su compatibilidad con sistemas alimentados por cosecha energética.

Configuración C

Finalmente, la Figura 4.5a muestra las conexiones realizadas para las medidas de consumo de la configuración C (tag NTP5332 y sensor STTS22H). La cantidad y tipo de sensores es la misma que en la configuración A, por lo que el análisis es idéntico: sumar un consumo aproximado de 1,75 uA.

La Figura 4.5b muestra el comportamiento de la arquitectura basada en el tag NTP5332 con sensores STTS22H conectados directamente. La corriente media medida fue del orden de 100 μ A, significativamente inferior al resto de las alternativas evaluadas, y notoriamente por debajo de los valores de corriente máxima extraíble registrados para el tag NTP5332 en la caracterización energética, incluso a las mayores distancias ensayadas. Esta mejora se explica por la ausencia del microcontrolador intermedio para la comunicación entre el tag y los sensores. En consecuencia, desde el punto de vista energético, esta configuración representa la opción más favorable, resultado consistente con la mayor capacidad de entrega energética observada para dicho integrado en la etapa anterior.

4.2.3. Medición del alcance de comunicación

A partir de los perfiles de consumo caracterizados y las curvas corriente-voltaje obtenidas con el *Otii Arc Pro*, la tercera etapa consistió en determinar experimentalmente la distancia máxima a la cual cada configuración podía operar correctamente, buscando contrastar las predicciones derivadas de ambas mediciones con el comportamiento real del sistema completo.

Se definió como condición de funcionamiento válido aquella en la que el lector lograba energizar al tag, establecer comunicación y completar exitosamente la lectura de las temperaturas.

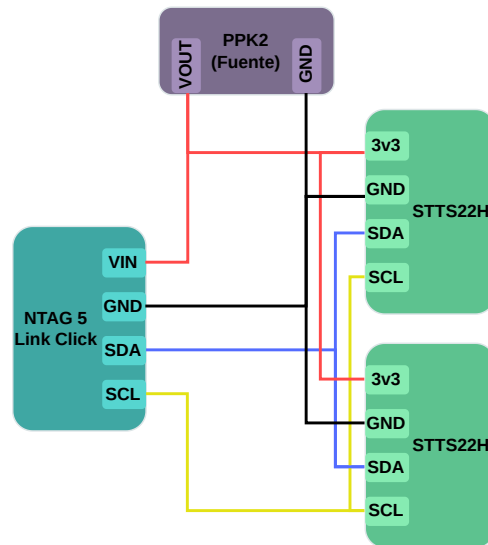
Para cada combinación lector-tag-sensor se incrementó progresivamente la separación entre antenas hasta alcanzar el punto en que el sistema dejaba de responder de forma consistente. Se distinguieron además dos escenarios:

- **Tag sin sensores:** medición de la distancia máxima de comunicación del tag aislado.
- **Tag con sensores:** medición de distancia máxima con sensores conectados.

La comparación entre ambos casos permitió cuantificar el impacto del consumo eléctrico sobre la distancia máxima alcanzable.

La Tabla 4.2 resume las distancias máximas obtenidas para cada combinación ensayada.

Capítulo 4. Arquitectura del Marco HiveCare



(a) Diagrama de conexiones de la configuración C para la medida de consumo.



(b) Perfil de consumo para la configuración C.

Figura 4.5: Conexiones y perfil de consumo obtenidos para la configuración C.

Los resultados muestran que el agregado de carga electrónica reduce fuertemente la distancia máxima alcanzable, confirmando la relación directa entre consumo y alcance. Asimismo, la configuración basada en NTP5332 mantuvo las mejores prestaciones en todos los casos. También se observa que la potencia nominal del lector no determina por sí sola el resultado final, ya que la geometría de la antena influye de forma comparable sobre el acoplamiento inductivo.

4.3. Discusión y selección de la solución

Tabla 4.2: Distancias máximas de comunicación entre lector y tag para las distintas configuraciones evaluadas

Tag	Configuración	ST25R3916B [cm]	ST25R3911B [cm]
NTP5332	Sin sensores	$8,0 \pm 0,5$	$8,3 \pm 0,5$
NTP5332	Con sensores I ² C	$4,5 \pm 0,5$	$3,5 \pm 0,5$
ST25DV	Sin sensores	$7,0 \pm 0,5$	$5,5 \pm 0,5$
ST25DV	Con sensores I ² C	$1,5 \pm 0,5$	$1,0 \pm 0,5$

4.2.4. Costos y área ocupada

Además del desempeño eléctrico, se consideraron aspectos prácticos vinculados a fabricación e integración mecánica. La configuración basada en el NTP5332 requiere de una menor cantidad de componentes externos al no incorporar un microcontrolador, lo que simplifica el diseño del *PCB* (*Printed Circuit Board*), reduce área ocupada, reduce costos de fabricación y disminuye complejidad del montaje. Por el contrario, las alternativas basadas en el ST25DV requieren electrónica adicional, mayor superficie de placa y desarrollo de firmware específico para el microcontrolador intermediario.

4.3. Discusión y selección de la solución

A partir de los ensayos realizados fue posible comparar de forma objetiva las distintas arquitecturas propuestas para el Marco HiveCare, considerando no solamente su funcionamiento individual, sino también su adecuación al contexto real de uso dentro de una colmena. Como se estableció previamente, la selección de la solución final debía contemplar simultáneamente múltiples criterios de diseño: consumo energético, alcance de comunicación, complejidad de implementación, área ocupada y factibilidad de integración futura.

El primer criterio analizado fue el consumo eléctrico. Dado que el Marco HiveCare opera exclusivamente a partir de la energía transferida por el lector mediante acoplamiento inductivo, la demanda energética del sistema condiciona directamente la viabilidad de funcionamiento. En este aspecto, la arquitectura basada en el tag *NTP5332* y sensores *STTS22H* presentó una ventaja significativa respecto al resto de las alternativas. La ausencia de un microcontrolador intermedio permitió reducir considerablemente la corriente media requerida durante el ciclo de medición, ubicándose un orden de magnitud por debajo de las configuraciones basadas en *ST25DV*.

El segundo criterio relevante correspondió al alcance máximo de comunicación. Esta variable resulta crítica para el proyecto, ya que el objetivo final consiste en realizar lecturas desde el exterior de la colmena sin intervención directa sobre los marcos. Los resultados experimentales mostraron que la configuración basada en el *NTP5332* alcanzó mayores distancias operativas durante la lectura efectiva de sensores. Esto confirma que la reducción del consumo se traduce directamente en

Capítulo 4. Arquitectura del Marco HiveCare

Tabla 4.3: Resumen comparativo de las configuraciones evaluadas para el Marco HiveCare. Las configuraciones se encuentran definidas en la Tabla 4.1.

Configuración	Consumo	Alcance	Complejidad	Área
A	Alto	Bajo	Media	Media
B	Alto	Bajo	Media	Media
C	Bajo	Alto	Baja	Baja

una mejora del desempeño inalámbrico global.

En tercer lugar, se evaluó la complejidad de implementación. Las soluciones basadas en el tag *ST25DV* requieren necesariamente la incorporación de un microcontrolador adicional encargado de gestionar la adquisición de datos y la comunicación con el tag. Esto implica una mayor cantidad de componentes, desarrollo de firmware específico, etapas de inicialización adicionales y mayores posibilidades de falla. En contraste, la arquitectura basada en el *NTP5332* permite una interacción directa con sensores I²C, simplificando sustancialmente tanto el hardware como el software del sistema.

En cuanto a la alternativa basada en sensores *DS18B20*, si bien el protocolo *1-wire* presenta ventajas asociadas a la reducción del cableado, los ensayos mostraron mayores requerimientos energéticos y una implementación más compleja en comparación con la opción de I²C seleccionada. Por este motivo, dicha configuración fue descartada tempranamente como candidata principal.

Con el objetivo de sintetizar la comparación global entre arquitecturas, en la Tabla 4.3 se resume el desempeño relativo de cada alternativa en función de los criterios principales considerados.

Considerando en conjunto todos los factores analizados, se concluye que la configuración compuesta por el tag *NTP5332* y sensores *STTS22H* representa la alternativa más conveniente para el desarrollo del prototipo final del Marco HiveCare. Esta solución combina el menor consumo energético, el mejor alcance experimental y una arquitectura simplificada, alineándose de forma consistente con los objetivos generales del proyecto.

En consecuencia, a partir de este punto del trabajo se adopta dicha configuración como base tecnológica del sistema definitivo. Los capítulos siguiente presentan el diseño detallado, implementación y validación experimental de esta solución.

Capítulo 5

Diseño de antenas

En el proceso de elaboración de las pruebas de concepto se presentó el problema de maximizar la distancia de medición, fundamental para lograr alcanzar a todos los Marcos HiveCare dentro del cajón. Los kits de desarrollo sin modificar logran una distancia de 4,5 cm para el lector X-NUCLEO-NFC08A1 y 3,5 cm para el lector ST25R3911B-DISCO, La distancia requerida es de 40 cm, para cubrir distancia máxima de ubicación de un marco dentro del cajón, por lo que se decidió diseñar la antena a medida para buscar cumplir con este requerimiento.

En particular, se optó por construir antenas con alambre de cobre barnizado de $0,16 \text{ mm}^2$ de sección, *AWG (American Wire Gauge) 25*, con diferentes números de vueltas y de dimensiones similares a los Marcos HiveCare ya que la antena sería integrada a estos marcos. La elección de este material respondió a su disponibilidad en el momento de realizar las pruebas; posteriormente se verificó que otros materiales, como el alambre acerado utilizado en la fabricación de los marcos, producían resultados equivalentes.

El presente capítulo describe el proceso de diseño y caracterización de las antenas utilizadas en el sistema *NFC (Near Field Communication)* desarrollado. En primer lugar, en la Sección 5.1 se analiza experimentalmente el alcance de los lectores disponibles y la influencia del tamaño de las antenas en el acoplamiento inductivo. Luego, en la Sección 5.2, se presenta el diseño de la antena del Marco HiveCare, incluyendo el cálculo de sus parámetros eléctricos y su validación experimental mediante mediciones con un *VNA (Vector Network Analyzer)*. Finalmente, en la Sección 5.3 se describe el diseño de la nueva antena del lector y los resultados obtenidos en términos de alcance de comunicación.

5.1. Caracterización del campo de los lectores

Como primer paso, se midió el campo magnético de cada lector en función de la distancia. Para ello, se prepararon dos antenas de referencia: una antena grande, de las dimensiones del marco ($45,0 \times 23,5 \text{ cm}$) con dos vueltas del alambre de cobre, y una antena impresa pequeña de dimensiones $3,0 \times 2,5 \text{ cm}$ con cinco vueltas. Manteniendo activo el campo RF generado por cada lector, se midió el voltaje

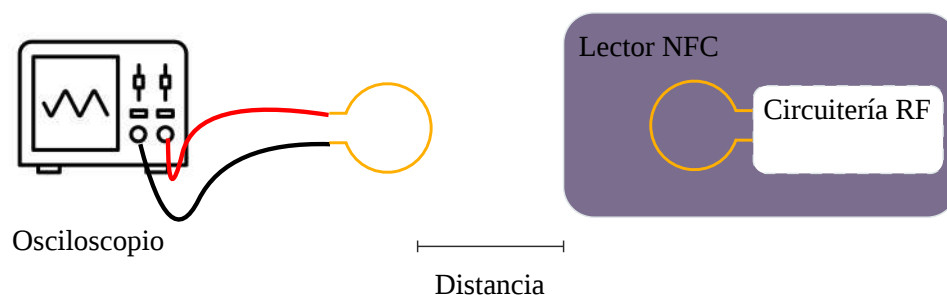


Figura 5.1: Diagrama del montaje experimental utilizado para realizar las medidas de distancia. Es importante mencionar que las antenas se disponen en planos paralelos.

inducido en bornes de cada antena en función de la distancia al lector, utilizando el osciloscopio GDS-2062. Estas medidas constituyen una estimación indirecta de la densidad de flujo magnético capaz de ser capturado por cada antena a una distancia dada. En la Figura 5.1 se puede observar a modo de diagrama como se realizaron dichas medidas.

Las medidas se realizaron con la antena grande adosada al borde del marco y para el caso de la antena pequeña impresa, la misma se fijó en el centro de un marco. En ambos casos, la máxima distancia alcanzable es de 39 cm la cual corresponde a la medida desde el lateral exterior donde se encuentra el lector hasta el lateral opuesto en la parte interna que es donde estará el último marco. El ensayo se repitió con ambos lectores disponibles para evaluar y comparar su desempeño.

El primer lector evaluado fue el ST25R3911B-DISCO de ST, que incorpora el circuito integrado ST25R3911B. Este módulo cuenta con una antena de $10,5 \times 5,2$ cm y dos vueltas, con una potencia de salida de hasta 1,4 W para una antena diferencial. El segundo lector evaluado fue el X-NUCLEO-NFC08A1, también de ST, que incorpora el circuito integrado ST25R3916B. Este módulo cuenta con una antena diferencial de $4,7 \times 3,4$ cm y cuatro vueltas, con una potencia de salida de hasta 1,7 W para una antena diferencial.

Los resultados de ambas medidas se presentan en la Figura 5.2. En las gráficas se puede observar que el voltaje inducido depende significativamente del tamaño de la antena, la antena grande supera ampliamente al de la antena pequeña, y que para una misma antena no existe mayor diferencia entre los lectores. Esto evidencia que el tamaño de la antena receptora es un factor determinante en el acoplamiento inductivo. Esto motiva directamente la decisión de diseñar antenas del tamaño del Marco HiveCare.

Por otro lado, al comparar el desempeño de ambos lectores, se observa que los voltajes inducidos son similares en todo el rango de distancias medido, tanto para la antena grande como para la pequeña. Este resultado puede interpretarse como una compensación entre dos factores: el lector verde (ST25R3911B-DISCO) cuenta con una antena de mayor área $10,5 \times 5,2$ cm, lo que favorece el acoplamiento con antenas de tamaño similar al marco, mientras que el lector azul (X-NUCLEO-NFC08A1), a pesar de contar con una antena considerablemente más pequeña $4,7 \times 3,4$ cm,

5.2. Diseño de la antena del Marco HiveCare

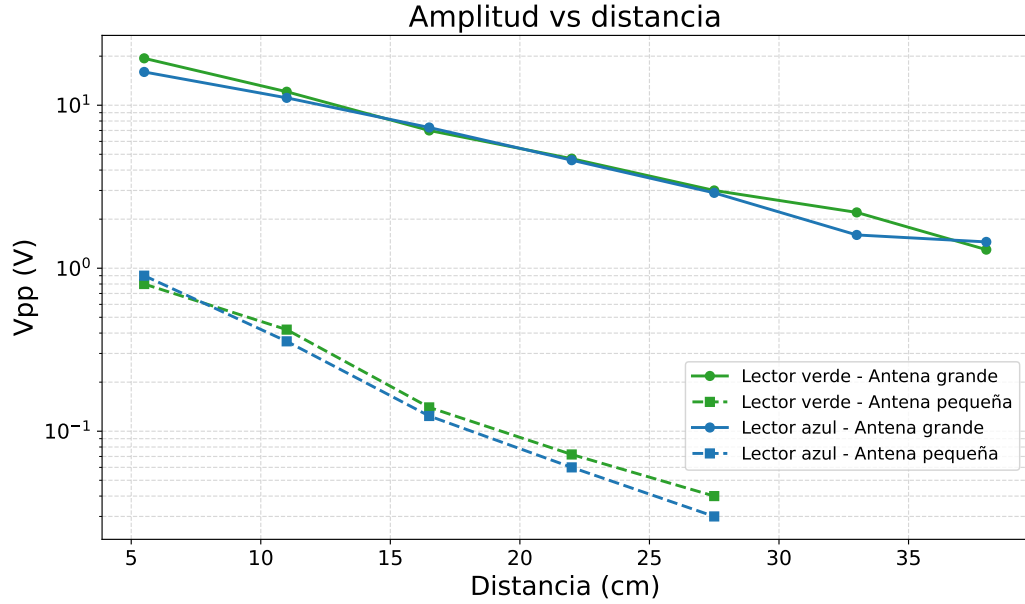


Figura 5.2: Voltaje inducido en ambas antenas de referencia en función de la distancia, comparando el desempeño del lector ST25R3911B-DISCO (verde) y el X-NUCLEO-NFC08A1 (azul).

compensa esta desventaja con una mayor potencia de salida y la capacidad de *auto-tuning*. En consecuencia, la elección del X-NUCLEO-NFC08A1 para continuar el desarrollo no se basa en una diferencia observable en estas medidas, sino que se basa en sus características técnicas: la capacidad de *auto-tuning* permite adaptarse a variaciones en la construcción de la antena mientras que la mayor potencia de salida ofrece un mejor desempeño.

5.2. Diseño de la antena del Marco HiveCare

5.2.1. Construcción y determinación de parámetros

Una vez seleccionado el lector, se procedió a reemplazar la antena original del módulo basado en el NTP5332 por una antena de alambre de cobre barnizado de AWG 25 de sección.

Se fabricó una antena con dos vueltas del tamaño del marco ($45,0 \times 23,5$ cm), para lograr una construcción que no afecte al habitáculo de las abejas y no sea problemático para el apicultor. Al mismo tiempo, se eligió esta cantidad de vueltas específica por representar un compromiso adecuado entre la energía capturada y las limitaciones eléctricas de la antena. Un mayor número de espiras incrementa el flujo magnético acumulado y, por lo tanto, mejora el acoplamiento inductivo con el lector. Sin embargo, también aumenta la inductancia, la resistencia serie y la capacitancia parásita entre espiras, afectando la frecuencia de resonancia y el desempeño general de la antena (Ver Apéndice A).

En consecuencia, la geometría de la antena por sí sola no es suficiente para

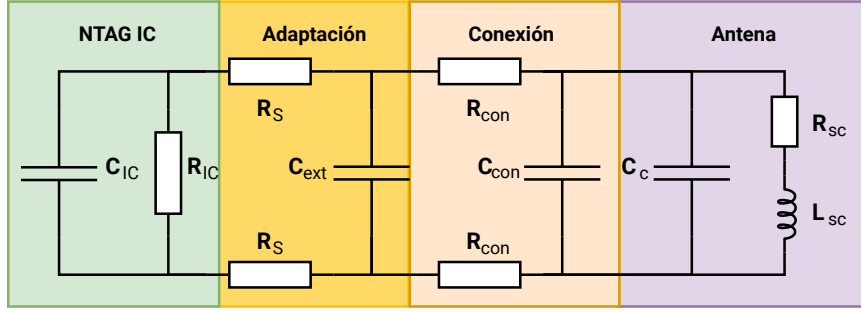


Figura 5.3: Circuito equivalente del tag. R_S representa las resistencias intencionales de $2,2\Omega$ incorporadas en cada terminal para el control del factor de calidad. El resto de la nomenclatura sigue la convención de [45].

garantizar una transferencia eficiente de energía entre el lector y el tag. Para maximizar la corriente inducida y el voltaje disponible en los terminales del circuito integrado, además la antena debe formar un circuito resonante sintonizado a la frecuencia de operación NFC, 13,56 MHz. Esto resulta especialmente importante en aplicaciones pasivas como la presente, donde la energía necesaria para alimentar el tag se obtiene exclusivamente del campo magnético generado por el lector.

Por este motivo, fue necesario determinar la inductancia de la antena y calcular el capacitor de resonancia correspondiente. Como primera estimación, se utilizó la herramienta *NFC Antenna Tool* provista por NXP [44], que permite obtener los parámetros eléctricos de una antena a partir de sus características físicas. A partir de los valores ingresados, la herramienta estima magnitudes como la inductancia serie, la capacidad parásita y la resistencia serie de la antena. Los valores obtenidos ingresando los parámetros geométricos anteriormente mencionados son de $L_{sc} = 5,98\mu\text{H}$ y $R_{sc} = 2,22\Omega$.

En la Figura 5.3 se presenta el circuito equivalente del tag junto con su antena. De derecha a izquierda, se distinguen cuatro secciones: el modelo serie de la antena, compuesto por su inductancia serie L_{sc} , su resistencia serie R_{sc} y su capacidad parásita C_c ; las resistencias R_{con} y capacidades C_{con} asociadas a las conexiones físicas entre la antena y el PCB; las resistencias R_S incorporadas intencionalmente en cada terminal para reducir el factor de calidad del circuito resonante y reducir asimetría producida por la conexión, y el capacitor externo C_{ext} , conectado en paralelo con la antena, permite ajustar la frecuencia de resonancia del conjunto a los 13,56 MHz requeridos por el estándar NFC; y finalmente el modelo en paralelo del chip, con su resistencia R_{IC} y su capacidad interna C_{IC} .

Para simplificar el análisis, resulta conveniente trabajar con el modelo en paralelo del circuito resonante en lugar del serie. El factor de calidad de la antena se estima a partir de sus parámetros serie [45]:

$$Q_{ANT} = \frac{2\pi f_0 \cdot L_{sc}}{R_{sc}},$$

Sustituyendo $L_{sc} = 5,98\mu\text{H}$ y $R_{sc} = 2,22\Omega$ se obtiene $Q_{ANT} \approx 200$. Dado que este valor es muy elevado, la transformación serie-paralelo permite considerar que la

5.2. Diseño de la antena del Marco HiveCare

inductancia paralelo L_{pc} es equivalente a la inductancia serie, por lo que L_{sc} puede utilizarse directamente en el análisis posterior.

A la frecuencia de operación de 13,56 MHz, la reactancia de los capacitores involucrados es del orden de $10^3 \Omega$, valor considerablemente mayor que las resistencias $R_S = 2,2 \Omega$ presentes en serie en cada terminal. Asimismo, la resistencia asociada a las conexiones físicas del circuito R_{con} , típicamente del orden de miliohmios o fracciones de ohm, resulta despreciable frente a las impedancias reactivas involucradas. Por este motivo, dichas resistencias no afectan significativamente la condición de resonancia y pueden despreciarse a los efectos del cálculo de C_{ext} .

Asimismo, la capacidad parásita asociada a las conexiones físicas del circuito, representada por C_{con} , es del orden de 0,1–1 pF, por lo que su contribución resulta despreciable frente a las demás capacidades del sistema. Bajo estas hipótesis, la capacidad interna del chip C_{IC} y el capacitor externo C_{ext} pueden considerarse directamente en paralelo con la inductancia de la antena. Adicionalmente, existe una capacidad parásita asociada a la geometría propia de la antena, representada por C_c , cuya contribución queda implícitamente contemplada en el ajuste experimental posterior de la resonancia mediante el VNA.

En consecuencia, la capacidad total del circuito resonante puede expresarse como:

$$C_{total} = C_{IC} + C_{ext} + C_c,$$

y, considerando en primera aproximación únicamente las contribuciones dominantes, resulta:

$$C_{total} \approx C_{IC} + C_{ext},$$

por lo que la condición de resonancia a 13,56 MHz impone:

$$C_{ext} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 \cdot L} - C_{IC},$$

siendo $f_0 = 13,56$ MHz. Sustituyendo $L = 5,98 \mu\text{H}$ y el valor nominal de $C_{IC} = 15$ pF especificado en la hoja de datos del NTP5332 para condiciones de operación estándar, se obtiene $C_{ext} \approx 8$ pF. Teniendo esto en cuenta, se tomó el valor más próximo en la serie E12, el cual es de 8,2 pF.

Para el análisis del factor de calidad, se considera ahora la resistencia serie equivalente $R_{total,s} = R_{sc} + 2R_S$, donde las dos resistencias $R_S = 2,2 \Omega$ se suman a la resistencia serie del bobinado. Esto reduce el factor de calidad a $Q_{ANT} \approx 80$, valor que sigue siendo suficientemente elevado para mantener la aproximación $L_{sc} \approx L_{pc}$. La transformación serie–paralelo permite obtener la resistencia equivalente en paralelo mediante:

$$R_p = (Q_{ANT}^2 + 1) \cdot R_{total,s},$$

obteniéndose una resistencia paralelo de aproximadamente 40 k Ω . La resistencia total en paralelo del circuito resonante $R_{total,p}$ resulta entonces del paralelo entre R_p y la resistencia del chip R_{IC} . Entonces el factor de calidad del circuito completo se estima como:

$$Q = \frac{R_{total,p}}{2\pi f_0 \cdot L},$$

Capítulo 5. Diseño de antenas

resultando en un valor de $Q \approx 33$, dentro del rango recomendado para aplicaciones NFC [46].

Es importante mencionar, que el valor del factor de calidad en la práctica es esperable que sea menor al hallado teóricamente: La herramienta utilizada para estimar los parámetros de la antena realiza cálculos ideales sin tener en cuenta trazas adicionales ni resistencias de conexión [47] por lo que la resistencia serie equivalente de la antena será, en la práctica, algo mayor a lo estimado, disminuyendo así el factor de calidad.

5.2.2. Verificación con VNA

La antena con el capacitor de 20 pF instalado (sin el tag) fue verificada mediante un analizador de redes vectorial (VNA), midiendo el módulo y la fase de la impedancia en función de la frecuencia. Cabe mencionar que el sistema medido consta únicamente de la antena diseñada con el capacitor externo, aproximándose así a la capacidad total previamente calculada.

En la Figura 5.4 se observa que $|Z|$ alcanza su máximo en 13,56 MHz, confirmando que en esa frecuencia la impedancia del circuito resonante paralelo es máxima. Esto se verifica también en la fase, que cruza por cero en la misma frecuencia, indicando que la impedancia es puramente real en ese punto.

5.2.3. Resultados de alcance

Con la antena diseñada instalada en el tag, se realizaron medidas de temperatura a diferentes distancias. La máxima distancia de comunicación alcanzada en estas condiciones fue de 13 cm, lo que representó una mejora significativa respecto al alcance de la antena original del kit de desarrollo `Ntag 5 link click`. Sin embargo, esta distancia aún no era suficiente para cubrir el cajón en su totalidad, por lo que se decidió proceder también con el rediseño de la antena del lector.

5.3. Diseño de la antena del Lector HiveCare

5.3.1. Estrategia de diseño

Luego de verificar que el aumento del tamaño de la antena del tag permitía extender la distancia de comunicación, resultó necesario analizar si también era conveniente modificar la antena del lector para maximizar el acoplamiento entre ambas estructuras.

El acoplamiento inductivo entre dos antenas puede describirse mediante la inductancia mutua (M), la cual depende de la geometría de las antenas y de la separación entre ellas. A partir de este parámetro se define el factor de acoplamiento (k), dado por:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}},$$

5.3. Diseño de la antena del Lector HiveCare

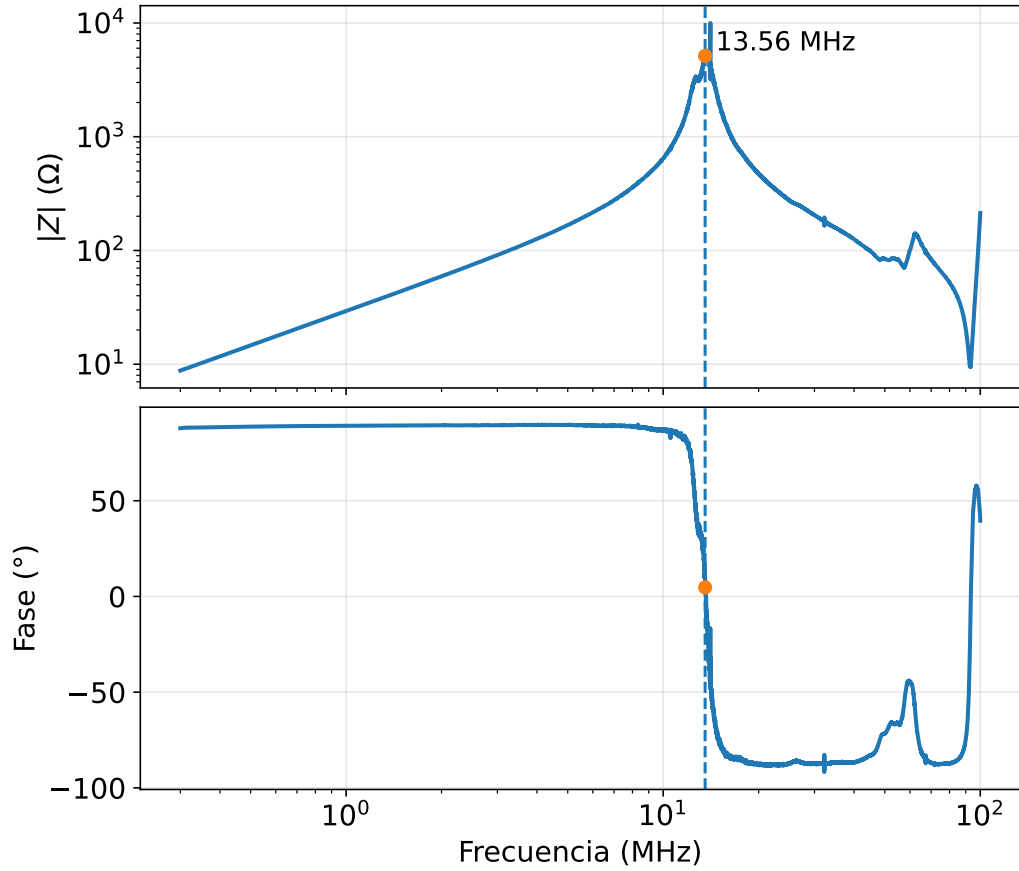


Figura 5.4: Módulo y fase de la impedancia de la antena del tag (dos espiras con capacitor de resonancia), medidos con VNA. El máximo de $|Z|$ y el cruce por cero de la fase coinciden en 13,56 MHz, confirmando la frecuencia de resonancia del circuito.

donde (L_1) y (L_2) corresponden a las autoinductancias de cada antena [48]. El parámetro (k) representa la fracción de flujo magnético generado por una antena que logra enlazar a la otra, por lo que valores más altos indican un mayor acoplamiento magnético.

El máximo acoplamiento inductivo entre dos antenas se obtiene cuando ambas poseen dimensiones similares (véase Apéndice A). La Figura 5.5 muestra el factor de acoplamiento calculado para dos configuraciones: una utilizando la antena original del lector junto con una antena de tag extendida al tamaño del marco, y otra donde ambas antenas poseen dimensiones equivalentes al marco. Puede observarse que, para todas las distancias analizadas, la segunda configuración presenta valores de (k) superiores, indicando un mejor acoplamiento magnético entre ambas estructuras. En consecuencia, el paso siguiente fue diseñar una antena del lector de dimensiones próximas a las del marco.

Dado que el circuito de adaptación de la antena del lector X-NUCLEO-NFC08A1 es considerablemente más complejo que el del tag, se tomó la decisión de no modificarlo y, en cambio, diseñar una nueva antena cuyos parámetros eléctricos, en

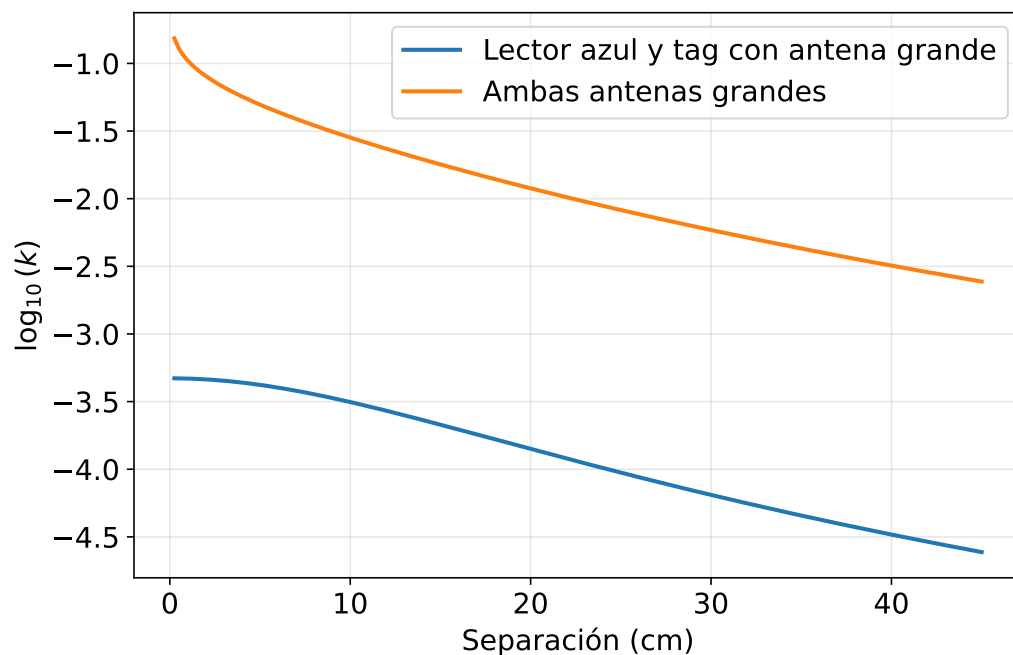


Figura 5.5: Comparación del factor de acoplamiento k en función de la distancia para distintas configuraciones de antenas.

especial la inductancia y la frecuencia de autorresonancia, fueran equivalentes a los de la antena original, de manera que resultara compatible con la red de adaptación existente.

5.3.2. Parámetros de la antena original del lector

Como punto de partida, se caracterizaron los parámetros de la antena original del X-NUCLEO-NFC08A1 ($4,7 \times 3,4$ cm, cuatro vueltas) mediante la herramienta *NFC Antenna Design Tool* de NXP. Los valores obtenidos fueron:

- Inductancia: $L = 1269$ nH
- Capacidad parásita: $C = 2,2$ pF
- Resistencia serie: $R_S = 0,92 \Omega$
- Frecuencia de autorresonancia: $SR = 95$ MHz

5.3.3. Diseño de la nueva antena

Se diseñó una nueva antena de una sola vuelta con el mismo alambre de cobre de AWG 25 barnizado. La elección de una única vuelta responde a que la inductancia objetivo era demasiado chica y aumentar el número de vueltas hubiera requerido reducir el área de la antena para mantener dicha inductancia, contrarrestando el

5.3. Diseño de la antena del Lector HiveCare

objetivo de maximizar las dimensiones para mejorar el acoplamiento con el tag. Por lo tanto, se fue variando el área hasta encontrar la geometría que reprodujera los parámetros eléctricos de la antena original. El proceso de optimización se realizó de forma iterativa con la herramienta *NFC Antenna Design Tool* de NXP, manteniendo los valores por defecto de los parámetros del material salvo el largo, el ancho, el número de vueltas (fijado en 1) y el calibre del conductor (AWG 28, el mínimo admitido por la herramienta).

La geometría resultante fue de $23,0 \times 30,0$ cm, con los siguientes parámetros:

- Inductancia: $L = 1256$ nH
- Capacidad parásita: $C = 2,0$ pF
- Resistencia serie: $R_S = 0,89 \Omega$
- Frecuencia de autorresonancia: $SR = 101$ MHz

Estos valores son muy próximos a los de la antena original, lo que indica que la red de adaptación existente puede ser reutilizada sin modificaciones. Como verificación adicional, los parámetros de la nueva antena se introdujeron en la herramienta *ST25R Antenna Matching Tool* de ST, confirmando que los valores de los componentes del circuito de adaptación de la antena coinciden con los del diseño original.

Cabe señalar que el cable utilizado en la fabricación real corresponde a AWG 25, valor que la herramienta de NXP no permite ingresar directamente (su mínimo es AWG 28). Por esta razón, los resultados de la calculadora representan únicamente una primera aproximación, y la antena fabricada debió ser caracterizada experimentalmente.

5.3.4. Verificación con VNA

La antena construida se caracterizó mediante el VNA. Los resultados se presentan en la Figura 5.6. Se observa claramente que la antena tiene un comportamiento inductivo a bajas frecuencias y que su frecuencia de autorresonancia es de aproximadamente 50,45 MHz, valor más bajo que el estimado por la calculadora (101 MHz), lo cual se atribuye a la mayor capacidad parásita del conductor de AWG 25 respecto al AWG 28 utilizado en el modelo.

A partir del valor de la impedancia medida a 13,56 MHz, donde $Z = 4,0 + j110,2 \Omega$, se obtiene la inductancia como:

$$L = \frac{\text{Im}(Z)}{2\pi f_0} = \frac{110,2}{2\pi \cdot 13,56 \times 10^6} \approx 1,29 \mu\text{H},$$

valor cercano al estimado previamente de $1,256 \mu\text{H}$.

5.3.5. Resultados de alcance

Con la nueva antena del lector conectada al X-NUCLEO-NFC08A1 y el tag modificado con la antena de dos vueltas, se realizaron nuevamente medidas de

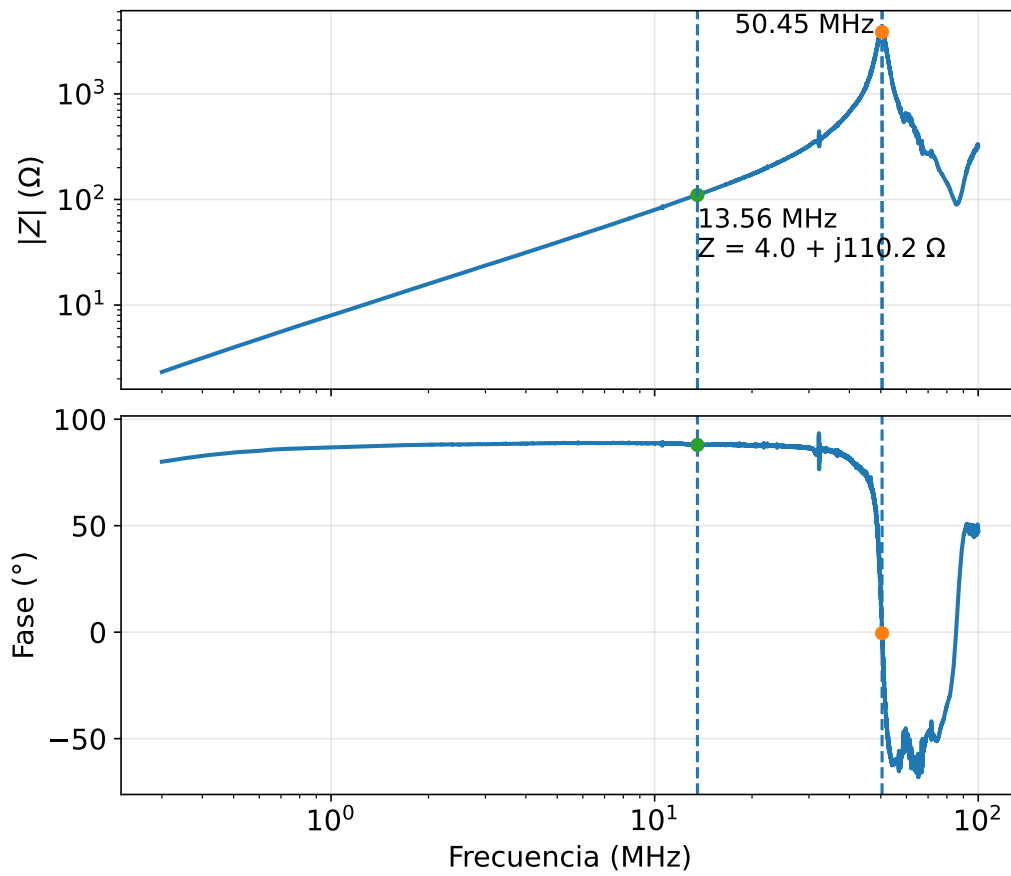


Figura 5.6: Módulo y fase de la impedancia de la antena del lector (una espira, sin capacitor), medidos con VNA. A 13,56 MHz la impedancia es predominantemente inductiva ($Z = 4,0 + j110,2 \Omega$), mientras que la autorresonancia se ubica en torno a los 50,45 MHz, donde el cruce por cero de la fase confirma que la impedancia es puramente real.

temperatura a diferentes distancias. La máxima distancia de comunicación alcanzada en estas condiciones fue de 31 cm, lo que representa una mejora considerable respecto a las configuraciones previas las cuales llegaban a unos pocos centímetros.

Capítulo 6

Hardware

En este capítulo se expondrá lo relativo al hardware del sistema. Este se puede dividir en dos componentes principales: el Marco HiveCare, desarrollado en la Sección 6.1 y el Lector HiveCare, desarrollado en la Sección 6.2. El primero incluye el diseño del *PCB (Printed Circuit Board)*, la integración del mismo con la antena y el montaje mecánico al marco. Con respecto al segundo, no consta de un diseño de PCB sino que está compuesto por diversos módulos que cubren todas las funcionalidades requeridas. Estos módulos deben contar con protección frente a todas las condiciones ambientales, por lo que estarán contenidos dentro de una caja estanca integrada a un sistema de montaje y la antena diseñada. El diseño del PCB se encuentra disponible en el repositorio: <https://gitlab.fing.edu.uy/hivecare/pfc-HiveCare/-/tree/main/hardware>.

6.1. Diseño del Marco HiveCare

El diseño del Marco HiveCare integra la comunicación con el lector y la interfaz con los sensores de temperatura. Para su implementación se utilizó el tag NTP5332, el cual permite comportarse como maestro de una interfaz I^2C (*Inter-Integrated Circuit*). Esta característica simplifica significativamente el diseño del sistema, ya que elimina la necesidad de incorporar un microcontrolador. De este modo, el circuito se reduce al tag *NFC (Near Field Communication)*, tres sensores de temperatura STTS22H y los componentes pasivos asociados.

6.1.1. Diseño de circuito

El circuito diseñado, como se presenta en la Figura 6.1, se puede separar en cuatro bloques principales: el circuito de adaptación de la antena, el tag NFC, el bus I^2C y los sensores de temperatura. Cabe mencionar que el circuito se completa externamente (fuera del PCB) con la antena, para ello se proveen dos orificios para soldarla.

Capítulo 6. Hardware



Figura 6.1: Conjunto de bloques que conforman el circuito diseñado para el Marco HiveCare.

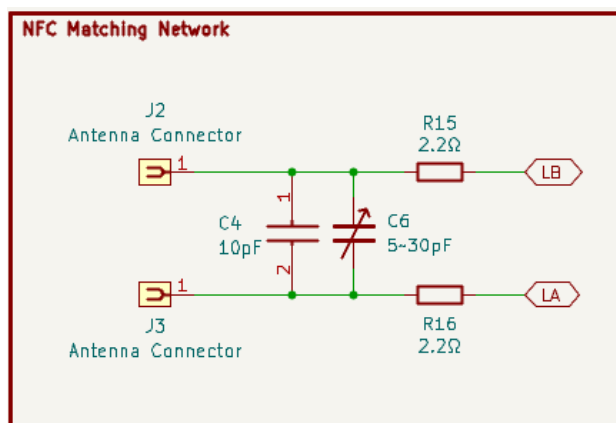


Figura 6.2: Circuito de adaptación de la antena diseñado para ajustar la frecuencia de resonancia a 13,56 MHz dadas las características de la antena diseñada (alambre acerado *AWG* (*American Wire Gauge*) 28 –aprox. 0,3 mm de diámetro–, dos vueltas y con un tamaño de 45 cm × 23 cm) y disminuir el factor de calidad con el fin de reducir la interferencia intersimbólica. *LA* y *LB* corresponden a las señales de entrada de antena del tag NTP5332.

Bloque Adaptación de antena

La red de adaptación de la antena consta de dos resistencias en serie a la antena y un capacitor en paralelo (ver Figura 6.2). Las resistencias en serie permiten disminuir el factor de calidad de la antena, reduciendo así las interferencias intersimbólicas. Por otro lado el capacitor en paralelo permite ajustar la frecuencia de resonancia a la deseada (13,56 MHz).

En la Figura 6.2, se observa que se dispuso un capacitor fijo y un capacitor variable. Este último es introducido con el objetivo de realizar un barrido de capacidad de forma sencilla, permitiendo ajustar la antena del tag de modo que resuene efectivamente a 13,56 MHz, maximizando así el acoplamiento inductivo y la transferencia de energía. Esto sirve únicamente como validación de que el capacitor hallado teóricamente es el correcto, una vez validado se elimina C6 y se introduce el C4 (C_{ext} en Capítulo 5) con la capacidad correspondiente.

El barrido se repitió para varias antenas, a partir de las cuales se extrajo el valor promedio de capacidad que maximiza las características mencionadas. Todos los tags fabricados quedan entonces con el capacitor C4 del valor hallado mediante el barrido: 10 pF.

Bloque Tag NFC

El bloque NFC Tag IC está basado en el tag NTP5332, encargado de la comunicación inalámbrica con el lector. Permite además la recolección y utilización de la energía del campo *RF* (*radio frequency*).

6.1. Diseño del Marco HiveCare

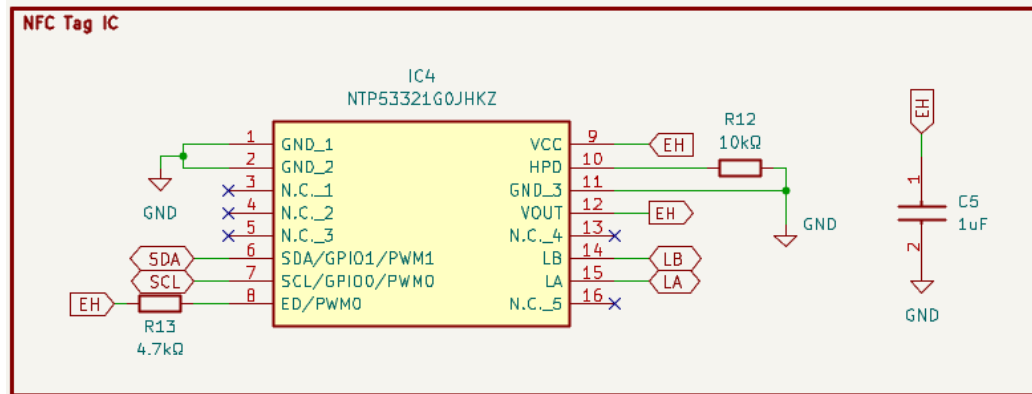


Figura 6.3: Circuito correspondiente al bloque *NFC Tag IC*. En él se observa el integrado (IC4) con sus señales y pasivos asociados. Sobre el lado derecho se puede apreciar el capacitor de desacople (C5).

El integrado opera de manera pasiva, alimentándose únicamente a través de la energía del campo RF generada por el lector. La señal de EH (*energy harvesting*) permite utilizar la energía recolectada sobrante para alimentar un circuito externo. Esta salida es entonces utilizada para alimentar el bloque *Temperature Sensors (I²C Bus)*, además de realimentar al propio integrado a través de VCC como se puede observar en la Figura 6.3. Esta alimentación es necesaria para poder habilitar funcionalidades extra en el integrado, como es el caso de la *SRAM (Static Random-Access Memory)*, necesaria para el uso de transferencias I²C. Con el fin de estabilizar la tensión interna durante la operación, se incluye un capacitor de desacople (C5) entre VCC y GND. Para el capacitor se eligió uno de dieléctrico X7R por su buen comportamiento para filtrado de ruido.

La comunicación con los sensores se da a través de la interfaz I²C, mediante las señales *SDA (Serial Data Line)* y *SCL (Serial Clock Line)*. El integrado en este caso se comporta como maestro en la comunicación, gestionando las lecturas y escrituras a los distintos sensores conectados al bus.

Por otro lado, se encuentran los pines *LA* y *LB* correspondientes a la entrada de la antena NFC. Estas entradas conectan el bloque con el de adaptación de antena.

Finalmente, el resto de los pines no mencionados corresponden a pines no utilizados en el sistema. Para estos pines no utilizados se tomó como referencia el circuito diseñado por *MikroElektronika* para la placa de desarrollo *NTAG 5 Link Click* [49].

Bloque Interfaz I²C

Este bloque está compuesto únicamente por las resistencias de *pull-up* de las líneas *SDA* y *SCL* como se muestra en la Figura 6.4. Dado que los dispositivos I²C presentan salidas *open-drain*, son necesarias dichas resistencias para definir el nivel lógico alto cuando ninguno de los dispositivos fuerza la línea a nivel bajo.

El valor de las resistencias debe ser tal que el tiempo de subida de las señales sea menor que el límite establecido en la especificación (1000 ns para *standar mo-*

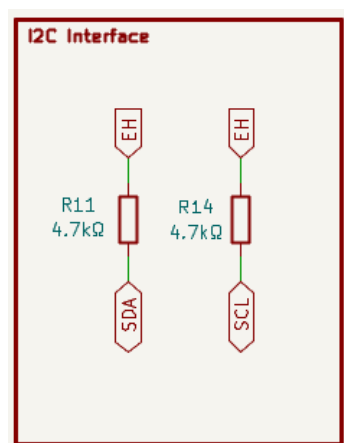


Figura 6.4: Circuito correspondiente a la interfaz I²C. Se puede observar en él las resistencias de *pull-up* correspondientes al bus de datos (SDA) y al bus de reloj (SCL).

de [50]). El tiempo de subida está determinado por el circuito RC que se forma entre la resistencia de *pull-up* y la capacidad de la línea. Se hicieron estimaciones de capacidad de la línea en base a la capacitancia de entrada del integrado NTP5332 reportada por la hoja de datos (3,5 pF [51]), estimando del orden de la de los sensores de temperatura y calculando la de las pistas, ver Apéndice B. Con esto se encontró que el valor de resistencia de 4,7 kΩ corresponde a un valor que logra un buen compromiso para el cumplimiento del estándar.

Bloque Sensores de temperatura

Finalmente, el bloque correspondiente a los sensores de temperatura, mostrado en la Figura 6.5, se compone de tres dispositivos conectados al mismo bus I²C. Cada sensor cuenta con su capacitor de desacople entre EH y GND, estabilizando así la tensión de entrada, disminuyendo fluctuaciones y ruido. Al igual que el capacitor de desacople utilizado para el integrado NTP5332, estos capacitores de desacople fueron elegidos con dieléctrico X7R. Respecto al valor de estos capacitores, se respetó el sugerido por el fabricante, STMicroelectronics [43].

Los sensores son alimentados a través de la energía proveniente del campo RF, puesta a disposición por el tag NTP5332 en la señal de EH. Esta arquitectura hace que la característica de bajo consumo de los sensores STTS22H tenga un valor importante en el diseño. La energía está limitada, y drenajes de corriente elevados pueden provocar un corte de alimentación por parte del tag NTP5332.

Dado que los tres sensores comparten el mismo bus I²C, es necesario establecer las direcciones distintas. La dirección queda determinada en función de la tensión impuesta en el pin ADDR de cada sensor. Se pueden establecer hasta cuatro direcciones distintas según se conecte el pin a: VDD, una resistencia de pull-up de 15 kΩ, una resistencia de pull-up 56 kΩ, y GND, correspondiente a las direcciones 0x70, 0x78, 0x7C y 0x7E, respectivamente [43]. Las resistencias se recomiendan que sean al 5 %.

Con respecto al pin *ALERT/INT* de cada sensor, se incluyó una resistencia de

6.1. Diseño del Marco HiveCare

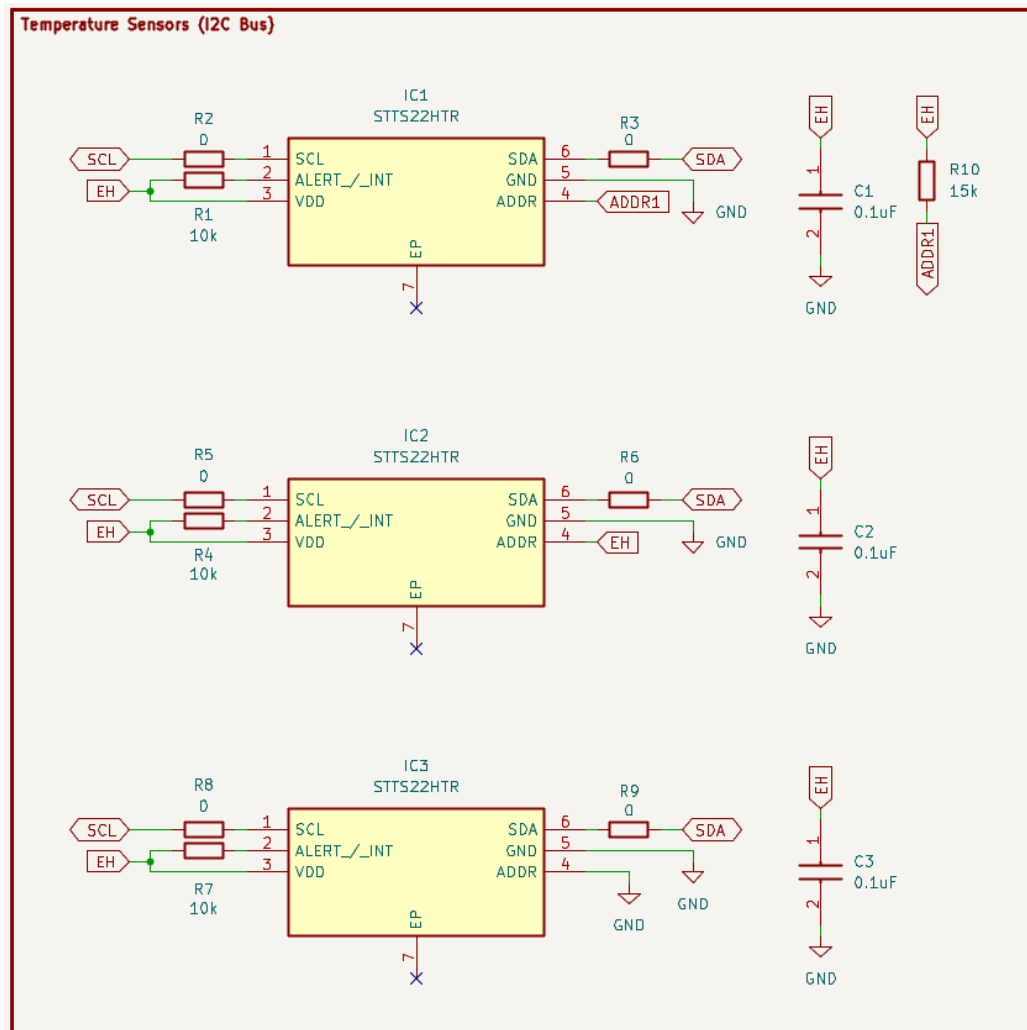


Figura 6.5: Circuito correspondiente al bloque Sensores de temperatura. En él se muestran los tres sensores de temperatura STTS22H. Se observan resistencias de 0Ω en las líneas *SDA* y *SCL*, utilizadas como puentes de soldadura auxiliares en el *layout*. En el lado derecho de la figura se observan los capacitores de desacople y la resistencia utilizada para establecer la dirección estática del integrado *IC1*. Los demás integrados establecen su dirección estática directamente con GND o EH. Asociado al pin de *ALERT/_INT* de cada integrado se encuentra una resistencia de *pull-up*.

pull-up para su uso como recomienda el fabricante [43].

6.1.2. Diseño de layout

A continuación se detallan los distintos criterios de diseño que fueron adoptados. Estos abarcan desde la geometría de la PCB para minimizar su impacto en la colmena, hasta consideraciones eléctricas relacionadas con el ruteo, desacople e integración de la antena, incluyendo además restricciones mecánicas y de montaje.

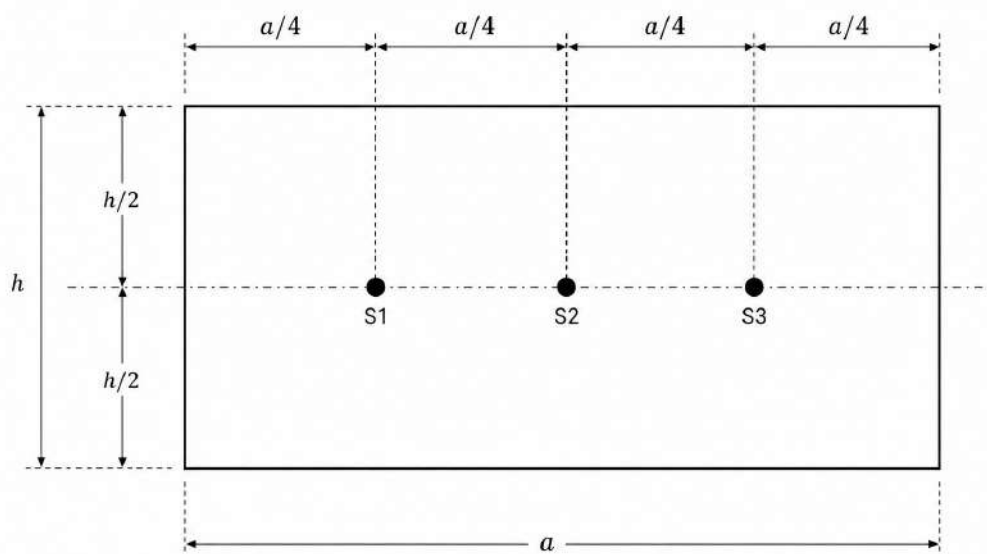


Figura 6.6: Ubicación de los sensores de temperatura en el marco. Se observa que los sensores (S1, S2 y S3) se encuentran centrados verticalmente y equiespaciados horizontalmente.

Integración mecánica y restricciones de diseño

La placa fue diseñada para ser introducida en el interior de un marco de columna de tipo Langstroth. La misma debía permitir adquirir la temperatura en tres puntos representativos. Estos puntos fueron elegidos en conjunto con el apicultor, quedando localizados sobre la línea horizontal central del marco, equidistantes entre sí y respecto a los bordes, como se muestra en la Figura 6.6.

Con respecto al tamaño, la PCB debe ser lo más reducida posible en área para minimizar la pérdida de celdas. Se recuerda al lector, que las abejas no construyen sobre elementos extraños, por lo que cuanto mayor sea el área ocupada por la placa, mayor será la pérdida de capacidad del marco para las abejas y por ende, para el apicultor. En este sentido, se diseñó la PCB como una “tira fina” que conecta los tres sensores de temperatura desde un borde del marco hasta el último sensor. Esto sería, en la Figura 6.6, desde el borde izquierdo hasta S3. Esto fue pensado para que la PCB pueda ser colocada perpendicularmente al plano del marco, de forma que el área afectada queda determinada por el largo de la placa y el espesor del *FR-4* (*Flame Retardant-4*) (material compuesto de Epoxi reforzado con fibra de vidrio utilizado como sustrato en PCBs) junto con la altura de los componentes. De esta forma se pierde únicamente una tira de celdas desde el borde del marco hasta la localización del último sensor.

Para facilitar el anclaje de la PCB al marco y aumentar la robustez de la solución se decidió utilizar marcos de plástico en lugar de un marco convencional de madera. Este tipo de marcos, como se observa en la Figura 6.7b, presenta la ventaja

6.1. Diseño del Marco HiveCare



Figura 6.7: Marcos de colmena de distinto material.

que es una única pieza sólida a la que resulta más sencillo incorporar elementos frente a un marco de madera (Figura 6.7a), el cual está compuesto únicamente por el recuadro y se le debe adosar la lámina de cera.

El marco utilizado, presenta un reborde de aproximadamente 1 cm de ancho. Este espacio corresponde a área no utilizada por la abeja, por lo que cualquier elemento en ella no implica pérdida de área útil. Por este motivo, resulta conveniente utilizar este espacio para introducir la mayor cantidad de componentes posible.

Arquitectura de la PCB

La PCB se dividió en dos regiones principales, una sección rectangular que concentra los bloques Adaptación de antena, Tag NFC e Interfaz I²C, y una sección alargada y fina con el bloque Sensores de temperatura. Esta configuración permite ubicar la sección rectangular dentro del reborde del marco, minimizando el área útil del marco afectada. La sección alargada permite localizar los sensores de temperatura en los puntos de medición definidos.

Integración de la antena

Con respecto a la antena, se aprovechó el reborde mencionado para enhebrarla por el interior del mismo. Esto evita interferencia tanto en el área útil del marco así como en la manipulación del marco. Como fue mencionado en el Capítulo 5, la misma consta de dos vueltas del tamaño del marco.

Como material se utilizó alambre acerado, mismo material que se utiliza en los marcos tradicionales de madera para fijar la lámina de cera. Esto evita el riesgo de introducir un material no probado en colmenas disminuyendo el riesgo de interferir en el equilibrio biológico de la misma.

Montaje mecánico

Para asegurar un montaje firme de la PCB al marco, se diseñaron tres orejuelas a la altura de cada sensor de temperatura, como se observa en la Figura 6.8. Esto

Capítulo 6. Hardware

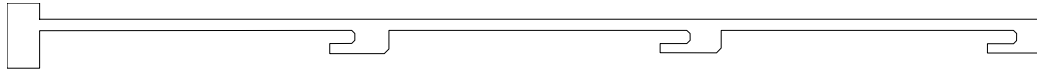
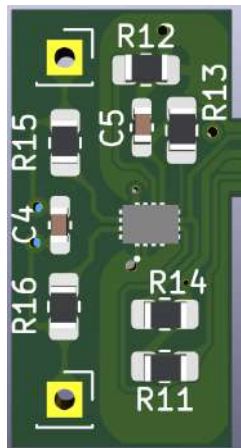
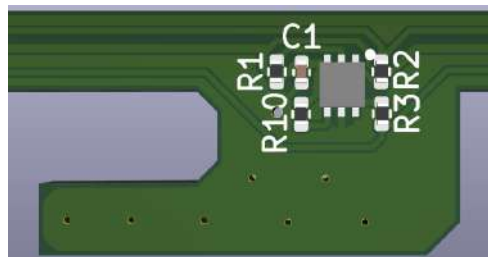


Figura 6.8: Contorno de la PCB. Se puede observar, en el lado izquierdo de la figura, el área rectangular diseñada para alojar los bloques Adaptación de antena, Tag NFC e Interfaz I²C. Se aprecian también las tres orejuelas diseñadas para el montaje mecánico, ubicadas en los puntos de alojamiento de los sensores de temperatura.



(a) Bloques *NFC Matching Network*, *NFC Tag IC* e *I²C Interface*.



(b) Porción del bloque *Temperature Sensors (I²C Bus)* y orejuela de encastre.

Figura 6.9: Porciones de la PCB del sistema: sección empotrada en el reborde del marco (a) y sección de sensores de temperatura (b).

permite, fijar la placa haciéndole cuatro ranuras al marco de plástico, e introduciendo las orejuelas y la zona rectangular a través de las mismos. Una vez introducidas, la PCB se desliza hacia el reborde hasta que la zona rectangular alcance el reborde exterior. Una vez en posición la antena es soldada, quedando así, la PCB fija en su lugar.

Selección de componentes

Para los componentes pasivos asociados al bloque de sensores de temperatura se seleccionaron encapsulados 0402, con el objetivo de minimizar el área ocupada. En el resto de los bloques, donde la restricción de espacio es menor, se utilizaron encapsulados 0603 y 0805, facilitando su manipulación ante un eventual reemplazo durante la etapa de debuggeo.

Planos de tierra

A la PCB se le añadieron planos de tierra tanto en la capa inferior como en la superior. Esto resulta útil para reducir el ruido entre señales, proporcionar un camino seguro de baja impedancia para las corrientes de retorno y establecer una referencia estable a todo el circuito.

Los planos de tierra fueron excluidos de la región correspondiente al bloque *NFC*

6.1. Diseño del Marco HiveCare

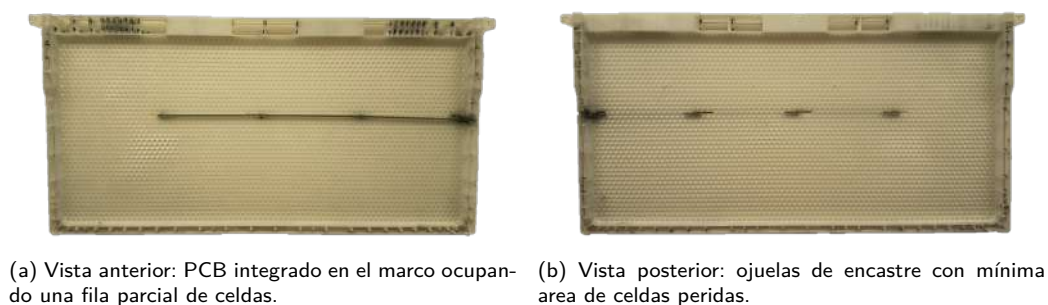


Figura 6.10: Fotorgrafías del Marco HiveCare: vistas anterior y posterior.

Matching Network, observable en la Figura 6.9a. Esto se debe a que el plano de tierra puede modificar los parámetros de la antena, afectando su comportamiento debido a cambios en la inductancia, el factor de calidad (Q) y la frecuencia de resonancia.

Ambos planos de tierra fueron conectados mediante *via stitching* con el fin de mejorar la continuidad del plano y reducir posibles efectos de *EMI* (*Electromagnetic Interference*). Respecto a las vías, todas fueron generadas como *tented*, es decir, cubiertas con máscara de soldadura, con el fin de preservar la vida útil de la PCB evitando exponer directamente el cobre a los agentes del ambiente.

Ruteo de señales

Referente al circuito de adaptación de la antena, el mismo fue diseñado de manera simétrica para ambas terminales, como se observa en la Figura 6.9a (pistas entre R15, R16, C4 y orificios de conexión de antena). De esta manera, se asegura que las capacidades y resistencias parásitas sean las mismas en ambos caminos, mejorando así la transferencia de potencia.

Por otra parte, se incluyen en el diseño resistencias de 0Ω en serie a las líneas *SDA* y *SCL*. Esto no cumple una función eléctrica, sino que fueron incorporadas con el fin de permitir el ruteo de pistas de forma más compacta, utilizando las resistencias como puentes. Esto evita agregar vías adicionales y complejizar el *layout* de la capa inferior a la vez que se logra simplificar el *layout* en la capa superior, permitiendo un ruteo más compacto.

Desacople

Los capacitores de desacople fueron localizados lo más cercano posible a la entrada de alimentación de cada componente (observar C5 en Figura 6.9a y C1 en Figura 6.9b), asegurando así en cada componente una alimentación estable, menos ruidosa y más robusta a fluctuaciones.

Esto resulta de fundamental importancia teniendo en cuenta que el circuito es alimentado a través de la señal EH del tag NFC, que como se mostró en el Capítulo 4, varía según la corriente drenada.

6.1.3. Prototipo integrado

En la Figura 6.10 se muestra la integración de la PCB fabricada con el marco de plástico utilizado. El diseño satisface los requerimientos, los sensores se ubican equiespaciadamente a lo largo del marco, afectando en la mínima área posible (una única tira de celdas). Además el mecanismo de montaje permite que la PCB se mantenga inamovible del lugar, evitando desplazamientos accidentales durante el manejo del marco. La antena, por su parte, se encuentra dentro de un área no útil del marco, evitando pérdidas de celdas y no se modificando estructural ni funcionalmente el marco. Posteriormente al ensamblado de la antena y el PCB en el marco, se procede a realizar un baño en cera, tanto para facilitar que la abeja construya sobre el plástico, como para aislar parcialmente los circuitos y reducir el riesgo de no aceptación del marco por parte de las abejas.

Se concluye que el diseño final cumple con los requerimientos planteados inicialmente, permitiendo la medición de temperatura, operando de manera pasiva mediante energy harvesting, minimizando la interferencia con el área útil del marco e integrándose mecánicamente de manera compatible con el entorno apícola. Detalles adicionales sobre el proceso de fabricación, ensamblaje y soldadura de las PCB desarrolladas se presentan en el Apéndice C.

6.2. Diseño del Lector HiveCare

El lector fue implementado utilizando diferentes placas y módulos de desarrollo. Como unidad principal de procesamiento se empleó la placa *NUCLEO-L476RG* que aloja al microcontrolador *STM32L476RG*. Para la comunicación NFC se utilizó la placa *X-NUCLEO-NFC08A1* que incluye el lector NFC *ST25R3916B*. La conectividad celular se implementó mediante el módulo *NB IoT 2 Click* que presenta el módulo celular *BC66 (Módulo NB-IoT)* y un conector para antena SMA (*SubMiniature version A*).

Adicionalmente se utilizó el *Load Switch* digital *psw03c*, un convertor DC-DC (Step Up) *MT3608* y el módulo de sensor de temperatura *STTS22H* de Sparkfun. Para la gestión y carga de energía se utilizó el módulo *Adafruit Universal USB / DC / Solar Lithium Ion/Polymer Charger*.

En la Figura 6.11 se presentan los principales componentes del sistema y sus interconexiones. El núcleo del sistema es el microcontrolador *STM32L476RG*, encargado de intercambiar datos con el sensor de temperatura, el módulo celular *Narrowband Internet of Things* y el lector NFC. Asimismo, el microcontrolador controla el *load switch* con el objetivo de optimizar la administración de energía del sistema.

La conexión entre el módulo de desarrollo del Lector NFC y el microcontrolador es directa ya que ambas placas tienen integrado un ARDUINO conector. Para el módulo celular se utilizó un *Arduino UNO click shield* que mapea los pines del *ARDUINO connector* a dos conectores mikroBUS™. En el caso del *load switch*, el *step-up*, el sensor de temperatura y el módulo de batería se conectan mediante cables a distintos pines del microcontrolador. En la Figura 6.12 se detallan estas

6.2. Diseño del Lector HiveCare

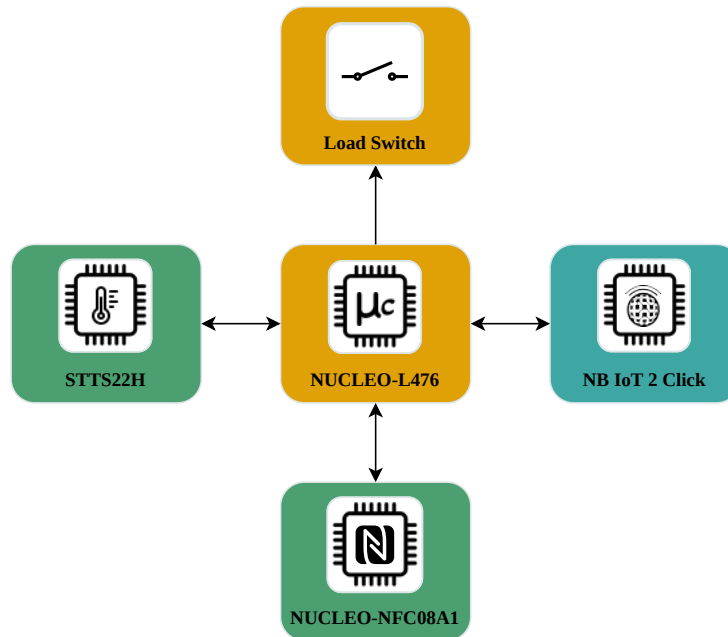


Figura 6.11: Componentes principales del lector. Se puede observar el microcontrolador en el centro, comunicándose con los módulos de temperatura (STTS22H), NFC (NUCLEO-NFC08A1) y NB-IoT (NB IoT 2 Click). A su vez se muestra el microcontrolador controlando el *Load Switch* encargado de la energización de los módulos previamente mencionados. Se observan tres colores distintos, anaranjado agrupando los componentes generales del sistema, en verde los encargados de adquisición de datos y en turquesa el módulo relativo a la telemetría.

conexiones y se resumen en la Tabla 6.1.

La energización de los módulos conectados al microcontrolador se realiza a través del load switch, el cual es apagado en el estado de bajo consumo, con el fin de prevenir cualquier consumo extra en este estado. En la Figura 6.13 se muestra cómo los distintos componentes del Lector HiveCare son alimentados. Dado que la tensión de alimentación entregada por el módulo de batería es menor a 5 V, es necesaria la inclusión de un convertidor DC-DC (*Step Up*) para poder alimentar a 5 V los módulos que lo requieren. En la figura se pueden observar tres niveles principales, el primero corresponde a los componentes encargados de administrar la energía disponible. En ese nivel, identificado de color violeta, se encuentra el panel solar, el módulo de batería y la batería. El módulo de batería entrega la energía a la placa del microcontrolador que, mediante un regulador de tensión, distribuye un voltaje estable a 3,3 V. Ese voltaje es entregado a los demás módulos del sistema si el *Load Switch* se encuentra cerrado. En este mismo nivel, identificado con el color anaranjado, referenciando a componentes generales del sistema, se encuentra además el *Step-Up* que se encarga de brindar 5 V al módulo que lo requiera, en este caso el lector NFC. Finalmente, en el nivel inferior se encuentran los módulos de sensor de temperatura, NB-IoT y NFC, respetando los colores

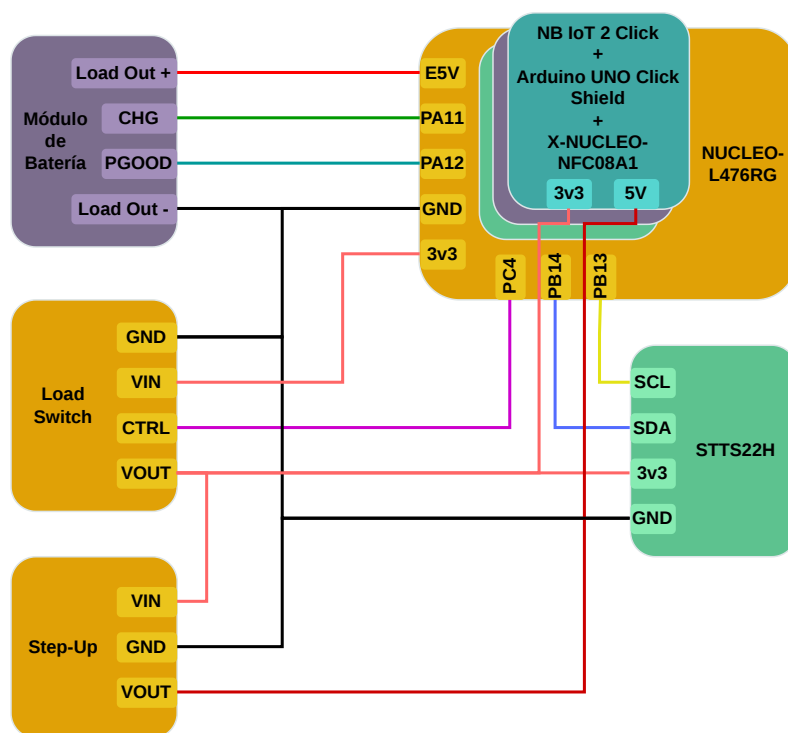


Figura 6.12: Diagrama de conexiones entre los módulos que conforman el Lector HiveCare. Los tres módulos sobre la placa NUCLEO-L476RG se conectan a ella mediante el *ARDUINO connector*. 3v3 y 5V en dichas placas se encuentran aislados de los pines correspondientes en la placa NUCLEO-L476RG.

definidos previamente en la Figura 6.11. Los tres módulos comparten la tensión de 3,3 V entregada a través del *Load Switch*, el módulo NFC recibe adicionalmente 5 V, necesarios para aumentar la potencia de transmisión del lector.

6.2.1. Intervenciones en los módulos

Los módulos en su mayoría fueron intervenidos, con el fin de lograr la compatibilidad entre todos, evitando principalmente conflictos en las comunicaciones. Además, se realizaron modificaciones para disminuir el consumo energético apuntando a una mayor autonomía.

El módulo celular se controla mediante comandos AT a través de una interfaz UART. Sin embargo, la placa NUCLEO-L746RG utiliza la misma interfaz USART (USART2) tanto para la comunicación serial con la PC, como para la comunicación *UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)* del *ARDUINO connector*. Por defecto se encuentra conectada la USART a la PC mediante el ST-LINK MCU, el cual es el programador integrado en la placa. Para redirigirla al *ARDUINO connector* se debe abrir el *Solder Bridge* 13 y 14 (SB13 y SB14) y cerrar el SB62

6.2. Diseño del Lector HiveCare

Tabla 6.1: Conexiones entre módulos.

Módulo	Pin	Pin	Módulo
Batería	Load Out +	E5V	NUCLEO-L476RG
	Load Out -	GND	-
	CHG	PA11	NUCLEO-L476RG
	PGOOD	PA12	NUCLEO-L476RG
Load Switch	VIN	3V3	NUCLEO-L476RG
	GND	GND	-
	CTRL	PC4	NUCLEO-L476RG
	VOUT	3V3	Arduino UNO click shield
Step-Up	VIN	VOUT	Load Switch
	GND	GND	-
	VOUT	5V	Arduino UNO click shield
Temperatura	GND	GND	-
	3V3	3V3	Arduino UNO click shield
	SDA	PB14	NUCLEO-L476RG
	SCL	PB13	NUCLEO-L476RG

y SB63.

El NUCLEO-L476RG se alimenta a través de la entrada E5V, posicionando el *jumper* JP5 en E5V, ya que el voltaje de salida del módulo de batería es de 3,7 V superando el voltaje máximo de la entrada 3v3 de la NUCLEO-L476RG.

Por otro lado, se eliminó la alimentación a través de la fuente externa del ST-LINK dado que no son necesarios ni el programador ni el *debugger* para la aplicación. Para lograr esta desenergización se eliminó el diodo D3 como método sencillo de abrir el circuito de alimentación desde E5V, dejando como único camino de alimentación al ST-LINK el U5V (alimentación a través de USB). En la Figura 6.14 se pueden observar los dos caminos de energización del ST-LINK (E5V y U5V).

Acompañando ese cambio, se retira el *Solder Bridge* 12 (SB12) que conecta la señal NRST del ST-LINK con el MCU L476RG. Esto es necesario ya que la señal

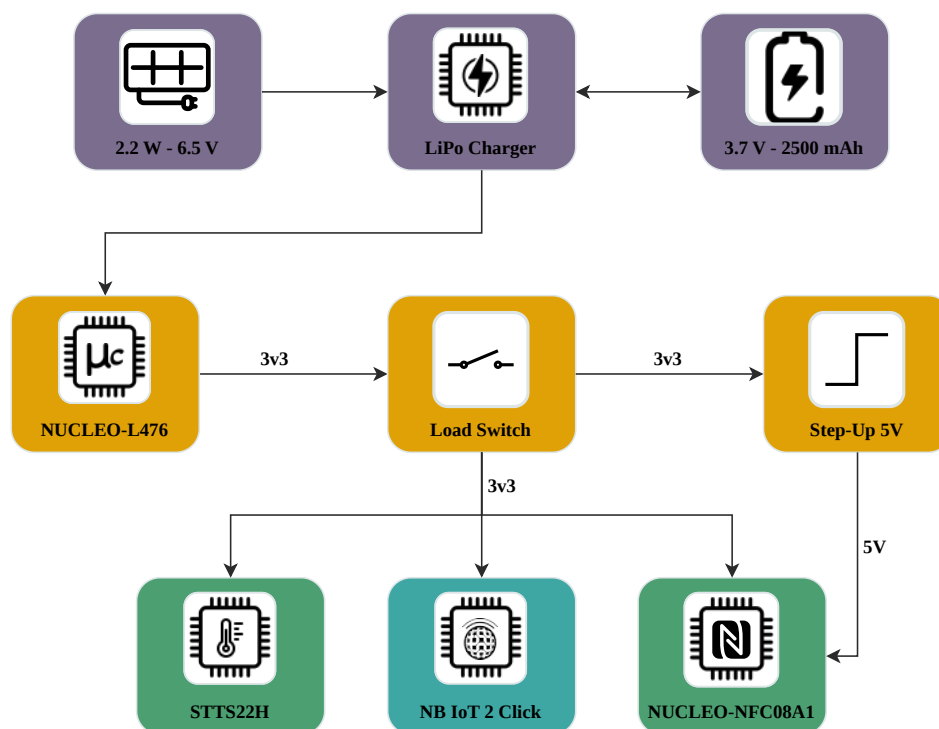


Figura 6.13: Diagrama de energización del lector. El sistema se alimenta mediante un panel solar, un cargador LiPo y una batería, que proveen energía al microcontrolador y a los distintos módulos del sistema. La distribución de 3,3 V se realiza a través de un Load Switch, mientras que un convertidor Step-Up genera 5 V para el módulo NFC, necesarios para incrementar la potencia de transmisión del lector.

es manejada por el ST-LINK, que, al quedar desenergizado, la señal queda en un estado indeterminado, provocando dificultades en el arranque del microcontrolador. En caso de que se desee utilizar el programador deberá realizarse la conexión del NRST manualmente. Para ello, se encuentra accesible esta señal en el pin 5 del CN4, la cual deberá conectarse al pin RESET del microcontrolador, localizado en el pin 14 del CN7.

Finalmente, alineado también con una reducción en el consumo se extrajo la resistencia R32 para evitar el consumo en la LED LD3, conectada directamente entre 5v y GND en serie con la resistencia R32.

Por otro lado, se separaron los pines 3V3 y 5V del ARDUINO connector del lector NFC para que éstos sean manejados por el Load Switch. Por otra parte, este módulo trae una antena NFC integrada, la misma fue eliminada y sustituida con la antena diseñada.

El módulo celular, como ya fue mencionado utiliza la interfaz UART para comunicarse con el microcontrolador. Sin embargo, el módulo presenta la posibilidad de ser controlado a través de *SPI* (*Serial Peripheral Interface*). La interfaz SPI presente en el *ARDUINO connector* es utilizada para la comunicación entre el

6.2. Diseño del Lector HiveCare

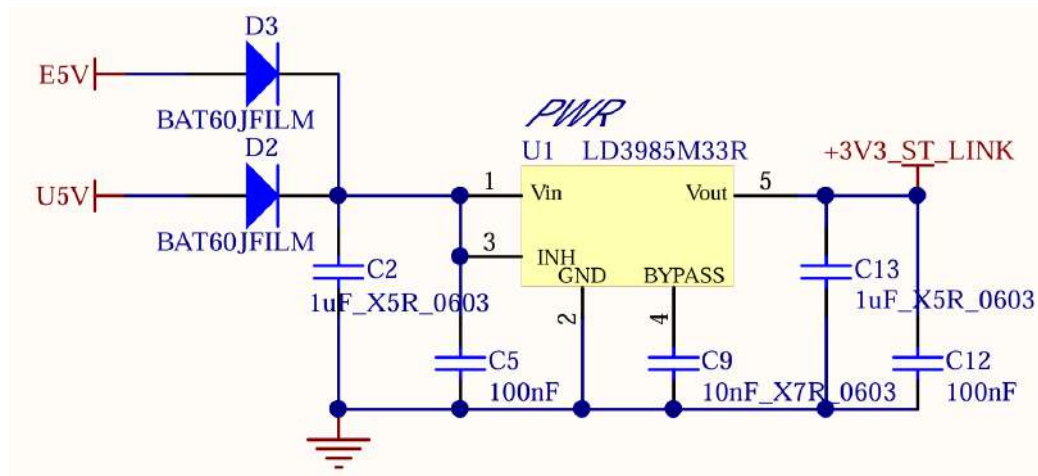


Figura 6.14: Circuito de energización del ST-LINK. Extraído del esquemático de la placa STM32 NUCLEO-L476RG [52].

microcontrolador y el lector NFC. Esto genera interferencias al módulo celular, perjudicando su correcto funcionamiento. Por este motivo fueron removidos los pines correspondientes a SPI del módulo celular (CS, SCK, SDO y SDI).

Finalmente, en los módulos celular, *load switch* y lector NFC se eliminan resistencias asociadas a LEDs de *power* para reducir el consumo. En el caso del módulo celular se extrae la resistencia R1 y en el caso del *load switch* es la resistencia de valor 10 k Ω que se conecta en serie a la LED roja (no presenta *designator* por parte del fabricante). Por otro lado, se elimina la resistencia R100 del lector NFC que regula la corriente que pasa por la led de *power*, eliminando así el consumo en el LED100. En la Tabla 6.2 se resumen las modificaciones realizadas a los diferentes módulos.

6.2.2. Diseño de la alimentación

Para la alimentación del sistema se dispuso de un kit compuesto por una batería recargable de polímero de litio y un panel solar, con el objetivo de evaluar la factibilidad de lograr un funcionamiento autónomo sin necesidad de intervención externa.

La batería utilizada presenta una capacidad típica de 2500 mAh y una tensión nominal de 3,7 V, mientras que el panel solar tiene una tensión de circuito abierto de 7,7 V y una corriente pico de 340 mA, lo que corresponde a una potencia máxima de aproximadamente 2,2 W en condiciones ideales.

A partir de la disponibilidad de este kit, se procedió a analizar si sus características resultan suficientes para abastecer energéticamente al sistema. Para ello, en primera instancia se realizaron mediciones de consumo, utilizando un PPK2 (Power Profiler Kit 2), del circuito completo, incluyendo el consumo del *LiPo Charger*. Se utilizó el PPK2 como fuente sustituyendo la batería, y sin incluir el panel solar, alimentando a un voltaje de 4 V. Las mediciones se presentan en la Figura 6.15.

Capítulo 6. Hardware

Tabla 6.2: Resumen de modificaciones realizadas en los módulos

Módulo	Modificación	Objetivo
NUCLEO-L476RG	SB13, SB14 = OFF; SB62, SB63 = ON	Redirección de USART2 hacia <i>ARDUINO connector</i> (UART módulo celular).
	JP5 = E5V	Alimentación externa desde E5V.
	D3 = extraído; SB12 = OFF	Desenergización y aislamiento del ST-LINK (↓ consumo).
	R32 extraída	Eliminación de LED LD3 (↓ consumo)
Lector NFC	Pines 3V3, 5V cortados	Evitar alimentación directa en bajo consumo.
	R100 extraída	Eliminación LED power (↓ consumo)
Módulo celular	CS, SCK, SDO, SDI cortados	Eliminación de interferencia con bus SPI del lector NFC.
	R1 extraída	Eliminación LED power (↓ consumo)
Load Switch	R(LED) extraída	Eliminación LED power (↓ consumo)

A partir de estas mediciones, se estimó la autonomía con la batería disponible y, posteriormente, se evaluó si la energía generada por el panel solar permite sostener dicha autonomía en el tiempo.

De la captura de consumo se extrajo el valor medio de consumo en activo y el valor medio de consumo en estado de bajo consumo, siendo estos 32 mA y 2,1 mA respectivamente. Además se mide el tiempo en el que está en activo y el tiempo inactivo, siendo estos aproximadamente de 20 s y 40 s respectivamente. Tomando esto como peor caso (mínimo periodo establecible a través de la interfaz gráfica), se extrae de la medida de consumo el correspondiente a un período, siendo éste de 11,20 mA.

A partir de este valor, se obtiene el consumo diario como:

$$Q_{diario} = 11,20 \text{ mA} \cdot 24 \text{ h} \approx 268,8 \text{ mAh/día.}$$

Considerando una batería de polímero de litio con una capacidad típica de 2500 mAh, y considerando un margen de seguridad, definido por el grupo del 60 %, por pérdidas y envejecimiento, la autonomía del sistema sin recarga se estima como:

$$\text{Autonomía} = \frac{2500 \text{ mAh} \cdot 0,6}{268,8 \text{ mAh/día}} \approx 5,6 \text{ días.}$$

6.2. Diseño del Lector HiveCare

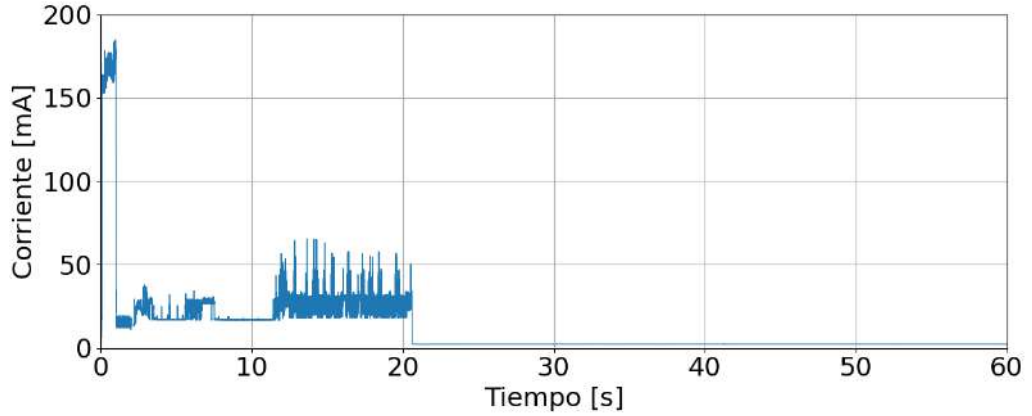


Figura 6.15: Medidas de consumo del sistema con un período establecido en un minuto. Se observa el período de operación del sistema, con un consumo alto, del orden de los 150 mA correspondiente a las lecturas NFC, seguido de un consumo menor, de aproximadamente 25 mA de media, correspondiente a la transmisión de datos mediante NB-IoT, y finalmente un período de consumo casi nulo correspondiente al microcontrolador en modo de bajo consumo y los módulos desenergizados.

Este resultado indica que, sin recarga a través del panel solar, el sistema puede operar durante aproximadamente cuatro días.

Por otro lado, el panel solar seleccionado presenta una corriente pico de 340 mA en condiciones ideales. Asumiendo un promedio de cuatro horas de irradiación solar efectiva por día, la carga diaria generada se estima como:

$$Q_{\text{solar}} = 340 \text{ mA} \cdot 4 \text{ h} = 1360 \text{ mAh/día.}$$

Sin embargo, considerando pérdidas asociadas al sistema de carga, eficiencia del panel y condiciones ambientales no ideales, se estima un margen de seguridad del 50 %, pasando entonces a tener una carga generada efectiva de:

$$Q_{\text{solar,eff}} \approx 680 \text{ mAh/día.}$$

Dado que la energía generada supera ampliamente el consumo diario del sistema ($680 \text{ mAh/día} > 268,8 \text{ mAh/día}$), se concluye que la solución propuesta resulta energéticamente viable, permitiendo un funcionamiento autónomo sostenido en el tiempo bajo condiciones normales de operación.

Si se considera el escenario en invierno, la cantidad de energía extraíble del panel es significativamente menor. Si se toma como peor caso un promedio de dos horas de irradiación solar efectiva por día, estimados con la herramienta [53], la carga diaria efectiva generada por el panel es de 340 mAh/día. Se concluye entonces que el sistema es energéticamente viable en condiciones invernales. Se nota que en estas condiciones la energía entregada se acerca a la consumida por día.

Sin embargo, se recuerda que estos cálculos fueron realizados para un período de lectura de un minuto. No es menor mencionar, que la actividad de las abejas en invierno es considerablemente menor que en verano [54], por lo que, aumentar



Figura 6.16: Instalación del lector en una colmena, incluyendo la caja estanca con los módulos electrónicos, el panel solar y la estructura de fijación utilizada para el montaje del dispositivo.

el período de lecturas en esta época del año no resultaría en una disminución de información para la aplicación.

6.2.3. Construcción mecánica

El dispositivo en su completitud debe estar preparado para la exposición a la intemperie, debiendo soportar las condiciones que ello establece. Adicionalmente, debe ser fácilmente acoplable y desacoplable a una colmena. Teniendo esto presente se realizó el diseño del dispositivo externo.

En la Figura 6.16 se puede apreciar el Lector HiveCare colgado a una colmena. Los componentes electrónicos se alojan en el interior de una caja estanca IP65, resolviendo así el problema de la lluvia, el polvo y cualquier agente externo que pueda interferir en el funcionamiento eléctrico del lector. Esta caja fue fijada a una madera rectangular del tamaño del lateral de la colmena al cual será acoplado. A esta madera se le añadieron dos U de metal en la parte superior de la misma en la cara opuesta a la caja estanca que permiten colgar el dispositivo en la colmena fácilmente.

6.2. Diseño del Lector HiveCare

En la cara opuesta a la caja estanca de la madera se fijó la antena NFC, de esta forma la misma queda lo más cercano posible al interior de la colmena. La antena ingresa a la caja estanca a través de tres orificios sellados con prensacables para no perder el grado de protección IP. Dos orificios son utilizados para los terminales de la antena y el tercero corresponde al punto medio de la antena, requerido por el circuito de adaptación. La antena fue realizada con cable de cobre de AWG 25 engomado, esto se corresponde con la antena diseñada y previene el deterioro de la misma al no estar el cobre expuesto.

Finalmente, en la parte superior de la caja estanca, amurado a la madera, se encuentra el panel solar que permite la recarga de la batería. Este cable ingresa a la caja estanca de igual manera que los ya mencionados cables de la antena.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 7

Firmware

A continuación se detallará el firmware desarrollado. Si bien se desarrolló firmware relativo a cada configuración de las analizadas en el Capítulo 4 con el fin de evaluar cada una y elegir la más indicada, en este capítulo se exponen los detalles del firmware desarrollado para la configuración elegida (Lector ST25R3916B, tag NTP5332 y sensores de temperatura STTS22H). En la Sección 7.1 se detalla el flujo lógico del código, mientras que en la Sección 7.2 se detalla cómo es la arquitectura de capas que se definió. Por su parte, la Sección 7.3 brinda información sobre los diversos parámetros configurables que son expuestos en el firmware y finalmente, en la Sección 7.4 se concluye acerca de la portabilidad, escalabilidad y extensibilidad de la solución. La documentación Doxygen se encuentra disponible en <https://hivecare.pages.fing.edu.uy/pfc-HiveCare>. El desarrollo de la infraestructura necesaria para su publicación y renderización en la página web (Sphinx, Breathe, CSS y JavaScript) fue asistido por GitHub Copilot (GitHub). El repositorio con el firmware desarrollado se encuentra en <https://gitlab.fing.edu.uy/hivecare/pfc-HiveCare/-/tree/main/firmware>.

El firmware fue compilado y flasheado al microcontrolador a través de la aplicación STM32CubeIDE (v1.18.1). Para las configuraciones de periféricos, relojes y puertos se utilizó el archivo `.ioc` que permite, mediante una interfaz gráfica, modificar estos parámetros y generar o actualizar el código automáticamente en función de los cambios.

Como punto de partida del firmware, se utilizó la aplicación STM32CubeMX (v6.14.1). Esta permite seleccionar el microcontrolador a utilizar, configurarle los periféricos, puertos, relojes, entre otras cosas, y generar el código relativo al microcontrolador, con todos los *drivers* necesarios y las inicializaciones de los periféricos seleccionados con la configuración elegida.

7.1. Sistema

Al sistema estar compuesto por el Lector, tag NXP y sensor de temperatura I^2C (*Inter-Integrated Circuit*), todo el firmware se encuentra centralizado en el Lector HiveCare. Esto es posible gracias a que la comunicación I^2C entre el tag y

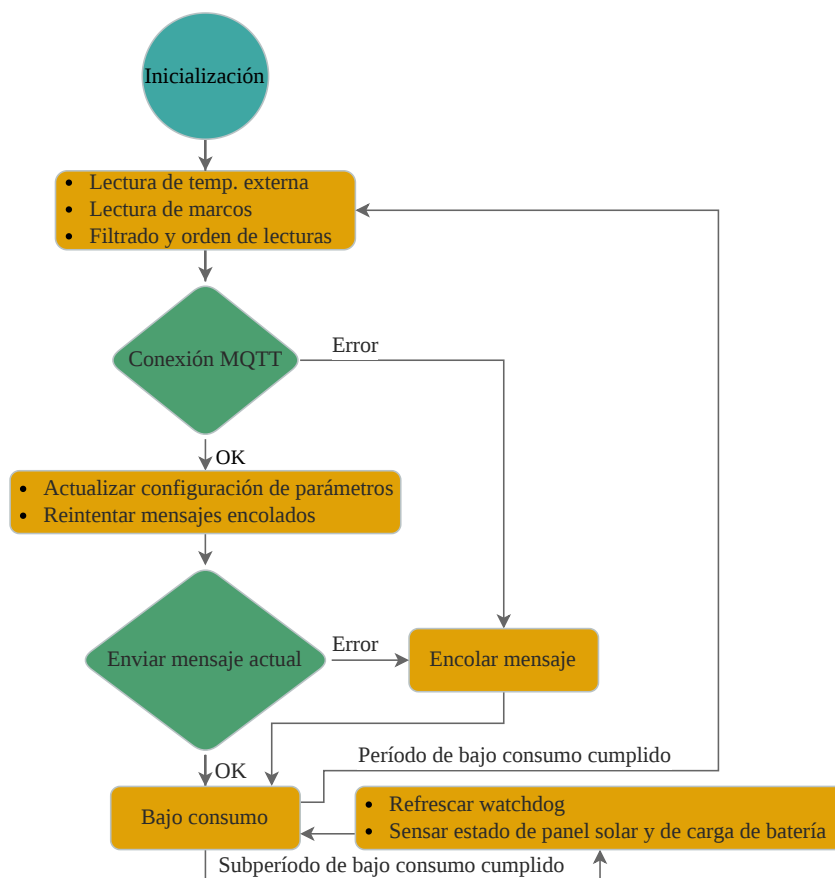


Figura 7.1: Diagrama de flujo del firmware. En él se muestran las distintas fases por las que transcurre el sistema. Comienza por la etapa de inicialización, pasando luego por la adquisición de datos y el envío de los mismos mediante MQTT, finalizando el ciclo con una etapa de bajo consumo. Se muestran también aspectos relativos al encolado de mensajes, actualización de parámetros y sensado de energía.

el sensor es controlada mediante *NFC* (*Near Field Communication*) por el lector, quien orquesta qué comandos I²C el tag ejecuta.

Como se muestra en la Figura 7.1, el programa comienza con una etapa de inicialización. Para luego pasar a la adquisición de datos, esto incluye la temperatura externa, la lectura de los marcos a través de NFC y un procesamiento de los datos obtenidos. A continuación, se realiza la conexión *MQTT* (*Message Queuing Telemetry Transport*), a través de *NB-IoT* (*Narrowband Internet of Things*), para transmitir los datos recabados. Si la conexión no puede ser establecida en ese momento, el mensaje a enviar será encolado. De lo contrario, si sí es establecida la conexión, se procede a actualizar los parámetros configurables del sistema, los cuales son el período de lecturas, la cantidad de marcos objetivo a leer, y un ajuste

dinámico de tiempo para asegurar la periodicidad de los mensajes. Luego se reintentan los envíos de los mensajes encolados y finalmente se envía el mensaje actual, que, en caso de error, será encolado para su posterior envío. Terminado el ciclo, el microcontrolador entra en modo de bajo consumo durante el tiempo establecido, cortando durante este proceso, la alimentación de los demás módulos. Durante el período de bajo consumo, cada vez que el microcontrolador sale de bajo consumo para refrescar el *watchdog timer* (aproximadamente cada veinte segundos), se sensan las señales relativas al estado de carga de la batería y al estado del panel solar. Una vez cumplido el tiempo establecido, el microcontrolador sale de bajo consumo, vuelve a energizar los módulos y comienza con la etapa de adquisición de datos nuevamente.

7.1.1. Inicialización del sistema

La inicialización del sistema consta de establecer las variables con los valores por defecto, inicializar el módulo NFC y obtener los parámetros establecidos por el usuario a través de la interfaz gráfica. Para este último paso, es necesario establecer conexión NB-IoT y MQTT, suscribiéndose al tópico `HiveCare/<IMEI>/init`. El *IMEI* (*International Mobile Equipment Identity*) del módulo NB-IoT (número de 15 dígitos único entre dispositivos celular) se encuentra presente en todos los tópicos, logrando que cada colmena tenga su set de tópicos específico. Una vez suscrito, se recibe el último mensaje almacenado en dicho tópico mediante el uso del atributo *retain*. Este atributo de MQTT indica al *broker* que debe conservar el último mensaje publicado en el tópico (con dicho atributo), de forma que cualquier cliente que se suscriba posteriormente reciba inmediatamente dicho valor, sin necesidad de esperar a una nueva publicación.

Esta lectura de parámetros en la inicialización asegura una paridad entre el firmware y la interfaz gráfica. Los parámetros que se emparejan son: `sleep_time`, `smart_frames` y `correction_time`. El primero establece el período de lecturas en minutos, el segundo la cantidad de marcos a leer y el tercero el tiempo, en segundos, que se le debe restar al período para obtener el tiempo que el microcontrolador debe permanecer en el estado de bajo consumo. El período configurado por el usuario corresponde al tiempo deseado entre dos mensajes de reporte consecutivos. Sin embargo, el microcontrolador no permanece en bajo consumo durante todo ese intervalo. Antes de volver a dicho estado debe realizar distintas tareas, como la lectura de los Marcos HiveCare mediante NFC y la conexión y transmisión de datos a través de NB-IoT. La duración de estas operaciones no es constante: la lectura NFC depende, entre otros factores, de la cantidad de marcos y de los reintentos necesarios, mientras que el establecimiento de la conexión NB-IoT y el envío de los datos dependen de las condiciones de cobertura y de la respuesta de la red. A esto se suma la deriva del reloj utilizado por el microcontrolador, que puede producir pequeñas diferencias entre el tiempo programado y el tiempo real transcurrido. En consecuencia, si el tiempo de bajo consumo se fijara directamente igual al período solicitado, el intervalo real entre reportes sería mayor y podría acumular un error a lo largo de los ciclos. Por este motivo, se utiliza un ajuste dinámico

Capítulo 7. Firmware

que reduce el tiempo de permanencia en bajo consumo para compensar tanto el tiempo consumido durante las operaciones activas como las desviaciones temporales observadas. Es importante mencionar que este parámetro no es manejado por el usuario, sino que el servicio calcula la variación adecuada para mantener el período con un error objetivo de 5 %.

7.1.2. Adquisición de datos

Luego de la inicialización del sistema, se comienza el proceso de adquisición de datos. Este proceso comienza con la lectura de la temperatura externa, obtenida a través del sensor de temperatura directamente conectado al microcontrolador mediante el periférico I²C. Posteriormente, se leen los marcos, este proceso, mostrado en la Figura 7.2, comienza con el encendido del campo por parte del lector en búsqueda de tags NFC-V.

En ese momento, los tags cercanos se energizan y se reportan al lector. Una vez esto haya sucedido, el lector iniciará la comunicación con el primero que se haya reportado, enviándole las configuraciones iniciales que debe realizar, entre ellas, habilitar el *energy harvesting*. Luego de que el tag habilite el *energy harvesting*, los sensores de temperatura conectados a él se energizarán e inicializarán.

El lector solicitará entonces, una transferencia I²C desde el tag hacia el sensor, en la que se le indicará al sensor que debe comenzar una conversión de temperatura (*one-shot* en el registro **CTRL**). A continuación, el lector comenzará a solicitarle al tag lecturas I²C del registro **STATUS** del sensor de temperatura hasta que el mismo contenga su bit *busy* en 0, indicando que ya fue finalizada la conversión de temperatura y por ende, la misma está pronta para ser leída. El lector luego, solicitará una lectura I²C al tag, del registro **TEMP_L_OUT** del sensor para obtener así la temperatura medida. Este proceso es repetido para la cantidad de sensores de temperatura que contenga el Marco HiveCare.

Es relevante mencionar, que cuando el tag recibe una solicitud de lectura I²C, la respuesta de la transacción la almacenará en su *SRAM* (*Static Random-Access Memory*). Siendo trabajo del lector tener que preguntar por el estado de la transacción para saber si ya se encuentra disponible la información en la SRAM, y luego leerla.

Luego de obtenidas las temperaturas, el lector solicitará al tag que deshabilite el *energy harvesting*, haciendo que los sensores queden desenergizados y luego le mandará el comando *Stay Quiet*, el cual permite que el tag no responda a comandos a menos que sean dirigidos explícitamente a su *UID* (*Unique Identifier*). Esto se realiza para que el tag no interfiera en las siguientes comunicaciones *broadcast* que realice el lector. El tag permanece en dicho estado durante toda la sesión, restableciendo su estado normal en su reenergización posterior.

Luego de enviado el comando al tag en comunicación, el lector comenzará la comunicación con el siguiente tag que se haya reportado al inicio, repitiendo la misma secuencia de comunicación. Una vez haya completado las comunicaciones con todos los tags reportados al inicio, si la cantidad de tags con los que mantuvo comunicación es menor a la esperada, realizará un *inventory* (*broadcast*) para

7.1. Sistema

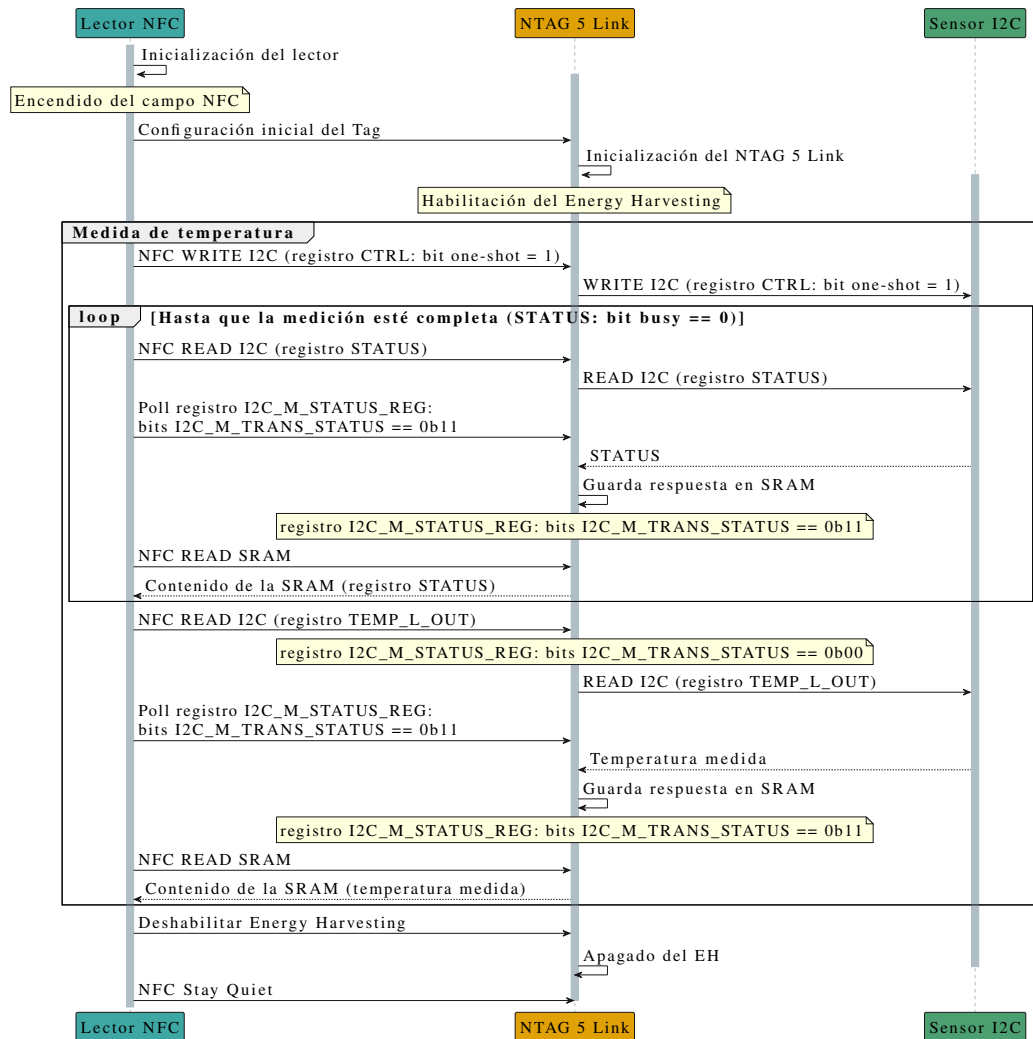


Figura 7.2: Diagrama de secuencia de la comunicación entre el lector, un tag y un sensor de temperatura. Lo enmarcado como medida de temperatura se realizará una vez por cada sensor del Marco HiveCare.

descubrir nuevos tags en el área. Si bien los tags no se mueven del lugar, puede suceder que los tags más lejanos no logren reportarse al lector en el inicio debido a la interferencia de los tags más cercanos. Ahora, al estos tags estar en el estado *Stay Quiet* ignorando los comandos *broadcast*, los tags lejanos podrán reportarse satisfactoriamente y realizar la comunicación correspondiente. Este proceso se repite hasta que la cantidad de tags con los que se mantuvo comunicación sea igual a la esperada o deje de haber tags que respondan al *inventory*.

Una vez leídos todos los tags deseados, se realiza un procesamiento de los datos obtenidos, ordenando los tags mediante el *RSSI* (*Received Signal Strength Indicator*) y filtrando aquellos que tengan temperaturas por fuera del rango -15°C a 50°C . Esto se realiza como método de prevención de reporte erróneo de temperaturas, entendiendo que no es posible que las temperaturas en el interior de

Tabla 7.1: Campos del mensaje JSON enviado a través de MQTT

Campo	Tipo	Descripción
<code>msg_id</code>	Entero	Identificador único del mensaje.
<code>timestamp</code>	Entero	Marca de tiempo en formato Unix (segundos desde epoch).
<code>hive_id</code>	Cadena de caracteres	Identificador de la colmena (IMEI del módulo NB-IoT).
<code>battery_status</code>	Lista de enteros	Indica si la batería está siendo cargada. Se codifica mediante <i>RLE</i> (<i>Run-Length Encoding</i>) para optimizar el tamaño de los mensajes.
<code>solar_panel_status</code>	Lista de enteros	Indica si el panel solar está entregando energía. Se codifica mediante <i>RLE</i> para optimizar el tamaño de los mensajes.
<code>ext_temp</code>	Decimal	Temperatura externa medida por el sistema.
<code>wdg_count</code>	Entero	Contador de reinicios por <i>watch-dog timer</i> .
<code>data</code>	Lista de estructuras	Cada elemento corresponde a la información leída de un tag NFC.

una colmena excedan dichos rangos ya que las abejas no son capaces de soportar temperaturas por fuera del rango mencionado [55].

7.1.3. Comunicación NB-IoT

Posteriormente, se inicia la comunicación mediante NB-IoT para transmitir los datos al servidor MQTT y actualizar los parámetros ajustables en caso de ser necesario. Los parámetros son los mismos que los actualizados en la inicialización (`sleep_time`, como el período entre lecturas, `smart_frames` como la cantidad de marcos objetivo a ser leídos, y `correction_time` como tiempo de ajuste para derivas y tiempos de ejecución variables).

Para verificar si los parámetros deben ser actualizados, el sistema realiza una suscripción al tópico `HiveCare/<IMEI>/conf` y lee el mensaje que se encuentra en *retain* en dicho tópico. Este mensaje presenta un formato JSON, en el que almacena los distintos parámetros configurables y sus respectivos valores. Además de las mencionadas claves (`sleep_time`, `smart_frames` y `correction_time`), el mensaje tiene una extra (`pending`) que indica si la configuración está pendiente o no. Si la configuración está pendiente (`pending = 1`) esta es verificada y aplicada al firmware, enviando un *ACK* (*Acknowledgement*) al tópico `HiveCare/<IMEI>/conf/ack`. Si no está pendiente o la configuración no es válida no se realiza ninguna ac-

ción. Para que una configuración se considere válida, todos sus parámetros deben encontrarse dentro del rango de validez asignado, estos son: 1 a 1439 minutos (23 horas y 59 minutos) para el `sleep_time`, 1 a 10 marcos para `smart_frames` y 0 a 3600 segundos (1 hora) para `correction_time`.

Para el envío de mensajes, primero se establece la conexión a la red NB-IoT y al servidor MQTT, suscribiéndose al tópico de publicación de mensajes (`HiveCare/<IMEI>/`). Luego de suscrito reintentará, como primer instancia, enviar los mensajes que no haya podido mandar en ciclos anteriores (con un límite de encolado de 40 mensajes). Pasado el límite de 40 mensajes, los siguientes se pierden, asumiendo que eso sucede con una muy baja probabilidad. En este proceso, si el mensaje no es enviado correctamente se vuelve a encolar, esperando al siguiente ciclo para su reintento.

Una vez finalizado el proceso de reintentos, se pasa al envío del mensaje actual, para ello primero debe construirse el mensaje en formato JSON. El mensaje JSON contiene los campos que se detallan en la Tabla 7.1, donde se indica el tipo y se incluye una breve descripción. Dicho mensaje es enviado a través del tópico previamente mencionado y tiene siempre todos los campos presentes, con la particularidad de que el campo `data` puede ser una lista vacía si ningún marco es detectado o leído correctamente. Una vez generado el mensaje JSON, éste es enviado a través de MQTT, encolándose en caso de fallo.

Como campos generales se encuentran:

- `msg_id` como identificador del mensaje;
- `timestamp` obtenido a través de la red NB-IoT como segundos desde la medianoche *UTC (Coordinated Universal Time)* del 1 de enero de 1972 (Unix timestamp);
- `hive_id` como identificador único de colmena, obtenido a través del IMEI del módulo celular;
- `battery_status` como indicador por nivel bajo de si la batería está siendo cargada o no;
- `solar_panel_status` como indicador por nivel bajo de si el panel solar está entregando energía;
- `ext_temp` con la temperatura exterior a la colmena;
- `wdg_count` como el contador de reinicios por *watchdog timer* hasta el momento;
- `data` contiene un arreglo de estructuras, donde cada elemento corresponde a la información leída de un tag NFC. Cada entrada incluye:
 - `frame` con el número de marco leído, en orden ascendente en lejanía al lector (el más chico es el más cercano);
 - `rsssi` que representa la intensidad de señal recibida;

Capítulo 7. Firmware

- `uid` como identificador único del tag;
- `temperatures` con las tres temperaturas de ese marco.

Los campos `battery_status` y `solar_panel_status` acumulan muestras tomadas cada veinte segundos durante el período de bajo consumo y son codificadas mediante *RLE* (*Run-Length Encoding*) para disminuir su extensión. La codificación RLE se basa en la repetición sucesiva de datos, sustituyendo las repeticiones por la cantidad de datos iguales sucesivos y el valor del dato. Dada la naturaleza de las señales, ya que sólo pueden tomar dos valores posibles (cero o uno) y que además dichos valores están fuertemente relacionados con la presencia o no de sol, se concluye que esta codificación es muy adecuada, permitiendo reducir el largo del mensaje significativamente.

7.1.4. Modo de bajo consumo

Finalmente, el microcontrolador entra en bajo consumo, apagando los módulos NFC y celular mediante un *Load Switch* controlado por un *GPIO* (*General-Purpose Input/Output*) e ingresando en *STOP Mode 2*. El tiempo que permanece en este estado está definido por el tiempo establecido mediante el parámetro *sleep_time* y corregido mediante *correction_time*. Al tiempo total se lo divide en intervalos de veinte segundos, entre medio de los cuales el microcontrolador saldrá de *STOP Mode 2* para refrescar el *watchdog timer* y leer el estado de la batería y del panel solar y volverá a bajo consumo.

Una vez cumplido el tiempo total, el microcontrolador sale de *STOP Mode 2*, pasando a *Run Mode*. En este punto se encienden los módulos apagados a través del *load switch* y se inicializa el módulo correspondiente al lector NFC. Luego de esto, se pasa a la adquisición de datos, completando así el ciclo.

7.2. Estructura de firmware

El firmware está estructurado en cuatro capas principales como se muestra en la Figura 7.3. A más alto nivel se encuentra la *capa de aplicación* (*Application Layer*), encargada de la lógica de negocio. Esta capa se comunica directa y únicamente con la *capa de plataforma* (*Platform Layer*), en donde se define una *API* (*Application Programming Interface*) abstraída del hardware. Dicha capa se encarga de brindarle a la capa de aplicación funciones, independizándola del hardware, es la capa de plataforma la que permite que el código sea fácilmente migrable a otros dispositivos hardware sin afectar a la capa de aplicación. La capa de plataforma utiliza los recursos de la *capa drivers* (*Driver Layer*), quien centraliza las funciones específicas de cada componente hardware. La capa *drivers* por su parte utiliza los recursos de la *capa Core*, quien brinda interfaces de los diversos periféricos del microcontrolador.

7.2. Estructura de firmware

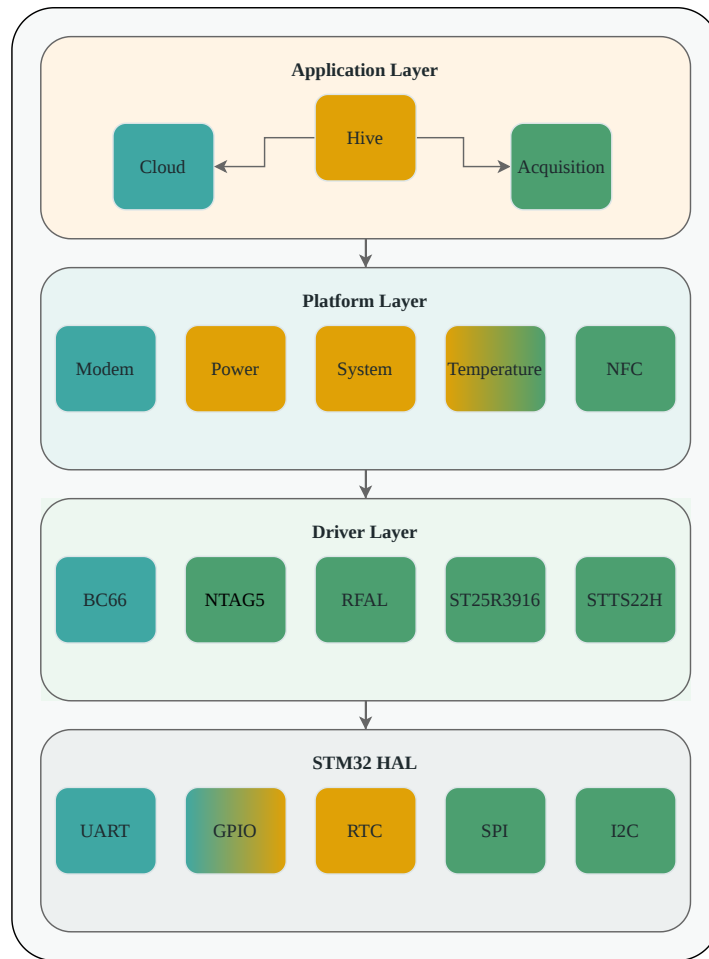


Figura 7.3: Diagrama de arquitectura del firmware. Se muestran las cuatro capas (*Application*, *Platform*, *Driver* y *Core* o *STM32 HAL*). Se observan en la capa de aplicación tres componentes principales (*Hive*, *Cloud* y *Acquisition*), cada uno representado por un color distinto. Dentro de los tres se destaca como central el componente *Hive*, ya que concentra la lógica de aplicación y hace uso de los otros dos componentes principales. Los colores se conservan en el diagrama, permitiendo identificar fácilmente la estructura vertical de cada componente principal. Se observan ciertos módulos como *Temperature* en *Platform Layer* y *GPIO* en *STM32 HAL* que presentan un gradiente de dos colores, indicando que son consumidos por las dos verticales.

7.2.1. Capa Application

La capa de aplicación, es la que centraliza la lógica de negocio y es independiente del hardware. La misma está compuesta por varios componentes (*Hive*, *Cloud* y *Acquisition*), cada uno formado por múltiples módulos. La lógica principal se encuentra en el componente *Hive*, particularmente en el módulo `hive_manager`.

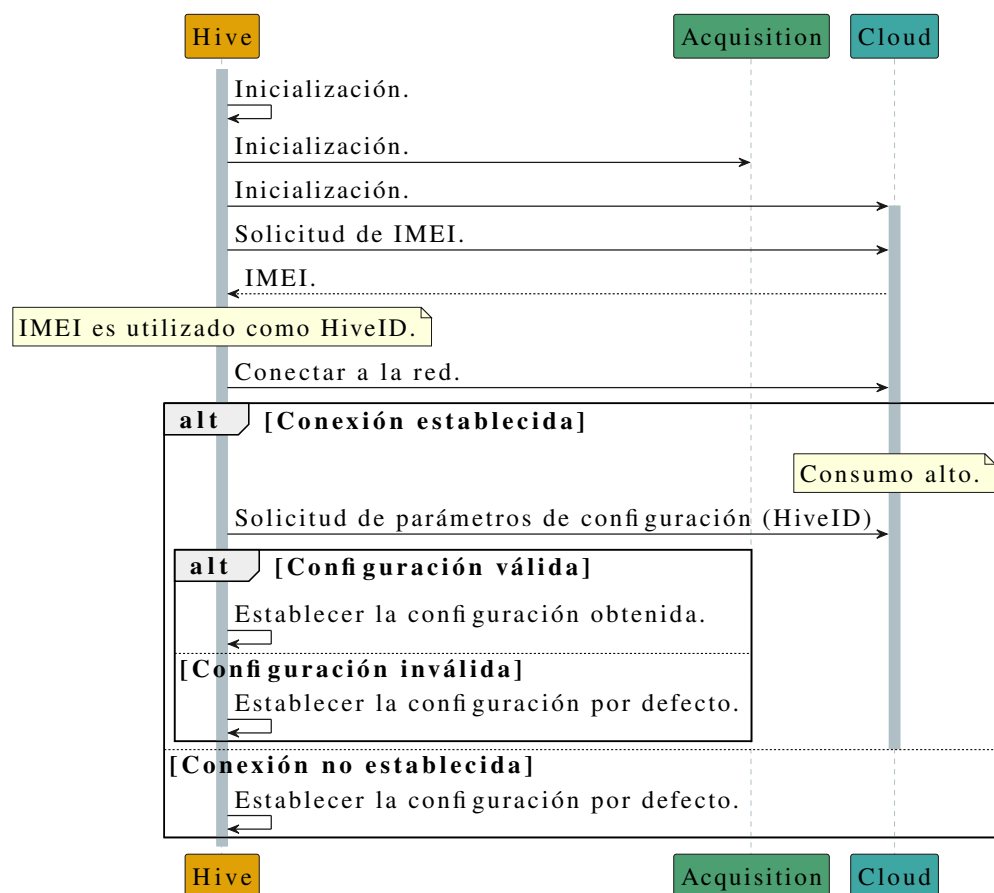


Figura 7.4: El diagrama de secuencia expone cómo interactúan los componentes principales de la capa de aplicación (*Hive*, *Cloud* y *Acquisition*) entre sí en la fase de inicialización del sistema. Para dar noción de consumo eléctrico, en *Cloud* se utiliza la barra de actividad para representar que no solo esos componentes están activos sino que hay un consumo elevado asociado a ellos en dicho período.

Este componente interactúa con los otros dos a lo largo del ciclo de ejecución. El componente *Acquisition* es el encargado de la adquisición de datos, tanto de los marcos como del sensor de temperatura externo. Por este motivo, administra las lecturas NFC, encargándose de realizar el flujo ya mostrado en la Figura 7.2. El componente *Cloud* administra todo lo relacionado a la conexión NB-IoT, desde el establecimiento de la conexión hasta el envío y recepción de mensajes MQTT. En las Figuras 7.4 y 7.5 se puede seguir la inicialización y el flujo principal de la aplicación respectivamente, entendiendo las responsabilidades de cada componente.

7.2.2. Capa Platform

La capa Platform se encarga de exponer las funciones necesarias para la capa de aplicación independientemente del hardware utilizado. Esta capa de abstracción

7.2. Estructura de firmware

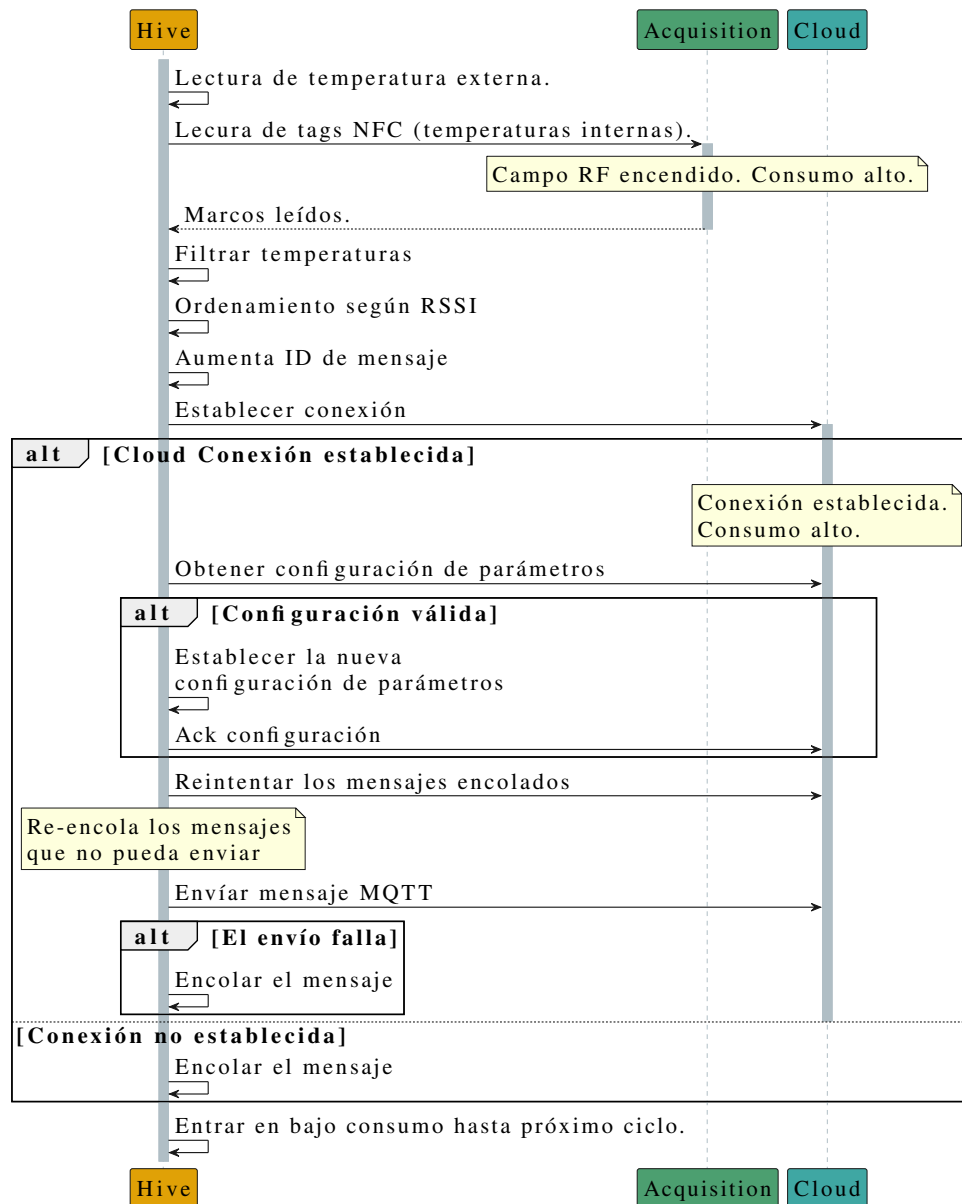


Figura 7.5: El diagrama de secuencia expone cómo interactúan los componentes principales de la capa de aplicación (*Hive*, *Cloud* y *Acquisition*) entre sí en el ciclo de ejecución principal. Para dar noción de consumo eléctrico, en *Acquisition* y *Cloud* se utiliza la barra de actividad para representar que no solo esos componentes están activos sino que hay un consumo elevado asociado a ellos en dicho período.

permite que la aplicación no necesite ser modificada si se realiza un cambio de hardware.

La capa está formada por varios módulos, cada uno centraliza las funcionalidades de los distintos componentes hardware. Como módulos se encuentran:

- `platform_modem` brindando las funciones relativas al módulo de comunica-

Capítulo 7. Firmware

ción NB_IoT, desde configuración del módulo como el encendido, apagado, verificación de SIM, etc. hasta la conexión NB-IoT, MQTT, subscripción a tópicos, envío y recepción de mensajes, etc. retorno de IMEI, etc.);

- **platform_nfc** exponiendo lo relacionado a la comunicación NFC, interacciones con tags y configuraciones del lector;
- **platform_power** dando funciones relacionadas a la administración de energía del sistema, lectura de estados de la batería, energización de módulos, pasaje a modo de bajo consumo, etc.;
- **platform_system** brindando funciones para el manejo del *watchdog timer*, el reloj del sistema, etc.;
- **platform_temperature** exponiendo las funciones necesarias para leer sensores de temperatura.

Adicionalmente a los módulos mencionados, se encuentra el módulo **board_nfc**, este módulo centraliza todas las configuraciones de pines, puertos, etc. que deben realizarse para poder manejar correctamente la placa del lector (ST25R3916B) mediante el microcontrolador seleccionado. Esto se definió como módulo a parte, incluido en la subcarpeta **boardConfig** ya que la placa requiere una amplia cantidad de configuraciones. El resto de los módulos no presentan esta abstracción ya que o no corresponde o las configuraciones son mínimas.

7.2.3. Capa Driver

Esta capa se compone de diversos *drivers* de los distintos componentes hardware del sistema. Particularmente se encuentran los *drivers* para el módulo celular BC66 (Módulo NB-IoT), el tag NFC NTAG5, el lector NFC ST25R3916 y los sensores de temperatura STTS22H, así como *drivers* específicos para el microcontrolador STM32L476RG.

De los mencionados, los *drivers* del lector NFC y del microcontrolador corresponden a los *drivers* oficiales de dichos integrados fabricados por STMicroelectronics. El resto de los *drivers* se implementaron siguiendo una estructura común. Por un lado, cada dispositivo cuenta con un módulo que lleva su nombre, donde se concentran sus definiciones y comandos específicos. Por otro lado, todos los *drivers* incluyen un módulo *port*, encargado de adaptar el driver al microcontrolador utilizado. Este módulo actúa como una capa de abstracción de hardware entre el dispositivo y el microcontrolador, o, en el caso del NTAG5, entre el dispositivo y el lector NFC. Adicionalmente, algunos *drivers* más complejos incorporan módulos extra con el objetivo de simplificar y centralizar su funcionamiento.

Adicionalmente en esta capa se encuentra la RFAL (Radio-Frequency Abstraction Layer). Esta es proporcionada por STMicroelectronics para ser usada en conjunto con el lector NFC. Esta librería provee diversas funcionalidades para la comunicación NFC. Además está diseñada para ser utilizada con todos los lectores NFC ST25R, facilitando la migración de lector dentro de la familia de ST.

7.2.4. Capa Core

Finalmente, la capa Core brinda las funciones asociadas a los periféricos del microcontrolador, como *I²C*, *SPI (Serial Peripheral Interface)*, *UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)*, etc. Es específica del microcontrolador utilizado y es utilizada en los *ports* y por ciertos módulos de la capa plataforma que dependen directamente del microcontrolador como lo son `platform_system` y `platform_power`.

El *watchdog timer* fue configurado utilizando el reloj interno de baja velocidad *LSI (Low Speed Internal)* de aproximadamente 32 kHz, con un *prescaler* de 256 y un valor de recarga de 4095. Con esta configuración, el contador alcanza su máximo luego de aproximadamente 32,8 s si no es reiniciado por el programa, provocando automáticamente un reinicio del microcontrolador.

7.3. Configuraciones

Para compilar el firmware a nivel de producción es necesario realizar ciertas configuraciones previas, particularmente las que respectan a la conexión NB-IoT. Estas configuraciones están localizadas en el archivo `config.h` ubicado en la capa de aplicación. Este archivo configura las credenciales NB-IoT y MQTT, definiendo el *APN (Access Point Name)* el *host name* de MQTT, el puerto, y las credenciales de autenticación.

En este archivo de configuración es posible definir parámetros generales del sistema. Dentro de ellos se encuentran los valores por defecto de los parámetros configurables (`sleep_time`, `smart_frames` y `correction_time`). Junto a estas configuraciones se encuentran disponibles la configuración de los límites en los que una temperatura se considera como válida y el intervalo en segundos utilizado para refrescar el *watchdog timer* y tomar las medidas del estado de carga (batería y panel solar) en el estado de bajo consumo.

7.4. Portabilidad, escalabilidad y extensibilidad

El firmware fue diseñado respetando una arquitectura de capas, con el objetivo de facilitar una portabilidad del sistema, brindándole al mismo dinamismo en la estructura del hardware. La arquitectura diseñada permite no solo portabilidad entre microcontroladores, sino que también hace al sistema fácilmente adaptable a otros componentes hardware (distinto lector NFC, otros modelos de sensores de temperatura e incluso diferente módulo celular).

Para portar el sistema a otro microcontrolador se debe sustituir la capa *Core* con los módulos periféricos del nuevo microcontrolador y los *drivers* referentes al mismo. Luego de esto deben actualizarse los *ports* en los diversos *drivers* para asegurar un correcto uso de los periféricos y puertos por parte de los *drivers*. Finalmente, deben modificarse los módulos `platform_system` y `platform_power` sustituyendo las funciones específicas del microcontrolador utilizadas.

Capítulo 7. Firmware

Si lo que se desea es cambiar un componente hardware, deben actualizarse los *drivers* de dicho componente así como la implementación del módulo *platform* correspondiente. Si el componente a cambiar es el lector NFC y se opta por uno no perteneciente a la familia ST25R debe tenerse en cuenta que la RFAL necesitará ser sustituida o modificada.

Con respecto a la escalabilidad se puede afirmar que el firmware escala sin problemas a un sistema de varias colmenas. Esto es debido a que se utiliza el IMEI del módulo celular (obtenido de manera automática, sin necesidad de hacer cambios en el firmware para cada colmena) para identificar a cada colmena. Este identificador se utiliza para suscribirse a tópicos MQTT únicos por colmena, separando los mensajes de cada una en distintos tópicos. Esto hace que no haya interferencia de mensajes en un mismo tópico, facilitando el manejo posterior de mensajes. Si se deseara extender la cantidad de sensores por colmena deberían agregarse las direcciones estáticas correspondientes y aumentar la macro de cantidad de sensores. Es dinámico además la cantidad de marcos a leer, pudiendo setear un máximo de diez marcos (la totalidad en una colmena).

Con respecto a la extensibilidad, el código está lo suficientemente estructurado como para que sean fácilmente añadibles más funcionalidades. En este aspecto, cabe mencionar que los recursos de memoria del microcontrolador utilizado fueron explotados al máximo con el fin de soportar la mayor cantidad de tiempo sin conexión NB-IoT. Para esto lo que se hizo fue agrandar al máximo la capacidad de la cola circular utilizada para los mensajes MQTT, llegando a una capacidad final de cuarenta mensajes. Esto asegura un tiempo considerablemente alto de desconexión que en la práctica no fue alcanzado. Para tener de referencia, el firmware con la cola de capacidad un mensaje ocupa un 18,33 % de la memoria RAM (de tamaño 96 kb) mientras que con cuarenta mensajes ocupa un 98,31 %. Es notorio que reducir algunos mensajes liberan memoria considerable como para agregar nuevas funcionalidades, quedará a decisión ingenieril por parte de quien desee una extensión del código el compromiso que tomará entre robustez a desconexiones y nuevas funcionalidades. Para asegurar que el *stack* tiene memoria reservada suficiente se realizó un análisis dinámico del *stack* mediante una marca de agua introducida. Esta prueba determinó que el *stack* ocupa 3487 B, por lo que se reservaron 4 kB para el *stack*.

Capítulo 8

Software

En este capítulo se describe la arquitectura de software desarrollada para el Sistema HiveCare, la cual permite la adquisición, almacenamiento y visualización de los datos provenientes de las Colmenas HiveCare. La infraestructura implementada se basa en una Raspberry Pi que actúa como servidor central, donde se ejecutan los distintos servicios del sistema, incluyendo la base de datos, la interfaz gráfica y el servicio de comunicación con las colmenas.

Además, se emplea una red privada virtual para permitir el acceso remoto seguro al sistema, posibilitando la visualización y configuración de las colmenas desde ubicaciones externas. La interacción entre los distintos componentes de software permite la adquisición de datos mediante *MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)*, su almacenamiento en la base de datos y su posterior visualización a través de la interfaz gráfica. La documentación Doxygen se encuentra disponible en <https://hivecare.pages.fing.edu.uy/pfc-HiveCare/>, mientras que está disponible en el repositorio <https://gitlab.fing.edu.uy/hivecare/pfc-HiveCare/-/tree/main/raspberry> todo lo implementado junto con sus *readme* para replicar el sistema.

En las siguientes secciones se describen los distintos componentes que conforman la arquitectura de software del sistema. Particularmente, la Sección 8.1 explica lo relativo a la plataforma central utilizada (Raspberry Pi), la Sección 8.2 detalla las particularidades de la interfaz gráfica, en la Sección 8.3 se explica qué base de datos fue utilizada y cómo se integró, y finalmente, en la Sección 8.4 se expone cómo fue resuelto el problema del acceso remoto a la interfaz.

8.1. Raspberry Pi

La Raspberry Pi cumple el rol de servidor central del Sistema HiveCare. Su utilización se fundamenta en su bajo consumo energético, reducido costo y capacidad suficiente para ejecutar simultáneamente los distintos servicios requeridos por el sistema. Además, al contar con soporte nativo para distribuciones Linux y una amplia disponibilidad de herramientas de desarrollo y administración, simplifica considerablemente el despliegue y mantenimiento de la plataforma.

HiveService - Arquitectura de módulos

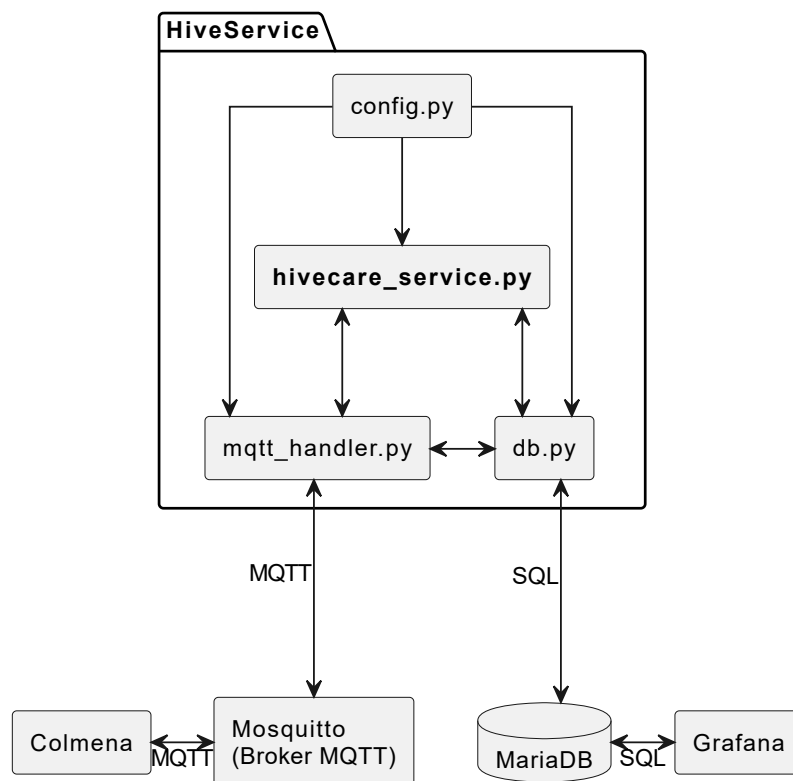


Figura 8.1: Arquitectura de módulos del servicio HiveService, mostrando las dependencias entre los cuatro módulos Python (`config.py`, `hivecare_service.py`, `mqtt_handler.py` y `db.py`) y su interacción con los componentes externos: el broker MQTT Mosquitto, la base de datos MariaDB y la interfaz gráfica Grafana.

El sistema fue puesto en marcha y validado utilizando Raspberry Pi OS Lite (64-bit) [56], distribución basada en Debian GNU/Linux 13 (Trixie). En ella se ejecutan todos los componentes principales del software: la base de datos MariaDB, la interfaz gráfica Grafana y el servicio de gestión HiveService. La comunicación entre el servicio y las Colmenas HiveCare se realiza a través del *broker* MQTT Mosquitto, utilizando el servidor público `test.mosquitto.org`. Todas las colmenas del sistema utilizan este mismo *broker* MQTT para el intercambio de datos y configuraciones. Al centralizar estos componentes en un único equipo de bajo consumo, se simplifica tanto el despliegue del sistema como su mantenimiento.

HiveService es el servicio implementado en Python que actúa como intermediario entre los tres pilares del sistema: las Colmenas HiveCare, la base de datos y la interfaz gráfica. Se ejecuta de forma continua como un servicio del sistema operativo, iniciándose automáticamente junto con la Raspberry Pi.

El servicio está compuesto por cuatro módulos, cuya arquitectura e interacción se ilustra en la Figura 8.1. El módulo `config.py` centraliza los parámetros de configuración del sistema, como las credenciales del *broker* MQTT y de la base

8.1. Raspberry Pi

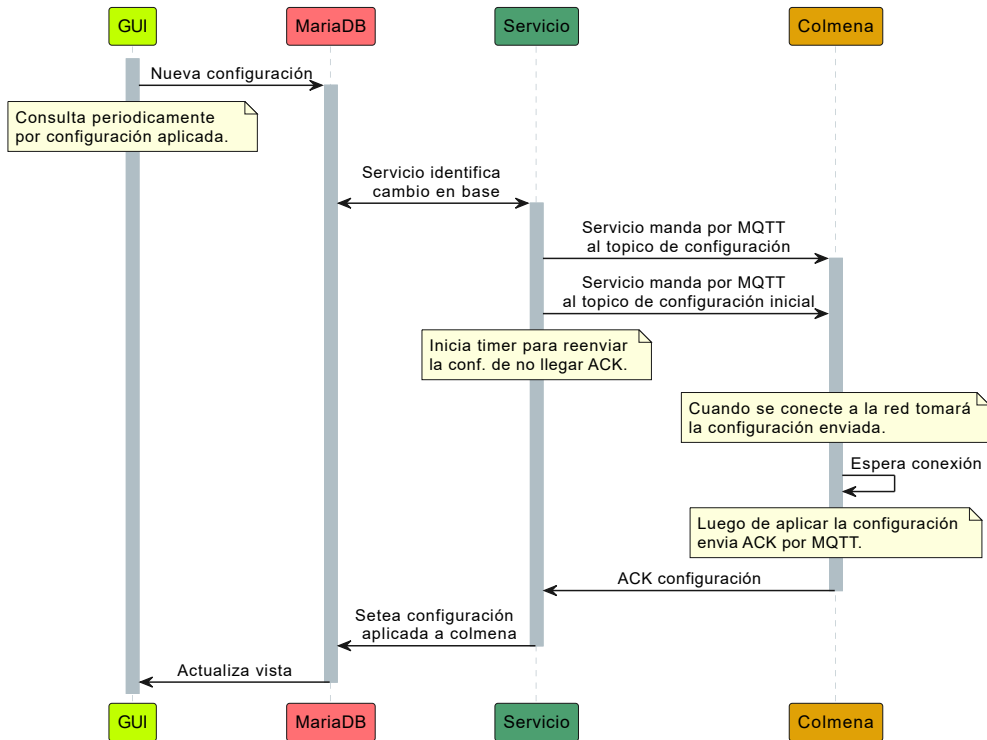


Figura 8.2: Diagrama de secuencia del flujo de configuración remota de colmenas. Cuando el usuario modifica parámetros en la GUI, el servicio HiveService detecta el cambio en la base de datos, publica la nueva configuración por MQTT y activa el mecanismo de reintentos hasta recibir el ACK de confirmación por parte de la colmena. Por simplificación del esquema, el *broker* MQTT no se representa explícitamente; este se encuentra entre el Servicio y la Colmena, siendo el punto al que ambos publican y del que ambos reciben los mensajes MQTT.

de datos, siendo utilizado por el resto de los módulos. El módulo `db.py` gestiona toda la interacción con MariaDB, encargándose de insertar medidas, consultar configuraciones pendientes y actualizar el estado de los marcos detectados. El módulo `mqtt_handler.py` maneja la comunicación con el *broker* Mosquitto, implementando los *callbacks* de recepción de mensajes y las funciones de publicación de configuraciones y reintentos. Finalmente, `hivecare_service.py` es el punto de entrada del servicio: inicializa el cliente MQTT, registra los *callbacks* y lanza los hilos de ejecución que permiten atender simultáneamente la recepción de medidas y el envío de configuraciones pendientes.

En ejecución, el servicio mantiene tres tareas concurrentes: el *loop* principal del cliente MQTT que escucha mensajes entrantes, el hilo de configuración que detecta y envía cambios de parámetros hacia las colmenas, y el hilo de reintentos que garantiza la entrega de configuraciones hasta recibir confirmación. El flujo de configuración remota se ilustra en la Figura 8.2 y el flujo de recepción de medidas en la Figura 8.3.

El primer flujo corresponde a la configuración remota de las colmenas. Cuando

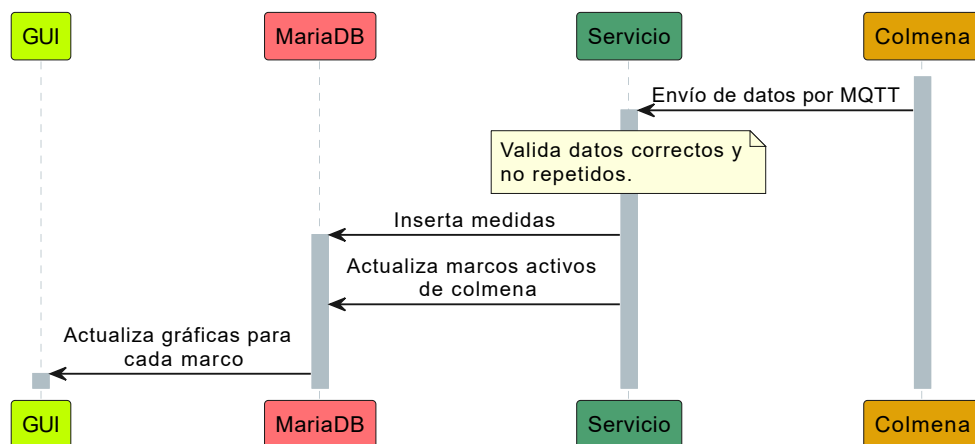


Figura 8.3: Diagrama de secuencia del flujo de recepción de medidas. El servicio HiveService recibe los datos enviados por la colmena vía MQTT, los valida para descartar duplicados o errores, los inserta en MariaDB y actualiza el estado de los marcos activos, reflejando los cambios de forma inmediata en la interfaz gráfica. Por simplificación del esquema, el *broker* MQTT no se representa explícitamente; este se encuentra entre el Servicio y la Colmena, siendo el punto al que ambos publican y del que ambos reciben los mensajes MQTT.

un usuario modifica parámetros desde la interfaz gráfica, estos cambios se escriben en la base de datos. El hilo de configuración perteneciente al servicio consulta periódicamente la tabla de configuraciones dentro de la base de datos en busca de cambios pendientes de aplicar. Al identificar un cambio pendiente, el servicio publica la nueva configuración mediante MQTT en un tópico específico asociado a la colmena correspondiente. Dicho tópico se construye utilizando el *IMEI* (*International Mobile Equipment Identity*) del módulo *Narrowband Internet of Things* del lector, garantizando que la configuración únicamente pueda ser recibida por la colmena objetivo. Luego, el hilo de reintentos comienza a reenviar periódicamente la configuración hasta recibir una confirmación de recepción *ACK* (*Acknowledgement*)— por parte de la colmena.

Una vez que la colmena aplica la configuración y responde con el ACK correspondiente mediante MQTT, el hilo de reintentos cancela los reenvíos pendientes y el servicio actualiza la base de datos para reflejar que la configuración fue recibida exitosamente, lo cual queda visible para el usuario en la interfaz gráfica. Adicionalmente, la configuración también se publica en un tópico dedicado a la configuración inicial, de manera que ante un reinicio de la colmena esta pueda recuperar automáticamente los últimos parámetros configurados sin necesidad de un nuevo intercambio de mensajes.

El segundo flujo corresponde a la recepción de medidas. Cuando una Colmena HiveCare envía sus datos por MQTT, el *loop* MQTT los recibe y los pasa al módulo `mqtt_handler.py` para su procesamiento. Este valida que los datos sean correctos y no estén duplicados antes de insertarlos en la base de datos. Junto con las medidas, también actualiza el registro de marcos detectados por la colme-

8.2. Interfaz gráfica: Grafana



Figura 8.4: Ventana principal del panel de control HiveCare en Grafana, desde donde el usuario puede registrar nuevas colmenas ingresando nombre, descripción e IMEI, y acceder a las opciones de visualización de datos o configuración de cada colmena registrada.

na, marcando cuáles estuvieron activos en el último mensaje recibido y cuáles no, información que queda disponible de forma inmediata en la interfaz gráfica.

8.2. Interfaz gráfica: Grafana

La interfaz gráfica del sistema fue implementada sobre Grafana, una herramienta de código abierto optimizada para la visualización e interacción con bases de datos. Su elección se fundamentó en la capacidad de consultar, insertar y actualizar datos a través de distintos paneles, así como en la posibilidad de seleccionar de forma sencilla el rango temporal de los datos a visualizar, ya sea mediante un intervalo absoluto o uno relativo (e.g. *Last 6 hours*).

La ventana principal de la interfaz, que se muestra en la Figura 8.4, constituye el punto de entrada al sistema. Desde ella el usuario puede registrar nuevas Colmenas HiveCare ingresando un nombre, una descripción y el identificador de la colmena, que corresponde al IMEI del módulo NB-IoT BC66 (Módulo NB-IoT). Las colmenas registradas se listan en una tabla en la parte inferior, desde la cual se puede acceder a la visualización de datos mediante *Ver Gráficas* o a la configuración de parámetros mediante *Configurar*.

La ventana de configuración, ilustrada en la Figura 8.5, se divide en tres secciones. La primera permite ajustar el período de muestreo y la cantidad de Marcos HiveCare a ser leídos. Una vez enviada la configuración, se muestra el mensaje “*Esperando OK del lector...*” hasta que la colmena confirma la recepción, momento en el que el mensaje se actualiza a “*Configuración recibida por el lector*”. La segunda sección permite editar el nombre y la descripción de la colmena. La tercera corresponde a la configuración del orden de los marcos, permitiendo asociar cada *UID* (*Unique Identifier*) detectado con una posición física dentro de la colmena. De esta manera, el sistema puede identificar qué marco corresponde a cada me-

Capítulo 8. Software

The screenshot shows a web interface for configuring a beehive. It is divided into three main sections:

- Configuraciones:** Contains a 'Período' dropdown set to '00:02' with a 'Horas:Minutos' label, a 'Marcos Inteligentes' input set to '3' with an 'Entero' label, a green confirmation box with a checkmark and the text 'Configuración recibida por el lector', and a blue button 'Enviar configuración.'.
- Configuraciones generales:** Contains a 'Nombre de la Colmena' input set to 'Colmena V1', a 'Descripción' input set to 'Colmena en CRS', and a blue button 'Guardar.'.
- Configuración de Marcos:** A list of 10 frames (Marco 1 to Marco 10). Each frame has a dropdown menu. Marco 3 is set to '03:23:32:4B:58:01:04:E0 (No activa)'. The others are set to 'Choose'. A blue button 'Guardar configuración de marcos.' is at the bottom.

At the very bottom, there is a blue button 'Volver al Panel de control'.

Figura 8.5: Ventana de configuración de colmena en Grafana, dividida en tres secciones: ajuste de período de muestreo y cantidad de marcos activos (con indicador de estado de confirmación), edición de nombre y descripción, y asignación de UUIDs detectados a posiciones físicas dentro de la colmena.

dición mostrada en la interfaz. La asignación se realiza mediante un desplegable dinámico que lista los UUIDs detectados por la colmena, indicando para cada uno si se encuentra activo o no en función del último mensaje recibido. Se admiten hasta diez marcos, que es la capacidad máxima de la colmena.

La ventana de visualización de datos, accesible desde la ventana principal, muestra una gráfica por cada marco configurado en la sección de orden de marcos. Es decir, si no se asignó ningún UUID en dicha sección no se generará ninguna gráfica, mientras que si se asignaron UUIDs en determinadas posiciones se generará una gráfica por cada una, identificada con el número de posición y el UUID correspondiente, tal como se observa en la Figura 8.6. La gráfica de cada marco presenta tres series de temperatura (Cerca, Centro y Lejos) correspondientes a los sensores distribuidos a lo largo del marco respecto a la posición del tag, junto con la temperatura exterior como referencia. Además, esta ventana incluye una representación tridimensional de la colmena donde cada sensor se visualiza como una esfera con color dinámico según su temperatura, complementada con una vista bidimensional cenital que resume la misma información de forma más compacta, estas representaciones fueron desarrolladas mediante la asistencia de ChatGPT de OpenAI. Por último, también se muestran las señales de estado *CHG* y *PGOOD* del cargador solar BQ24074, las cuales permiten estimar el estado de carga de la batería y la presencia de alimentación proveniente del panel solar.

Dado que cada usuario debe registrar individualmente las colmenas a las que desea acceder, es posible que dos usuarios asignen nombre y descripción distintos a una misma colmena. Sin embargo, los datos visualizados y las configuraciones del lector son compartidos, lo que permite que múltiples usuarios monitoreen y configuren una misma colmena de forma simultánea.

8.3. Base de datos: MariaDB



(a) Gráfica de temperatura del Marco 3 (UID: 03:23:32:4B:58:01:04:E0), mostrando la evolución temporal de las tres series de temperatura (Cerca, Centro y Lejos respecto al tag) junto con la temperatura exterior como referencia.



(b) Gráfica de temperatura del Marco 5 (UID: 03:23:32:2F:58:01:04:E0), mostrando la evolución temporal de las tres series de temperatura (Cerca, Centro y Lejos) junto con la temperatura exterior como referencia.

Figura 8.6: Gráficas de temperatura de dos Marcos HiveCare pertenecientes a una misma colmena, visualizadas en la ventana de datos de Grafana durante una ventana temporal de un día. Cada gráfica presenta tres series de temperatura según la posición del sensor respecto al tag (Cerca, Centro, Lejos) y la temperatura exterior

8.3. Base de datos: MariaDB

La base de datos del sistema fue implementada en MariaDB, cuya elección se fundamentó en dos razones principales. Por un lado, es una solución liviana que se adapta bien a los recursos limitados de la Raspberry Pi. Por otro, cuenta con compatibilidad nativa con Grafana, lo que simplificó considerablemente la integración entre ambas herramientas.

MariaDB constituye el medio a través del cual interactúan la interfaz gráfica y el servicio HiveService. En ella se almacenan las mediciones, configuraciones y eventos de todas las Colmenas HiveCare registradas en el sistema, organizados en siete tablas. Cabe destacar que la base de datos no cumple únicamente un rol

Capítulo 8. Software

Tabla 8.1: Estructura de la tabla *mediciones*, que almacena las lecturas individuales de temperatura y RSSI de cada Marco HiveCare por mensaje recibido, incluyendo el identificador de la colmena a la que pertenece cada medición. La columna *Nulo* indica si el campo admite valores nulos en la base de datos.

Campo	Tipo	Nulo	Descripción
id	bigint	NO	Identificador único autoincremental
timestamp	datetime	NO	Fecha y hora de la medición
id_colmena	varchar	NO	Identificador de la colmena
nro_tag	int	NO	Número de orden del marco
uid	varchar	SI	UID del tag del marco
rssi	int	SI	Intensidad de señal de la lectura
temp1	float	SI	Temperatura sensor Cerca
temp2	float	SI	Temperatura sensor Centro
temp3	float	SI	Temperatura sensor Lejos

Tabla 8.2: Estructura de la tabla *mediciones_generales*, que registra los datos globales de cada mensaje recibido: temperatura exterior, identificador de mensaje y contador de reinicios del *watchdog*.

Campo	Tipo	Nulo	Descripción
id	bigint	NO	Identificador único autoincremental
timestamp	datetime	NO	Fecha y hora del mensaje
id_colmena	varchar	NO	Identificador de la colmena
ext_temp	float	SI	Temperatura exterior
msg_id	int	SI	Identificador del mensaje
wdg_count	int	SI	Contador de reinicios por watchdog timer

de almacenamiento, sino que también actúa como canal de comunicación entre la interfaz gráfica y HiveService: cuando el usuario modifica una configuración desde Grafana, el cambio se escribe en la base de datos y es el servicio quien lo detecta y acciona en consecuencia.

La tabla *mediciones* (Tabla 8.1) almacena las lecturas individuales de cada Marco HiveCare. Por cada marco leído se registran el *timestamp*, el identificador de la colmena, el número de tag, su UID, el *RSSI* (*Received Signal Strength Indicator*) y las tres temperaturas correspondientes a los sensores Cerca, Centro y Lejos respecto al tag.

La tabla *mediciones_generales* (Tabla 8.2) complementa a la anterior almacenando los datos globales de cada mensaje recibido, independientemente de los marcos leídos. Esta separación permite distinguir los datos generales del mensaje de los datos específicos de cada marco.

La tabla *configuraciones* (Tabla 8.3) contiene una entrada por colmena con los

8.3. Base de datos: MariaDB

Tabla 8.3: Estructura de la tabla *configuraciones*, que almacena los parámetros configurables por colmena y los indicadores de estado utilizados por HiveService para coordinar el flujo de configuración remota vía MQTT.

Campo	Tipo	Nulo	Descripción
id_colmena	varchar	NO	Identificador de la colmena (PK)
periodo	int	SI	Período de muestreo
smart_frames	int	SI	Cantidad de Marcos HiveCare activos
processed	tinyint	SI	Indica si la configuración fue enviada por MQTT
ack_recived	tinyint	SI	Indica si la colmena confirmó la configuración

Tabla 8.4: Estructura de la tabla *colmenas*, que registra las colmenas asociadas a cada usuario, permitiendo que distintos usuarios asignen nombre y descripción independientes a una misma colmena.

Campo	Tipo	Nulo	Descripción
id	int	NO	Identificador único autoincremental
id_colmenas	varchar	NO	Identificador de la colmena
nombre	varchar	SI	Nombre asignado por el usuario
descripcion	varchar	SI	Descripción asignada por el usuario
usuario	int	SI	Identificador del usuario

parámetros configurables y dos indicadores de estado que utiliza HiveService para coordinar el flujo de configuración remota.

La tabla *colmenas* (Tabla 8.4) registra las colmenas agregadas por cada usuario. Dado que más de un usuario puede registrar la misma colmena, cada uno puede asignarle nombre y descripción propios.

La tabla *colmena_uids_detectadas* (Tabla 8.5) lleva el registro histórico de los marcos detectados por cada colmena, indicando para cada UID la fecha de primera detección y si estuvo activo en el último mensaje recibido.

La tabla *colmena_marcos* (Tabla 8.6) almacena el orden de los marcos dentro de cada colmena, asociando cada posición con el UID del marco asignado a esa posición.

Por último, la tabla *power_status* (Tabla 8.7) registra el estado de las señales *CHG* y *P_GOOD* del módulo BQ24074, permitiendo estimar el estado de la batería y del panel solar a lo largo del tiempo. Cabe destacar que ambas señales son activas

Capítulo 8. Software

Tabla 8.5: Estructura de la tabla *colmena_uids_detectadas*, que mantiene el historial de marcos detectados por cada colmena, registrando la fecha de primera detección y si el marco estuvo activo en el último mensaje recibido.

Campo	Tipo	Nulo	Descripción
id	int	NO	Identificador único autoincremental
id_colmena	varchar	NO	Identificador de la colmena
uid	varchar	NO	UID del marco detectado
fecha_detectada	timestamp	SI	Fecha de primera detección
activa	tinyint	SI	Indica si estuvo activo en el último mensaje

Tabla 8.6: Estructura de la tabla *colmena_marcos*, que define el orden físico de los marcos dentro de cada colmena asociando cada posición numérica al UID del marco correspondiente.

Campo	Tipo	Nulo	Descripción
id	int	NO	Identificador único autoincremental
id_colmena	varchar	NO	Identificador de la colmena
numero_marco	int	NO	Posición del marco en la colmena
uid	varchar	SI	UID del marco asignado a esa posición

en nivel bajo, por lo que un valor de cero indica que la condición está activa y un valor de uno indica que no lo está.

8.4. Conexión remota

Para habilitar el acceso remoto al sistema en esta etapa del proyecto, se adoptó Tailscale como solución práctica. Tailscale es una VPN basada en el protocolo WireGuard que permite interconectar dispositivos a través de Internet simulando su pertenencia a una misma red local, evitando la necesidad de configuraciones adicionales en la infraestructura de red tales como redirección de puertos, asignación de direcciones IP públicas o servicios de DNS dinámico. Las comunicaciones establecidas cuentan con cifrado de extremo a extremo, garantizando la confidencialidad e integridad de los datos intercambiados.

La versión gratuita de Tailscale limita la cantidad de usuarios a tres, por lo que se optó por utilizar únicamente dos. El primero corresponde al administrador del sistema, con permisos para configurar la VPN. El segundo es una cuenta de acceso general destinada a los usuarios externos del Sistema HiveCare, con permisos

8.4. Conexión remota

Tabla 8.7: Estructura de la tabla *power_status*, que registra el estado de las señales *CHG* y *P_GOOD* del módulo BQ24074 a lo largo del tiempo, permitiendo estimar el nivel de carga de la batería y la disponibilidad de energía solar. Ambas señales son activas en nivel bajo.

Campo	Tipo	Nulo	Descripción
id	bigint	NO	Identificador único autoincremental
timestamp	datetime	NO	Fecha y hora del registro
id_colmena	varchar	NO	Identificador de la colmena
solar_panel_status	tinyint	SI	Estado de la señal P_GOOD
battery_status	tinyint	SI	Estado de la señal Charging

restringidos a la visualización de los equipos en la red sin posibilidad de modificar su configuración. Para el acceso a la interfaz gráfica, Tailscale asigna un nombre de dominio a cada dispositivo en reemplazo de su dirección IP, y permite generar certificados para habilitar conexiones seguras mediante HTTPS.

Cabe mencionar que esta solución es adecuada para el alcance actual del proyecto, pero en un escenario de producción donde la red de colmenas crezca y el sistema sea accedido por múltiples usuarios de forma habitual, la alternativa apropiada sería registrar un dominio propio y exponer el servicio directamente a través de Internet, eliminando la dependencia de una herramienta de terceros.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 9

Resultados experimentales y pruebas de campo

Una vez finalizada la implementación del sistema, se realizaron distintas pruebas de funcionamiento con el objetivo de validar el sistema completo. Estas pruebas abarcan la comunicación *NFC* (*Near Field Communication*), el consumo energético, el funcionamiento del sistema de *energy harvesting*, la transmisión de datos mediante *NB-IoT* (*Narrowband Internet of Things*) y la adquisición de temperatura.

En este capítulo se presentan las pruebas realizadas para validar experimentalmente el funcionamiento integral del sistema desarrollado. En primer lugar, en la Sección 9.1, se evalúa la comunicación *NFC* entre el lector y los distintos Marcos HiveCare, tanto para un único tag como para múltiples tags simultáneos dentro de la colmena, analizando el impacto de las interferencias y del acoplamiento entre antenas sobre la distancia máxima de lectura.

Posteriormente, en la Sección 9.2, se analiza cómo la tensión de alimentación del lector *NFC* afecta el alcance del sistema y se justifica la incorporación de un convertidor *step-up* para recuperar la distancia de lectura requerida. Luego, en la Sección 9.3, se estudia la frecuencia de resonancia de la antena implementada en el Marco HiveCare, validando experimentalmente el ajuste realizado mediante mediciones con un *VNA* (*Vector Network Analyzer*).

A continuación, en la Sección 9.4, se presentan las pruebas de transmisión de datos mediante *NB-IoT* y el análisis de conectividad del sistema en condiciones reales de operación. En la Sección 9.5, se analiza la viabilidad de utilizar el *RSSI* (*Received Signal Strength Indicator*) como mecanismo para determinar automáticamente la posición relativa de los marcos dentro de la colmena.

Por otra parte, en la Sección 9.6, se evalúa el consumo energético global del sistema, su autonomía y el comportamiento del sistema de carga solar. Luego, en la Sección 9.7, se estudia la aceptación del sistema por parte de la colonia de abejas y el posible impacto del funcionamiento electrónico sobre su comportamiento natural.

Finalmente, en la Sección 9.8, se analizan las temperaturas relevadas dentro de la colmena, validando la utilidad del sistema para detectar regiones asociadas al nido de cría. En la Sección 9.9, se discute la robustez general del sistema frente a

Capítulo 9. Resultados experimentales y pruebas de campo

condiciones ambientales reales y se identifican las principales limitaciones observadas durante las pruebas de campo.

9.1. Validación de la comunicación NFC

En primera instancia, se validó la correcta comunicación entre el lector NFC y un único tag, verificando que el proceso completo, desde la detección hasta la lectura de los sensores de temperatura, se realice de manera satisfactoria.

Posteriormente, se evaluó el comportamiento del sistema en presencia de múltiples tags dentro del campo del lector. Para ello, se introdujeron progresivamente distintos marcos dentro de la colmena, analizando la capacidad del lector para identificar y comunicarse con cada uno de ellos.

El agregado de más marcos agrega la complejidad de interferencias en la lectura. Si bien, como fue mencionado en el Capítulo 3, NFC presenta métodos de anticollisión, no es claro si las distancias de lectura se mantienen intactas o no con más tags en el campo. Para las medidas de distancia, se cuantificó en base a qué posición de marco se lee. Entendiéndose el primer marco como el más cercano al lector y el décimo como el más lejano.

Al realizar las pruebas se obtuvo que la distancia máxima de lectura de un único marco presente en el campo corresponde a la posición ocho. Sin embargo, al introducir un segundo marco, esta distancia se reduce a la posición siete. Finalmente, con tres marcos presentes en el sistema, la distancia máxima se reduce a la posición seis. Estas son las distancias máximas que se obtuvieron para cada configuración (1, 2 o 3 marcos en la cámara de cría), el usuario puede decidir según su preferencia cual usar e incluso estar por debajo de los rangos en distancia mencionados para cada configuración.

Esta disminución no se atribuye al consumo energético de los tags, ya que el *energy harvesting* se desactiva luego de la lectura de cada uno. Por lo tanto, es posible asociar este comportamiento a fenómenos de acoplamiento entre antenas y a la modificación del campo electromagnético generado por el lector en presencia de múltiples resonadores. Un efecto notado en la práctica fue que la distancia variaba no solo con la cantidad de marcos introducidos sino que también lo hacía con la distribución de esos marcos. Observando que la mayor distancia era lograda con los marcos distribuidos de manera equiespaciada.

9.2. Impacto de la tensión de alimentación en la distancia de lectura

Las pruebas iniciales fueron realizadas con el lector NFC alimentado con una fuente de 5 V. Debido a la capacidad de la batería (2500 mAh), la versión final se implementó con una alimentación de 3,3 V. Dado que el módulo de lector NFC utiliza directamente esta tensión para la generación del campo *RF* (*radio frequency*), una reducción en la tensión de alimentación implica una disminución en la potencia

9.3. Frecuencia de resonancia de la antena del marco diseñado

transmitida y, por consiguiente, en la distancia de lectura. En estas condiciones, el sistema logra leer un único marco hasta la posición seis, y dos marcos hasta las posición cuatro. Frente a esta situación, se evaluó la incorporación de un convertidor *step-up* de 3,3 V a 5 V para alimentar el lector NFC.

La inclusión de este módulo implica un incremento en el consumo del sistema en estado activo de $522 \mu A$, representando un impacto bajo en el total del ciclo y permitiendo recuperar la distancia de lectura original. Dado que esta mejora resulta crítica para la aplicación, permitiendo alcanzar zonas centrales de la colmena, se decidió incorporar el convertidor a la solución final.

9.3. Frecuencia de resonancia de la antena del marco diseñado

La antena del Marco HiveCare fue diseñada para resonar a 13,56 MHz de forma de lograr un acoplamiento inductivo con la antena del lector y así maximizar la transferencia de energía. Para esto se realizaron ciertas pruebas de laboratorio que llevaron a obtener el valor de capacitancia a ser introducida en el circuito de adaptación de la antena para ajustar su frecuencia de resonancia a la deseada.

La antena incorporada en la solución final difiere de la utilizada en el análisis mencionado en ciertos aspectos. La antena fue realizada con alambre acerado, mientras que las pruebas se hicieron con un alambre de cobre de diámetro mayor. Además el aspecto artesanal genera dispersión en las características finales de la antena construida (por ejemplo en la capacidad equivalente paralelo). Estos cambios pueden haber impactado en la frecuencia de resonancia. Para asegurar acoplamiento inductivo con la antena del lector, se realizó un barrido en capacitancias alrededor del valor hallado en los análisis. En el barrido se fue midiendo la máxima distancia de lectura, entendiendo que el acoplamiento inductivo se dará cuando se logre la mayor distancia de lectura.

Una vez obtenido el valor del capacitor óptimo para la antena implementada, se realizó un análisis con un VNA (*Vector Network Analyzer*) para confirmar la frecuencia de resonancia de la antena del marco. En la Figura 9.1 se puede observar que la frecuencia de resonancia de la antena es de 13,63 MHz. Frecuencia bastante cercana a la deseada, pero aún así, alejada del margen de 7 kHz establecido por la norma. Con esto se concluye que la capacidad hallada para el circuito de adaptación es buena pero podría hacerse un ajuste más fino para entrar dentro del rango aceptado por la norma y tal vez allí, obtener mejores resultados de desempeño en cuanto a distancias.

Por otro lado, a partir de la impedancia en la frecuencia de resonancia, se puede obtener el factor de calidad Q de la antena diseñada como:

$$Q = \frac{3257,7 \Omega}{2 \cdot \pi \cdot 13,56 \times 10^6 \text{ Hz} \cdot 5,98 \times 10^{-6} \text{ H}} = 6,39.$$

La caída de este valor respecto a lo analizado teóricamente en el Capítulo 5 se atribuye principalmente al cambio de material utilizado para la construcción de la

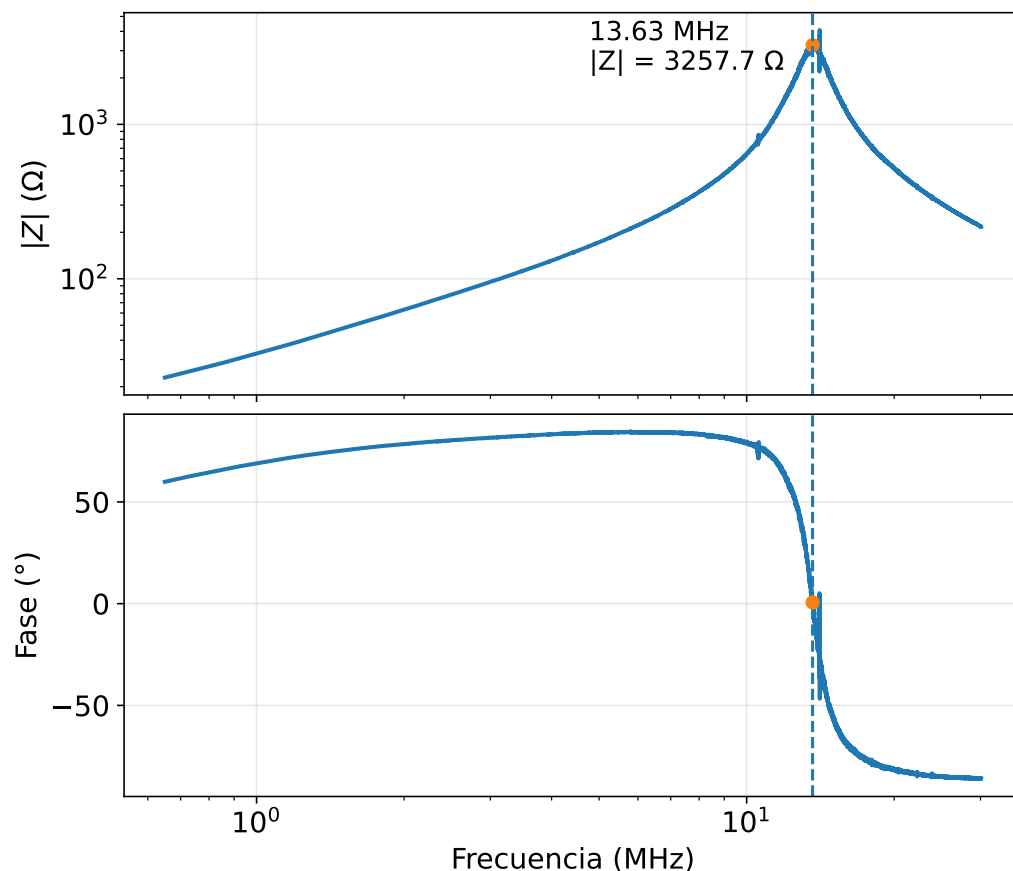


Figura 9.1: Diagrama de módulo de la impedancia de la antena diseñada para el marco con el capacitor de adaptación hallado obtenidas mediante un VNA. Se puede observar que la impedancia alcanza su punto máximo a los 13,63 MHz.

antena. En el capítulo se hace el análisis considerando un cable de cobre pero la antena final fue implementada con alambre acerado, cuya resistividad es mayor. El valor final hallado resulta inferior al rango recomendado para NFC (10-30), por lo que podría estudiarse a futuro si un incremento de este valor mejora el desempeño de la antena.

9.4. Transmisión de datos mediante NB-IoT

Durante las pruebas de transmisión de datos mediante NB-IoT se observaron pérdidas de paquetes. Para mitigar este problema, se configuró el *QoS* (*Quality of Service*) en 1, lo que permitió mejorar la confiabilidad de la comunicación a costa de un mayor uso de recursos de red.

Con respecto a la conexión NB-IoT, se realizó un estudio con la Colmena HiveCare instalada en campo, para determinar qué tan frecuente el sistema no logra establecer conexión con el servidor y cuántos mensajes son encolados. El estudio

9.5. Evaluación del uso del *RSSI* para posicionamiento

se realizó en un período de quince días, acumulando un conjunto total de 1577 mensajes transmitidos. De esa cantidad de mensajes, 717 debieron ser encolados por problemas de conectividad. Esto arroja un porcentaje de conexión del 54,4%. La cantidad promedio de mensajes encolados es de 2,1, siendo la máxima cantidad de mensajes encolados de 10.

Este análisis muestra que la conectividad NB-IoT no es un punto fuerte en el sistema y podría investigarse a futuro cómo mejorar este aspecto. En el diseño del firmware se tomaron decisiones que podrían haber influido en este comportamiento. En particular, los tiempos de espera implementados para recibir la respuesta del módulo NB-IoT son inferiores a los máximos indicados en la hoja de datos del BC66 [57, 58]. Esta decisión se basó en realizar un compromiso entre espera de la respuesta y consumo del ciclo. Se podría revisar dicho compromiso y evaluar si un incremento en los tiempos de espera mejoran la conectividad sin incrementar el consumo promedio total. A pesar de esto, el sistema tiene capacidad para almacenar hasta 40 mensajes, por lo que, si bien se trata de un aspecto mejorable, no resulta crítico, ya que el sistema cuenta con capacidad suficiente para almacenar temporalmente los mensajes hasta restablecer la conectividad.

9.5. Evaluación del uso del *RSSI* para posicionamiento

Una de las hipótesis realizadas en el transcurso del proyecto fue que sería posible determinar el orden de los marcos en la Colmena HiveCare a través del *RSSI* (*Received Signal Strength Indicator*) de la comunicación. Entendiendo que cuanto mayor sea el *RSSI* indicaría que el Marco HiveCare con el que se está intercambiando información es más cercano.

Para validar hipótesis, se realizaron ensayos en laboratorio utilizando tres Marcos HiveCare. Durante las pruebas, se identificó físicamente la posición de cada marco y se registraron las medidas del *RSSI* obtenidas en la comunicación, con el objetivo de analizar la relación entre la intensidad de señal y la cercanía entre dispositivos.

Sin embargo, estos resultados experimentales mostraron una alta variabilidad en los valores del *RSSI*, con errores superiores al 50 % respecto a la correcta localización de los marcos. Esto impide utilizar este parámetro como indicador confiable de posición. En consecuencia, se descartó esta estrategia y se optó por incorporar en la interfaz gráfica una funcionalidad que permite al usuario definir manualmente el orden de los marcos.

9.6. Consumo energético y autonomía

Se realizaron mediciones de consumo del sistema en distintos estados de operación, a partir de las cuales se estimó la autonomía de la batería. Los resultados obtenidos indican una autonomía aproximada de cuatro días en ausencia de recarga por parte del panel solar. Los cálculos relativos a la estimación se encuentran en el Capítulo 6. No obstante, se debe tener en cuenta que se probó el funcionamiento

Capítulo 9. Resultados experimentales y pruebas de campo

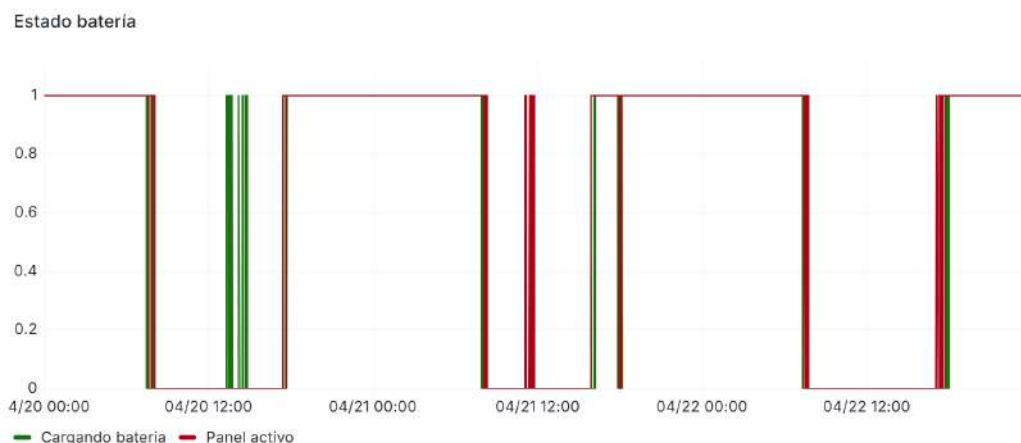


Figura 9.2: Evolución de las señales de estado del sistema de carga en una ventana temporal de tres días. Período de lectura de cinco minutos. En rojo se observa cuándo el panel solar entrega energía y en verde cuándo la batería está siendo cargada. Ambas señales son activas por nivel bajo.

de la colmena desde principios de marzo del 2026 hasta la fecha (finales de julio del 2026) con un periodo de muestreo de diez minutos, donde la irradiación solar estuvo por debajo del promedio para el invierno y el sistema nunca se quedó sin batería.

Con el objetivo de analizar el comportamiento del sistema de carga, se monitorearon las señales *PGOOD* y *CHG* del módulo de batería, las cuales fueron registradas y visualizadas en la interfaz gráfica. Según la documentación del módulo, la señal *CHG* indica el estado de carga de la batería, mientras que *PGOOD* indica la presencia de una fuente de alimentación (panel solar) suficiente para energizar al sistema. Ambas señales son activas en nivel bajo.

En la Figura 9.2 se observa el comportamiento de estas señales a lo largo del tiempo. La señal *PGOOD* presenta un comportamiento bastante cíclico, asociado a la disponibilidad de luz solar. Durante periodos de baja o nula irradiación, la señal permanece inactiva, mientras que se activa en presencia de suficiente energía solar, típicamente, desde la mañana hasta la tarde.

Se observan también variaciones dentro de un mismo período de luz solar, que se atribuyen a la presencia de nubosidad en el ambiente. Asimismo, se identifican intervalos en los cuales la señal *PGOOD* se encuentra activa mientras que *CHG* permanece inactiva, indicando que la batería ha alcanzado su carga completa. Este último comportamiento es observado en varios días de la muestra, indicando que el sistema de generación y almacenamiento de energía se encuentra correctamente dimensionado para las condiciones de operación evaluadas (otoño con período de lectura de cinco minutos).

Un caso que se nota en los comienzos y finales de las etapas de luz solar es que la señal de *CHG* está activa mientras que *PGOOD* no lo está. Esto se debe a un comportamiento propio del módulo, el cual solo activa *PGOOD* si el voltaje de entrada supera al de la batería más cierto umbral, si el umbral no es superado

9.7. Aceptación del sistema por parte de la colonia



Figura 9.3: Marco del sistema luego de tres semanas de introducido en la colmena. Se puede observar en él cómo las abejas aceptaron el marco modificado y comenzaron a estirarlo. En el núcleo de abejas que se observa en la mitad del marco se puede ver las celdas construidas sobre el costado izquierdo del conjunto de abejas mencionado. Colmena instalada en el CRS (Centro Regional Sur), dependencia de la Facultad de Agronomía.

puede suceder que la batería comience la carga pero *PGOOD* aún no esté activa.

9.7. Aceptación del sistema por parte de la colonia

Con el objetivo de evaluar la compatibilidad del sistema desarrollado con el entorno natural de la colmena, se introdujeron los marcos plásticos que integran los tags en el interior de la colonia. Luego de su incorporación, se observó que las abejas aceptaron los marcos sin evidenciar comportamientos de rechazo. En particular, comenzaron a trabajar sobre los mismos de forma normal, estirando cera como se puede ver en la Figura 9.3.

Adicionalmente, se evaluó el impacto del lector externo, incluyendo tanto la irradiación del campo de radiofrecuencia necesario para la comunicación como la transmisión de datos mediante NB-IoT. Durante el período de prueba, no se detectaron alteraciones visibles en el comportamiento de la colonia. Las abejas permanecieron activas, manteniendo sus tareas habituales dentro de la colmena, sin signos de perturbación atribuibles al funcionamiento del sistema.

En conjunto, estos resultados indican que el sistema propuesto presenta un adecuado nivel de aceptación por parte de la colonia, sin interferir de manera apreciable en su dinámica natural.

9.8. Análisis de datos de temperatura relevados

En la Figura 9.4 se puede observar el comportamiento de las temperaturas de una colmena a lo largo de un día. La figura muestra dos marcos, los cuales se

Capítulo 9. Resultados experimentales y pruebas de campo

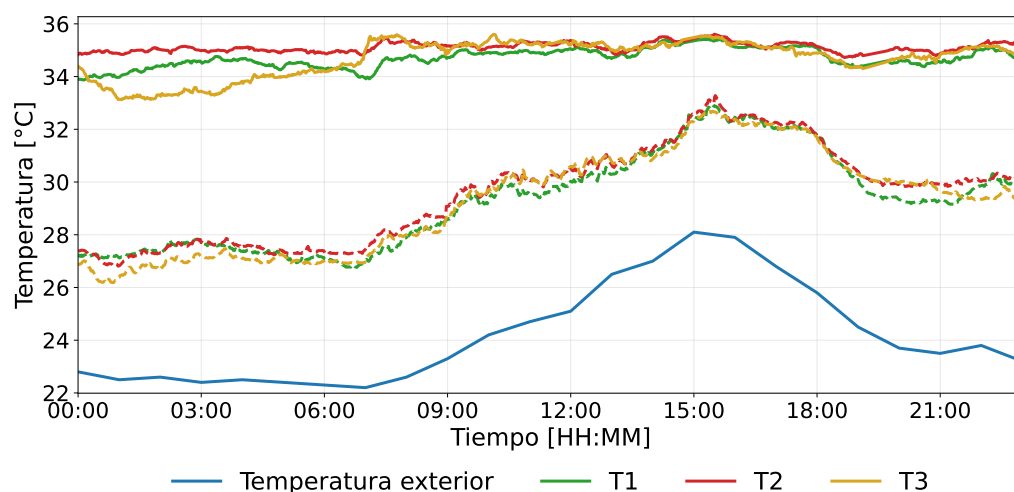


Figura 9.4: Gráficas relevadas en una colmena en campo. En línea continua se observan las temperaturas correspondientes al marco ubicado en la posición 4, encontrado dentro del nido de cría (los marcos aledaños presentan crías). En línea punteada se observan las temperaturas correspondientes al marco ubicado en la posición 2, encontrado fuera del nido de cría.

encuentran posicionados en el segundo y cuarto lugar. Se evidencia aquí, cómo fácilmente diferenciables son las áreas en donde se encuentran las crías de las abejas y las áreas en donde no. Se puede ver que los sensores localizados en el Marco HiveCare ubicado en la posición cuatro presentan una temperatura constante alrededor de los 34°C , mientras que la temperatura en el Marco HiveCare ubicado en la posición dos tiene un comportamiento variable a lo largo del día, viéndose afectada principalmente por la temperatura exterior.

Esto permite concluir que el sistema es efectivamente útil para detectar los diferenciales de temperaturas en el interior de una colmena y con esto poder estimar el tamaño del nido de cría y detectar eventuales eventos extraordinarios como enfermedades o plagas.

9.9. Evaluación del sistema en condiciones reales

El sistema fue sometido a condiciones ambientales reales durante el período de prueba, incluyendo episodios de lluvia y viento. En dichas condiciones, el dispositivo continuó operando sin interrupciones funcionales evidentes, lo que indica un adecuado desempeño frente a factores climáticos habituales en el entorno de aplicación.

No obstante, se registraron interrupciones en el funcionamiento de la *Raspberry Pi*. Estas fallas se asociaron a eventos de desenergización del sistema, lo que sugiere la necesidad de mejorar la robustez de la fuente de alimentación o incorporar mecanismos de respaldo energético.

Por otra parte, se observó en cierto punto, una interrupción en la transmisión de temperaturas internas a la colmena. Esta interrupción fue causada por una

9.9. Evaluación del sistema en condiciones reales

desoldadura de la antena del lector. Esto demostró uno de los puntos frágiles del sistema, la antena es un alambre de cobre soldado a pads *SMD (Surface-Mount Device)* de un módulo de desarrollo modificado.

En conjunto, si bien el sistema demostró una adecuada resistencia a condiciones ambientales adversas, se identificaron aspectos a mejorar en términos de continuidad operativa y estabilidad de la lectura. Estos puntos podrán ser objeto de revisión en futuros trabajos.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 10

Conclusiones y trabajo futuro

En el presente trabajo se desarrolló HiveCare, una plataforma IoT orientada al monitoreo no invasivo de temperatura en colmenas tipo Langstroth mediante sensores RFID/NFC pasivos. El sistema propuesto integró sensado, comunicación inalámbrica de corto y largo alcance, almacenamiento remoto y visualización de datos, constituyendo una solución integral orientada a la apicultura de precisión.

A lo largo del proyecto se abordaron diversos desafíos asociados tanto al entorno apícola como a las restricciones técnicas propias del sistema. Entre ellos se destacan la necesidad de minimizar la invasividad sobre la colmena, evitar el uso de cableado interno, garantizar un bajo consumo energético y proveer conectividad usando la red celular con la tecnología NB-IoT.

Desde el punto de vista del hardware, se desarrollaron los Marcos HiveCare, capaces de realizar mediciones de temperatura utilizando tags NFC energizados inalámbricamente desde el exterior de la colmena. Una característica distintiva de la arquitectura propuesta es el empleo de tags NFC con interfaz I²C y capacidades de *energy harvesting*, lo que permitió prescindir completamente de microcontroladores y fuentes de alimentación locales dentro de los marcos. De esta forma, los sensores de temperatura pueden comunicarse directamente con el tag NFC, simplificando significativamente el diseño electrónico y permitiendo implementar una solución totalmente pasiva. Esto reduce las necesidades de mantenimiento, elimina la dependencia de baterías y evita la introducción de elementos potencialmente perjudiciales para la colonia.

Asimismo, se diseñaron antenas específicas para los marcos y el lector, junto con sus correspondientes redes de adaptación, con el objetivo de maximizar la transferencia de energía y la sensibilidad de comunicación. Como resultado, fue posible extender el alcance de lectura desde las distancias típicas de pocos centímetros asociadas a sistemas NFC convencionales hasta aproximadamente 35 cm en las condiciones más favorables evaluadas. Este resultado demuestra que, manipulando la geometría de la antena y adecuando el sistema de acoplamiento, es posible ampliar significativamente el alcance práctico de tecnologías basadas en los estándares NFC utilizando componentes y módulos disponibles comercialmente, facilitando además la replicación de la solución y su aplicación en otros contextos tecnológicos.

Capítulo 10. Conclusiones y trabajo futuro

En cuanto al Lector HiveCare, se desarrolló un sistema capaz de recolectar la información proveniente de múltiples marcos y transmitirla hacia una infraestructura remota mediante NB-IoT. A su vez, se implementaron estrategias de bajo consumo y alimentación autónoma, permitiendo la operación prolongada del sistema sin intervención frecuente del usuario.

Complementariamente, se desarrolló una infraestructura de software basada en una Raspberry Pi, encargada de la gestión local del sistema. En ella se integran la base de datos, los servicios de monitoreo y comunicación con las Colmenas HiveCare, así como la interfaz gráfica de usuario. Esta infraestructura permite acceder de forma remota a las mediciones obtenidas en la colmena y centralizar la gestión de la información generada por el sistema. Durante su diseño se priorizó la facilidad de uso, procurando ofrecer una interfaz intuitiva sin sacrificar funcionalidades esenciales de configuración, monitoreo y comunicación con el sistema lector. Asimismo, la arquitectura fue concebida considerando escenarios con múltiples colmenas, permitiendo escalar el sistema mediante la incorporación de nuevas Colmenas HiveCare sin requerir modificaciones significativas en la infraestructura.

Los resultados experimentales obtenidos permitieron validar la viabilidad técnica de la solución propuesta. En particular, se demostró la capacidad de energizar y comunicar sensores pasivos ubicados dentro de los marcos de la colmena, transmitir remotamente la información recolectada mediante redes NB-IoT y operar de forma integrada a través de todos los componentes desarrollados. Las pruebas realizadas en condiciones reales de operación evidenciaron además que las colonias aceptaron adecuadamente la incorporación de los dispositivos, manteniendo un comportamiento compatible con el funcionamiento normal de la colmena. De esta forma, se validó no solamente el desempeño individual de los distintos subsistemas, sino también el funcionamiento robusto y confiable de la plataforma completa en un entorno de uso real.

Por otra parte, la información obtenida mediante el monitoreo de temperatura en la cámara de cría constituye una herramienta de utilidad tanto para aplicaciones productivas como de investigación. Desde el punto de vista del apicultor, permite disponer de información objetiva e histórica sobre el estado de la colonia, facilitando el monitoreo continuo y la detección temprana de posibles anomalías. Al mismo tiempo, la capacidad de registrar perfiles térmicos dentro de la colmena abre nuevas posibilidades para el estudio del comportamiento de las abejas frente a diferentes condiciones ambientales, sanitarias o productivas.

En síntesis, HiveCare demuestra que es posible implementar una solución de monitoreo apícola no invasiva basada en sensores RFID/NFC pasivos, combinando sensado, autonomía energética, conectividad remota y escalabilidad en una única plataforma. Los resultados obtenidos validan tanto la viabilidad técnica de la propuesta como su potencial aplicación en entornos productivos reales, constituyendo una base sólida para futuras líneas de investigación y desarrollo en el ámbito de la apicultura de precisión.

10.1. Trabajo a futuro

Durante el desarrollo del proyecto también se identificaron diversas limitaciones y aspectos pendientes de mejora. En primer lugar, el alcance logrado mediante NFC resultó menor al inicialmente esperado. Experimentalmente se alcanzó la lectura de hasta tres marcos, llegando a cubrir poco más de la mitad de la distancia total correspondiente a la colmena, lo que limita la cobertura completa de la cámara de cría. No obstante, en ensayos realizados con un único marco presente en el campo del lector, se logró alcanzar hasta el octavo cuadro de una colmena de diez marcos, resultado que puede considerarse satisfactorio dentro de las limitaciones propias de la tecnología empleada. Durante las pruebas también se observó que la distancia máxima de lectura disminuye a medida que aumenta la cantidad de marcos presentes simultáneamente dentro del campo electromagnético del lector. Comprender en mayor profundidad las causas de este fenómeno y desarrollar estrategias que permitan reducir dicho efecto podría mejorar significativamente el alcance global del sistema.

En relación con el sistema de comunicación NFC, una línea de trabajo particularmente relevante consiste en el desarrollo de nuevas antenas y circuitos de adaptación específicos para esta aplicación. Actualmente, el diseño de la antena del lector se encuentra condicionado por el circuito de adaptación incorporado en el módulo comercial utilizado. Un rediseño completo del frente de radiofrecuencia permitiría optimizar el sistema de transmisión de energía, incrementar el tamaño y las características de la antena y potencialmente mejorar las distancias de lectura alcanzables. Asimismo, podrían evaluarse lectores NFC de mayores prestaciones, como el integrado ST25R300, que podrían proporcionar mayores capacidades de transmisión y sensibilidad de recepción respecto a las soluciones utilizadas en este trabajo.

Por otro lado, no fue posible automatizar la detección de la posición de los marcos dentro de la colmena mediante el uso de valores de RSSI. Los ensayos realizados no produjeron resultados satisfactorios, ya que las variaciones observadas en la intensidad de señal no permitieron obtener una estimación robusta ni repetible de la ubicación de los marcos. Como solución provisoria, el sistema permite establecer manualmente desde la interfaz gráfica la posición de los marcos dentro de la colmena. Además, si bien el sistema fue concebido para operar independientemente de la orientación de los marcos, no se logró resolver la detección automática de rotaciones producidas durante las tareas habituales de manejo realizadas por el apicultor, ni se implementó un mecanismo en la interfaz que permita configurar dicha orientación manualmente, necesario para identificar a los sensores de temperatura.

Con respecto a la infraestructura remota implementada, es una solución funcional que permite la validación del sistema pero no robusta como para considerarse una solución final. Una implementación orientada a producción requeriría aspectos adicionales tales como gestión de dominios propios, mecanismos robustos de autenticación y administración centralizada de dispositivos. Por otro lado, futuras versiones del sistema podrían incorporar mejoras significativas en la arquitectura de comunicaciones remotas. Entre ellas, la utilización de un broker MQTT propio

Capítulo 10. Conclusiones y trabajo futuro

permitiría un mayor control sobre la infraestructura, así como mejores posibilidades de escalabilidad y administración de múltiples dispositivos distribuidos. Adicionalmente, sería deseable incorporar mecanismos de seguridad más robustos en las comunicaciones, incluyendo cifrado mediante TLS y autenticación basada en certificados para MQTT, mejorando así la protección de los datos y la seguridad global del sistema.

Desde el punto de vista del firmware y la arquitectura de software, también se identificaron oportunidades de simplificación. En particular, el parámetro *correction time* actualmente es enviado al firmware para que el microcontrolador calcule localmente el tiempo efectivo de suspensión. Sin embargo, este cálculo podría resolverse directamente en el servicio remoto, enviando al dispositivo únicamente el tiempo real de *sleep* requerido. Esto permitiría simplificar la lógica interna del firmware y reducir complejidades innecesarias. Otro punto a mejorar en lo que respecta al software es implementar un sistema de alarmas para detectar ciertos eventos como puede ser la enjambrazón. Por ejemplo, si se tiene un aumento de temperatura durante 30 minutos antes que se de la enjambrazón se envía un mensaje o una alerta al apicultor para que tome una acción preventiva.

En cuanto al Lector HiveCare, el sistema actual fue construido principalmente utilizando módulos de desarrollo comerciales. Si bien esta decisión permitió acelerar el prototipado y la validación conceptual, una futura versión del sistema podría mejorar significativamente con el diseño de una PCB específica e integrada, optimizada en varios aspectos como en lo eléctrico, los costos, el volumen (tamaño) y en lo mecánico. Asociado a esto, sería conveniente rediseñar la conexión de la antena del lector, dado que actualmente se realiza mediante una unión soldada relativamente frágil.

Otro aspecto relevante identificado durante el desarrollo fue la complejidad mecánica asociada a la construcción de los Marcos HiveCare. Particularmente, el proceso de enebrado manual de la antena resultó tedioso, delicado y demandó tiempos elevados de fabricación. Esto sugiere la conveniencia de desarrollar soluciones mecánicas específicamente diseñadas para esta aplicación, por ejemplo mediante piezas personalizadas fabricadas utilizando impresión 3D u otros métodos de manufactura adaptados.

Los resultados obtenidos también muestran que el sistema podría ampliarse incorporando sensores adicionales capaces de monitorear otras variables relevantes para la apicultura de precisión, tales como humedad, peso o actividad acústica. La integración de múltiples variables permitiría obtener una caracterización más completa del estado fisiológico de la colonia.

Finalmente, aunque el presente trabajo se enfocó en el uso de tecnología NFC debido a sus ventajas en términos de bajo consumo, disponibilidad y operación pasiva, podría resultar de interés explorar tecnologías de comunicación alternativas que permitan aumentar significativamente las distancias de lectura. En particular, podrían evaluarse sistemas basados en otras bandas de frecuencia o mecanismos de transferencia energética distintos. No obstante, esto implicaría modificar sustancialmente la arquitectura actual del sistema y reevaluar aspectos asociados a consumo energético, tamaño de antenas, regulación y compatibilidad con el entorno apícola.

10.1. Trabajo a futuro

En síntesis, el desarrollo realizado permitió demostrar la factibilidad de implementar un sistema de monitoreo térmico en colmenas utilizando sensores RFID/NFC pasivos, integrando comunicaciones inalámbricas, sensado no invasivo y monitoreo remoto en una arquitectura funcional y modular. Si bien aún existen limitaciones y múltiples aspectos susceptibles de mejora, los resultados obtenidos constituyen una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el área de apicultura de precisión aplicada a sistemas de monitoreo inteligentes.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice A

Fundamentos del acoplamiento inductivo en sistemas NFC/RFID HF

Los sistemas RFID y NFC que operan en la banda HF, 13,56 MHz, utilizan acoplamiento inductivo para transferir tanto energía como información al lector y el tag. En este tipo de sistemas, las antenas del lector y del tag pueden modelarse como bobinas acopladas magnéticamente, donde la energía es transferida mediante el campo magnético alterno generado por la corriente que circula en la antena transmisora. El presente anexo introduce los fundamentos físicos y eléctricos asociados al acoplamiento inductivo, así como las principales limitaciones y compromisos de diseño involucrados en antenas NFC.

A.1. Generación del campo magnético

Cuando una corriente alterna circula por una bobina, se genera un campo magnético variable en el tiempo en su proximidad. Para una bobina circular ideal de radio R , el campo magnético en su centro puede aproximarse mediante:

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2R},$$

donde:

- B es la densidad de flujo magnético,
- μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío,
- N es el número de espiras,
- I es la corriente que circula por la bobina,
- R es el radio de la bobina.

De esta expresión puede observarse que el campo magnético aumenta linealmente con el número de espiras y con la corriente de excitación. Esto explica por qué aumentar la cantidad de vueltas de una antena NFC permite mejorar el acoplamiento magnético y aumentar la distancia de comunicación.

A.2. Voltaje inducido

Cuando el tag se encuentra inmerso en el campo magnético generado por el lector, aparece un voltaje inducido en su antena debido a la ley de Maxwell-Faraday:

$$V_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt},$$

donde:

- V_{ind} es el voltaje inducido,
- N es el número de espiras del tag,
- Φ es el flujo magnético.

El flujo magnético puede expresarse como:

$$\Phi = B \cdot A$$

siendo A el área efectiva de la bobina.

Por lo tanto, un aumento en el número de espiras o en el área de la antena incrementa el flujo magnético y, en consecuencia, el voltaje inducido. En tags pasivos, este voltaje es rectificado y utilizado para alimentar el circuito integrado interno, permitiendo el funcionamiento sin baterías.

A.3. Inductancia de la bobina

La inductancia de la bobina depende fuertemente de su geometría y del número de espiras. De forma aproximada, la inductancia es proporcional al cuadrado del número de vueltas:

$$L \propto N^2$$

Una expresión simplificada para una bobina es:

$$L \approx \mu \frac{N^2 A}{l}$$

donde:

- L es la inductancia,
- μ es la permeabilidad magnética del medio,
- N es el número de espiras,
- A es el área transversal,
- l es la longitud del circuito magnético equivalente.

Esto implica que pequeñas variaciones en el número de espiras generan cambios significativos en la inductancia de la antena.

A.4. Resistencia serie y pérdidas

Aunque aumentar el número de espiras mejora el acoplamiento inductivo, también produce un incremento de la longitud total del conductor utilizado en la antena. La resistencia eléctrica de un conductor puede expresarse mediante:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

donde:

- R es la resistencia,
- ρ es la resistividad del material,
- l es la longitud del conductor,
- A es el área transversal del conductor.

Al incrementarse la cantidad de vueltas, aumenta la longitud total del cobre y, por lo tanto, la resistencia serie de la antena. Esto introduce pérdidas resistivas que reducen la eficiencia de transferencia de energía.

Adicionalmente, a frecuencias del orden de 13,56 MHz aparece el fenómeno de *skin effect* o efecto pelicular, donde la corriente tiende a circular únicamente por la superficie del conductor, reduciendo el área efectiva de conducción y aumentando aún más la resistencia efectiva de la antena.

A.5. Factor de calidad

El desempeño de una antena resonante suele evaluarse mediante el factor de calidad Q , definido como:

$$Q = \frac{\omega L}{R}$$

donde:

- $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular,
- L es la inductancia,
- R es la resistencia serie equivalente.

Un mayor factor de calidad implica menores pérdidas y un mayor almacenamiento de energía en el circuito resonante. Inicialmente, aumentar el número de espiras mejora el valor de Q , debido al incremento de la inductancia. Sin embargo, si la resistencia serie aumenta excesivamente, el factor de calidad comienza a deteriorarse.

Además, valores demasiado elevados de Q reducen el ancho de banda del sistema resonante, dificultando la correcta transmisión de datos mediante modulación ASK. Por esta razón, el diseño de antenas NFC implica encontrar un compromiso entre eficiencia energética, ancho de banda y estabilidad de comunicación.

A.6. Capacitancias parásitas y frecuencia de resonancia

Las espiras de una antena presentan capacitancias parásitas entre conductores adyacentes. A medida que aumenta la cantidad de vueltas, estas capacitancias también aumentan. La frecuencia de resonancia de una antena resonante puede aproximarse mediante:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

donde:

- f_0 es la frecuencia de resonancia,
- L es la inductancia,
- C es la capacitancia total equivalente.

Un aumento simultáneo de inductancia y capacitancia reduce la frecuencia de resonancia natural de la antena. Si esta frecuencia se aproxima demasiado a la frecuencia de operación del sistema NFC (13,56 MHz), el comportamiento de la antena puede degradarse considerablemente. Entre los efectos observables se encuentran:

- cambios en la impedancia de entrada,
- disminución del acoplamiento inductivo,
- reducción de la potencia transferida,
- desintonización del sistema resonante.

Estas limitaciones adquieren particular relevancia en antenas compactas implementadas sobre PCB, donde las separaciones entre pistas suelen ser reducidas.

A.7. Compromisos de diseño en antenas NFC

El diseño de antenas para sistemas NFC y RFID HF requiere balancear múltiples parámetros eléctricos y geométricos. Incrementar el número de espiras permite aumentar el flujo magnético y el voltaje inducido en el tag, mejorando potencialmente la distancia de comunicación y la energía disponible. Sin embargo, un aumento excesivo de espiras también provoca:

- mayores pérdidas resistivas,
- incremento de capacitancias parásitas,
- disminución del ancho de banda,
- posibles problemas de resonancia y desintonización.

Por este motivo, el diseño práctico de antenas NFC consiste en optimizar simultáneamente el número de vueltas, el tamaño físico, el ancho de pista, la separación entre espiras y la frecuencia de resonancia, de forma de maximizar la eficiencia de transferencia energética y garantizar una comunicación robusta.

A.8. Acoplamiento inductivo

El acoplamiento inductivo es el mecanismo mediante el cual dos bobinas pueden transferir energía e información a través de un campo magnético variable en el tiempo. En sistemas NFC y RFID HF, este fenómeno ocurre entre la antena del lector y la antena del tag, ambas operando como inductores acoplados magnéticamente.

Cuando una corriente alterna circula por la antena del lector, se genera un campo magnético alterno en sus proximidades. Si una segunda bobina (la antena del tag) se encuentra dentro de dicho campo, el flujo magnético generado por el lector concatena las espiras del tag, induciendo una tensión eléctrica según la ley de Maxwell-Faraday.

La eficiencia con la que la energía es transferida entre ambas antenas depende del grado de acoplamiento magnético existente entre ellas. Este comportamiento suele modelarse mediante la inductancia mutua M entre ambas bobinas, la cual depende de factores geométricos y espaciales como:

- la distancia entre antenas,
- la orientación relativa,
- el área efectiva de las bobinas,
- el número de espiras,
- y la similitud geométrica entre ambas antenas.

En general, el acoplamiento inductivo mejora cuando las líneas de campo magnético generadas por una antena atraviesan eficientemente la superficie de la otra. Por este motivo, antenas con geometrías similares, alineadas y de áreas comparables suelen presentar un mejor acoplamiento magnético.

La intensidad del acoplamiento entre dos bobinas puede describirse mediante el coeficiente de acoplamiento k , definido como:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

donde:

- M es la inductancia mutua,
- L_1 y L_2 son las inductancias propias de cada bobina.

El coeficiente k toma valores entre 0 y 1, donde valores cercanos a 1 representan un acoplamiento fuerte y valores cercanos a 0 representan un acoplamiento débil. En sistemas NFC prácticos, el acoplamiento suele ser relativamente bajo debido a las restricciones de tamaño y distancia entre antenas.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice B

Cálculo de resistencias *pull-up* para el bus I²C

El bus *I²C* (*Inter-Integrated Circuit*) utiliza salidas de *open drain*, por lo que requiere resistencias *pull-up* externas para definir el nivel lógico alto de las líneas *SDA* (*Serial Data Line*) y *SCL* (*Serial Clock Line*). La selección adecuada de dichas resistencias debe garantizar el cumplimiento de los parámetros eléctricos especificados por el estándar I²C [50].

En particular, para el modo *Standard-mode* (modo utilizado en la comunicación I²C del Marco HiveCare), la especificación establece:

- Tiempo máximo de subida:

$$t_r \leq 1000 \text{ ns}$$

- Tensión máxima de nivel bajo:

$$V_{OL} \leq 0,4 \text{ V}$$

Por lo tanto, el valor de las resistencias *pull-up* debe encontrarse dentro de un rango que satisfaga simultáneamente ambas restricciones.

B.1. Resistencia mínima

El valor mínimo de la resistencia *pull-up* se determina a partir de la corriente que el dispositivo es capaz de drenar para garantizar el nivel lógico bajo máximo permitido. La resistencia mínima se calcula mediante:

$$R_{PU(min)} = \frac{V_{DD} - V_{OL(max)}}{I_{OL}},$$

donde:

- V_{DD} es la tensión de alimentación del bus,

Apéndice B. Cálculo de resistencias *pull-up* para el bus I²C

- $V_{OL(max)}$ es la tensión máxima de nivel bajo permitida,
- I_{OL} es la corriente máxima que el dispositivo puede drenar.

Los dispositivos I²C presentes en el bus son el NTP5332 y los STTS22H. En ambas hojas de datos, si bien no está clara la capacidad de drenaje de corriente de cada uno, se mencionan condiciones de prueba realizadas con una *sink current* de 3mA. Dado esto, se utiliza este valor para hacer los cálculos. Sustituyendo los valores correspondientes:

$$R_{PU(min)} = \frac{3,3V - 0,4V}{3mA}.$$

Quedando entonces:

$$R_{PU(min)} = 966,7\Omega.$$

B.2. Resistencia máxima

El valor máximo de la resistencia *pull-up* está determinado por el tiempo de subida del bus, el cual depende de la constante de tiempo RC formada por la resistencia y la capacitancia total del bus. Se realizan los cálculos a partir de la siguiente relación aproximada [59]:

$$R_{PU(max)} = \frac{t_r}{0,8473 \cdot C_b},$$

donde:

- t_r es el tiempo máximo de subida permitido,
- C_b es la capacitancia total del bus.

Sustituyendo:

$$R_{PU(max)} = \frac{1000ns}{0,8473 \cdot C_b}$$

B.2.1. Estimación de la capacitancia del bus

La capacitancia total del bus se encuentra compuesta por:

- capacitancia de las pistas de la PCB (*Printed Circuit Board*),
- capacitancia de entrada de los dispositivos conectados,
- conectores y vías.

La capacitancia introducida por las pistas de la PCB puede estimarse mediante [59]:

$$C_L = \frac{0,264(1,41 + \varepsilon_r)}{\ln\left(\frac{5,98 \cdot h}{0,8 \cdot w + t}\right)},$$

donde:

B.2. Resistencia máxima

- C_L es la capacitancia por unidad de longitud [pF/cm],
- w es el ancho de la pista en mm,
- h es la distancia entre la pista y el plano de referencia en mm,
- t es el espesor del cobre en mm,
- ε_r es la permitividad relativa del dieléctrico.

A partir de la longitud total de las pistas del bus, puede estimarse la contribución de la PCB a la capacitancia total. De los parámetros de fabricación se obtiene:

- $w = 0,254\text{mm}$,
- $h = 1,6\text{mm}$,
- $t = 0,034\text{mm}$,
- $\varepsilon_r = 4,5$.

Se halla entonces:

$$C_L = 0,422\text{pF/cm}.$$

Dado el largo de los buses (35cm) se obtiene la capacitancia introducida por las pistas:

$$C_{PCB} = 14,8\text{pF}.$$

Con respecto a los valores de capacitancia de entrada de los integrados es de 3,5pF para el NTP5332 (uno en el bus) y no se encuentra reportado para los STTS22H (tres en el bus), por lo que se los estima de igual valor. El valor de capacitancia introducido por los conectores se estima del orden de 0,1pF $\sim$ 1pF por lo que se lo desprecia en los cálculos. Con esto, el valor aproximado de capacitancia del bus es:

$$C_b \approx 14,8\text{pF} + 4 \cdot 3,5\text{pF} = 28\text{pF}.$$

Con los resultados obtenidos, es posible estimar el valor máximo de resistencia de *Pull-Up* para el bus I²C:

$$R_{PU(max)} = \frac{1000\text{ns}}{0,8473 \cdot 28\text{pF}},$$

entonces

$$R_{PU(max)} = 40,1\text{k}\Omega.$$

B.3. Selección final

Finalmente, el valor seleccionado para las resistencias *pull-up* debe cumplir:

$$966,7\Omega \leq R_{PU} \leq 40,1k\Omega.$$

Considerando márgenes de seguridad, se selecciona como valor para las resistencias de *Pull-Up* para el bus I²C $4,7k\Omega$. Este valor cumple con las restricciones obtenidas para el bus I²C y proporciona un margen adecuado respecto al límite superior calculado a partir del tiempo de subida. Esto resulta conveniente debido a que la capacitancia total del bus fue estimada de manera aproximada, pudiendo existir contribuciones adicionales no consideradas en los cálculos, tales como capacitancias parásitas de conexión o mayores capacitancias de entrada en los sensores STTS22H.

Apéndice C

Fabricación y ensamblaje de las PCB

En este anexo se describen los procesos de fabricación, ensamblaje y testeo utilizados durante las distintas iteraciones de las placas de circuito impreso desarrolladas en el proyecto.

C.1. Fabricación de la PCB

La primera iteración de la PCB fue fabricada mediante el servicio ofrecido por la empresa JLCPCB. Además de la fabricación de la placa, el ensamblaje de los componentes electrónicos fue realizado íntegramente por la empresa a partir de los archivos de diseño y fabricación proporcionados. Este enfoque permitió obtener rápidamente una primera versión funcional del hardware, reduciendo el tiempo requerido para el ensamblaje manual y facilitando las etapas iniciales de validación del diseño.

Para la segunda iteración del diseño se utilizó un convenio con la UCU (Universidad Católica del Uruguay) financiado a través de la ANII (Asociación Nacional de Investigación e Innovación), el cual permitió acceder tanto a servicios de fabricación de PCB como al uso de laboratorios de electrónica para el ensamblaje y testeo de las placas. En este caso, los archivos de fabricación fueron enviados a la UCU y, una vez recibidas las PCB fabricadas, el ensamblaje de los componentes fue realizado manualmente por los autores del proyecto en las instalaciones de los laboratorios de electrónica.

C.2. Proceso de ensamblaje

El ensamblaje de los componentes SMD se realizó utilizando un *stencil* metálico para la aplicación uniforme de pasta de soldar sobre las almohadillas de la PCB. La pasta de soldar utilizada fue XGSP50. Luego de la aplicación de la pasta y la colocación de los componentes, la placa fue sometida a un proceso de soldadura por reflujo mediante un horno de tres etapas.

Apéndice C. Fabricación y ensamblaje de las PCB

C.2.1. Perfil térmico utilizado

El horno de reflujo utilizado corresponde al modelo *T-961*, el cual implementa un sistema de calentamiento mediante seis resistencias distribuidas en dos grupos: tres resistencias en la parte superior y tres en la parte inferior de la cámara. El perfil utilizado establece etapas progresivas de calentamiento definiendo una primer etapa de 150 °C, una etapa intermedia de 180 °C y finalmente la etapa final de 200 °C. Las temperaturas de las resistencias superiores e inferiores se seleccionaron iguales según la etapa. La velocidad configurada para el proceso corresponde al parámetro *SPD:19*. La duración total del proceso es de aproximadamente 321 s. El perfil térmico utilizado fue seleccionado de forma compatible con la pasta de soldar empleada y las características térmicas de la PCB ensamblada.

C.3. Pruebas realizadas durante el ensamblaje

Durante las primeras pruebas de ensamblaje se evaluó la aplicación adicional de flux sobre los componentes luego de la deposición de la pasta de soldar. Sin embargo, esta técnica produjo resultados no deseados durante el proceso de reflujo, observándose componentes desplazados, rotados e incluso invertidos luego de la salida del horno. Este comportamiento se atribuye al exceso de flux presente sobre la superficie de la placa durante la etapa de fusión de la soldadura. Finalmente, el procedimiento que presentó mejores resultados consistió en utilizar únicamente la pasta de soldar, sin agregar flux adicional antes del proceso de reflujo. Bajo estas condiciones se obtuvo un ensamblaje correcto y estable de los componentes electrónicos.

Apéndice D

Manual de usuario

HiveCare es una plataforma de monitoreo de temperatura para colmenas tipo Langstroth. El sistema permite al apicultor conocer en tiempo real el estado térmico de la cámara de cría de sus colmenas sin necesidad de abrirlas, reduciendo la intervención sobre la colonia y facilitando la detección temprana de anomalías.

El sistema se compone de tres elementos.

- Los **Marcos HiveCare** son marcos estándar equipados con sensores de temperatura y tags NFC pasivos que no requieren batería.
- El **Lector HiveCare** es el dispositivo encargado de leer los marcos y transmitir los datos de forma remota mediante la red NB-IoT.
- La **interfaz gráfica**, accesible desde cualquier dispositivo con conexión a Internet, permite visualizar los datos registrados y configurar el sistema de forma remota.

En la Figura D.1 se puede ver un esquema de cómo se integran estos tres elementos en una colmena tipo Langstroth.

Este manual está dirigido al usuario final del sistema y describe los pasos necesarios para instalar el hardware en la colmena, configurar la interfaz gráfica y utilizar las herramientas de visualización disponibles. No se requieren conocimientos técnicos previos para seguir los pasos aquí descritos.

Se recomienda seguir los pasos de este manual antes de instalar los Marcos HiveCare y el Lector HiveCare en la colmena, ya que facilita considerablemente el proceso de configuración.

D.1. Puesta en marcha

D.1.1. Configuración del acceso remoto

Para acceder a la interfaz gráfica es necesario instalar Tailscale, una aplicación que permite conectarse de forma segura a la red del sistema HiveCare. Los pasos son los siguientes:



Figura D.1: Esquema simplificado de la integración del sistema HiveCare en una colmena tipo Langstroth. Se muestran los **Marcos HiveCare** ubicados dentro de la cámara de cría y el **Lector HiveCare** instalado en el exterior de la colmena dentro de una caja estanca. Además se muestra como esta manda los datos hacia la infraestructura remota. Generado con asistencia de Claude (Anthropic).

1. Descargar e instalar Tailscale desde <https://tailscale.com/download>.
2. Abrir Tailscale. Al solicitar una cuenta, seleccionar la opción *Sign in with Microsoft*.
3. Ingresar el usuario `HiveCare.user@hotmail.com` y seleccionar la opción *Usa tu contraseña* (ver Figura D.2). Ingresar la contraseña "h1vecar3".
4. Cuando el sistema solicite seleccionar una red (*Select a tailnet*), seleccionar **HiveCare**.

Una vez completados estos pasos, Tailscale quedará configurado. Para acceder a la interfaz gráfica ingresar al siguiente enlace desde cualquier navegador: <https://hivecare.tailfbb8e7.ts.net:3000>.

Al ingresar por primera vez a la interfaz gráfica se mostrará la pantalla de inicio de sesión que se puede ver en la Figura D.3. Para crear un usuario propio seleccionar *Sign up*, completar el formulario con los datos solicitados y presionar *Submit*. Este usuario se crea una única vez y se utilizará en los accesos posteriores.

D.1.2. Obtención del IMEI

El IMEI es el identificador único del lector y es necesario para registrar la colmena en la interfaz gráfica. Se encuentra impreso en la parte superior del módulo NB-IoT, que es el componente verde con antena visible al abrir la caja estanca del lector (ver Figura D.4). Se recomienda fotografiar el módulo para poder consultar el número con comodidad sin necesidad de volver a abrir la caja.

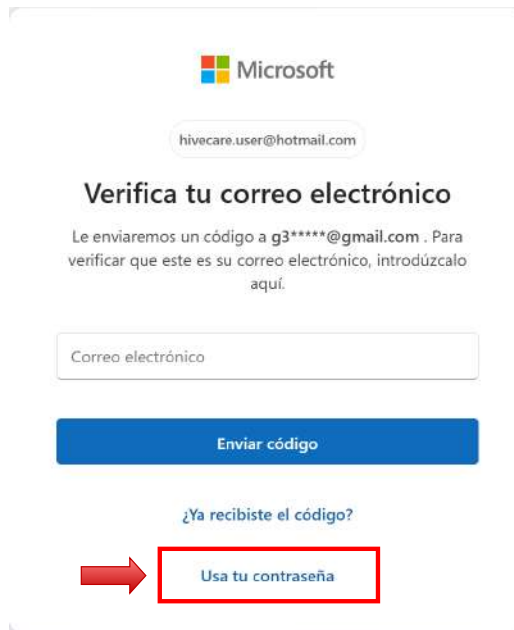


Figura D.2: Pantalla de inicio de sesión en Tailscale. La opción *Usa tu contraseña* se encuentra en la parte inferior de la ventana y permite ingresar con la contraseña proporcionada en lugar de recibir un código por correo.

D.1.3. Registro y configuración de la colmena

Con el IMEI a mano, ingresar a la interfaz gráfica y completar el formulario de la ventana principal con el nombre, descripción e IMEI de la colmena como se ve en la Figura D.5, luego presionar *Agregar*. Si el registro fue exitoso se desplegará el mensaje “Colmena agregada con éxito”; si el IMEI ingresado no es válido se mostrará un mensaje de error. Luego de agregar la colmena presionar el botón *Refresh*, ubicado en la esquina superior derecha junto al selector de ventana temporal, para que la nueva colmena aparezca en la tabla.

Una vez registrada la colmena, acceder a *Configurar* desde la tabla de colmenas. Esta ventana se puede ver en la Figura D.6. En la ventana de configuración se deben definir dos parámetros: el período de muestreo, que determina cada cuánto tiempo el lector realiza una lectura, y la cantidad de Marcos HiveCare instalados en la colmena. Al presionar *Enviar configuración*, el sistema mostrará el mensaje “Esperando OK del lector...” hasta que el lector confirme haber recibido la nueva configuración, momento en el que el mensaje se actualizará a “Configuración recibida por el lector”. Este proceso puede demorar varios minutos ya que el lector intenta reconectarse periódicamente. Si la espera se extiende de forma inusual, se recomienda verificar las conexiones físicas del lector: batería, módulos e integrados.

Cabe recalcar el impacto que tiene la cantidad de marcos configurados en el sistema. Si se configuran menos marcos de los que realmente hay, el lector no leerá la totalidad de los marcos sino únicamente la cantidad configurada. Si por el contrario se configuran más de los que realmente hay, el lector permanecerá durante un período más largo buscando la cantidad de marcos seleccionados, lo

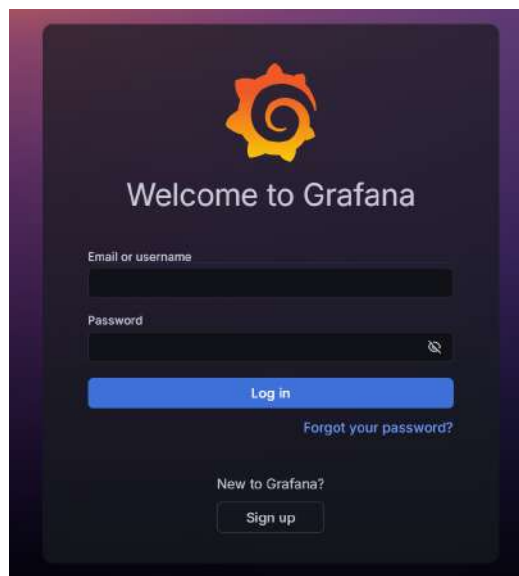


Figura D.3: Pantalla de inicio de sesión de Grafana. Para crear un nuevo usuario seleccionar *Sign up* e ingresar los datos solicitados.

cual afectará directamente la vida útil del sistema.

Por último, en la sección de configuración de marcos se debe asignar el UID de cada Marco HiveCare a su posición dentro de la colmena. Todos los UIDs que fueron leídos por el lector quedarán disponibles en un desplegable dinámico, que también indica cuáles marcos estuvieron activos en el último mensaje recibido, facilitando identificar qué marcos están presentes en ese momento. Para identificar qué UID corresponde a qué marco es recomendable ir acercando de a uno los marcos al lector para identificar así como único activo el marco que esta cercano. Los marcos configurados en esta sección son los que se graficarán posteriormente, por lo que es de vital importancia mantener estos valores correctamente configurados.

Por otro lado, en la ventana de configuración también se puede editar el nombre y la descripción de la colmena, que son los datos que se muestran en la pantalla principal para identificarla fácilmente.

D.2. Instalación del hardware

La instalación del hardware en la colmena requiere tener en cuenta tres aspectos fundamentales:

- En primer lugar, los tags de los Marcos HiveCare deben estar orientados en la misma dirección. Esto se debe a que el sistema no tiene forma de detectar la orientación de cada marco, por lo que para que la visualización tridimensional y la vista cenital reflejen correctamente la posición de cada sensor dentro de la colmena, todos los marcos deben estar colocados en el mismo sentido.

La cantidad de Marcos HiveCare instalados en la colmena condiciona su

D.2. Instalación del hardware

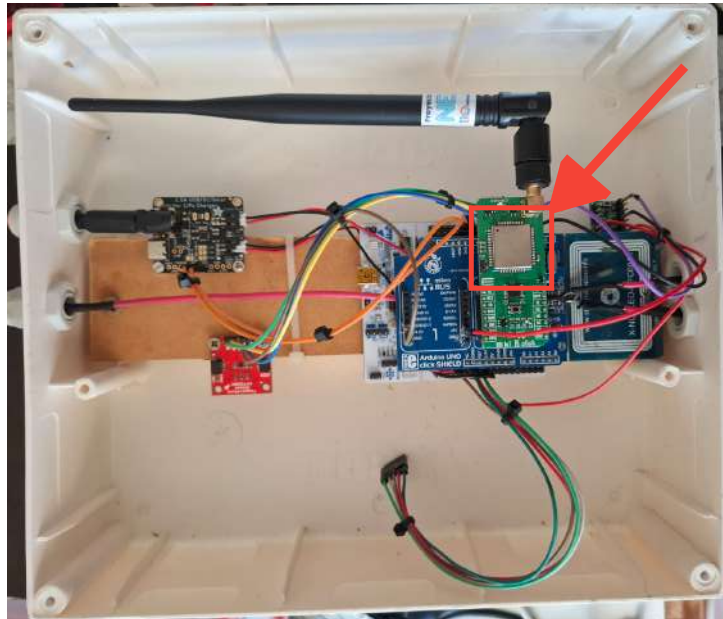


Figura D.4: Interior de la caja estanca del Lector HiveCare con sus componentes identificados. El recuadro y la flecha roja señalan la ubicación del IMEI en la parte superior del módulo NB-IoT.



Figura D.5: Pantalla principal de la interfaz gráfica HiveCare en Grafana. El recuadro rojo indica el formulario para registrar una nueva colmena ingresando nombre, descripción e IMEI.

posicionamiento óptimo dentro de la misma. El lector tiene un alcance de lectura limitado, por lo que la distribución de los marcos debe respetar las posiciones recomendadas según la cantidad utilizada. Para un único marco, el lector puede alcanzar hasta la posición 8. Para dos marcos, las posiciones óptimas son la 3 y la 7. Para tres marcos, las posiciones recomendadas son la 2, la 4 y la 6. Todas estas posiciones respecto al lateral donde se encuentre el Lector HiveCare, es decir la posición 1 se encuentra en el marco más próximo al Lector HiveCare.

- En segundo lugar, el Lector HiveCare debe instalarse en uno de los laterales

Apéndice D. Manual de usuario

Figura D.6: Pantalla de configuración de colmena en Grafana, dividida en tres secciones: ajuste de período de muestreo y cantidad de marcos activos, edición de nombre y descripción, y asignación de UIDs a posiciones físicas dentro de la colmena.

de la colmena, enganchado al cajón y paralelo a los marcos. Esta posición garantiza que el lector quede alineado con los tags de todos los marcos instalados.

- Por último, la colmena debe posicionarse de manera que el panel solar del lector reciba la mayor cantidad de luz solar posible a lo largo del día. Dado que el sistema se alimenta íntegramente del panel solar, una buena exposición solar es fundamental para maximizar la autonomía de la batería y garantizar el funcionamiento continuo del sistema.

D.3. Uso de la interfaz gráfica

En la ventana *Ver Gráficas* se encuentran distintos paneles que presentan información relevante para el apicultor. Una representación tridimensional de la colmena y una vista cenital muestran dinámicamente los marcos configurados, donde cada sensor se visualiza con un código de colores según su temperatura: azul para temperaturas cercanas a los 32°C o menores, verde en torno a los 34°C y rojo para temperaturas cercanas a los 36°C o mayores. Además en esta ventana se muestra el estado de la batería, indicando cuándo el lector está siendo alimentado por el panel solar y cuándo está cargando, y los gráficos de temperatura para cada marco configurado.

En la Figura D.7 se pueden ver los dos paneles generados automáticamente para dos marcos configurados. En la esquina superior derecha se encuentra el selector de ventana temporal, desde el cual se puede definir el intervalo de tiempo a visualizar, ya sea un rango relativo como *Last 2 days* o un rango absoluto personalizado. Al lado del selector de ventana temporal se encuentra la configuración de refresco

D.3. Uso de la interfaz gráfica

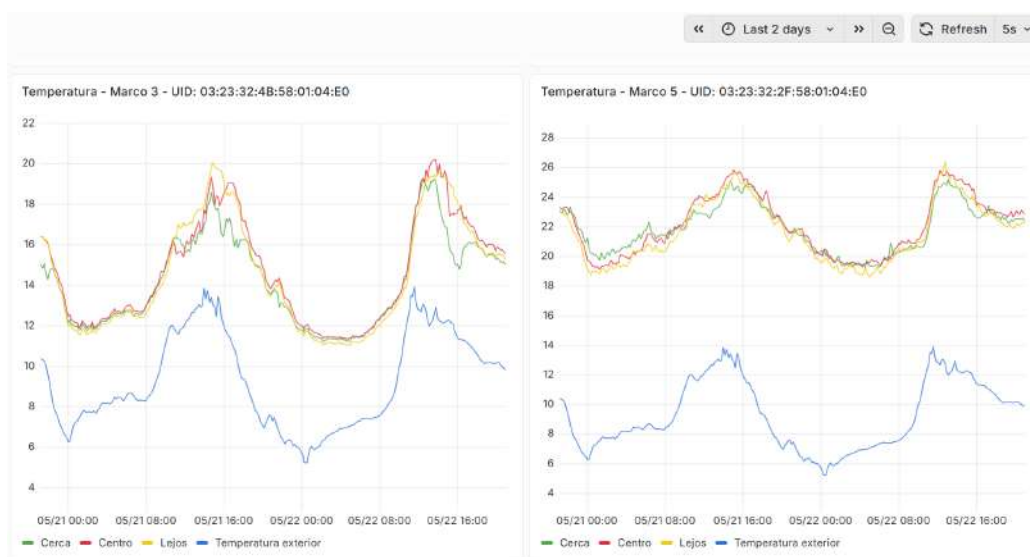


Figura D.7: Paneles de temperatura generados automáticamente para dos marcos configurados. Cada panel muestra las tres series de temperatura dentro del marco (Cerca, Centro y Lejos respecto al tag) junto con la temperatura exterior como referencia.

automático. Para ventanas temporales grandes se recomienda un tiempo de refresco de treinta segundos aproximadamente para evitar demoras en la visualización; para ventanas más chicas el refresco frecuente no afecta al desempeño.

Es posible descargar en formato CSV los datos de cualquier gráfico siguiendo estos pasos:

1. Posicionarse sobre el gráfico a exportar y hacer clic en los tres puntos que aparecen en la esquina superior derecha del panel.
2. Seleccionar *Inspect*.
3. Seleccionar *Data*.
4. En la ventana que aparece se listan todas las medidas graficadas junto con sus timestamps. Para descargar hacer clic en *Download CSV* en la esquina superior derecha.

Por último, es posible ampliar cualquier panel para apreciar mejor los datos. Para esto hacer clic en los tres puntos de la esquina superior derecha del panel y seleccionar *View*, o simplemente hacer clic sobre el panel y presionar la tecla *v*. Para salir de la vista ampliada presionar *Esc*.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Referencias

- [1] M. L. Winston, *The Biology of the Honey Bee*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1987.
- [2] S. G. Potts, J. C. Biesmeijer, C. Kremen, P. Neumann, O. Schweiger, and W. E. Kunin, “Global pollinator declines: trends, impacts and drivers,” *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 25, no. 6, pp. 345–353, 2010.
- [3] N. Gallai, J.-M. Salles, J. Settele, and B. E. Vaissière, “Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline,” *Ecological Economics*, vol. 68, no. 3, pp. 810–821, 2009.
- [4] B. Heinrich, “Mechanisms of body-temperature regulation in honeybees, *apis mellifera*: I. regulation of head temperature,” *Journal of Experimental Biology*, vol. 85, no. 1, pp. 61–72, 1980.
- [5] FAO, “Beekeeping and sustainable livelihoods,” 2021.
- [6] —, “Pollinators vital to our food supply,” 2018.
- [7] K. Delaplane, *The Hive and the Honey Bee*. Dadant & Sons, 2015.
- [8] M. Goodwin, *Practical Beekeeping in New Zealand*. Exisle Publishing, 2012.
- [9] A. Klein *et al.*, “Importance of pollinators in changing landscapes for world crops,” *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 274, pp. 303–313, 2007.
- [10] OPYPA, “Problemas y oportunidades de la cadena apícola uruguaya,” 2021.
- [11] Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, “Cadena apícola: Producción y exportación de miel en uruguay,” 2021, consultado: 16 mayo 2026. [Online]. Available: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/>
- [12] P. Cracco, M. C. Cabrera, and G. Gallieta, “Caracterización fisicoquímica de propóleos georeferenciados de 14 localidades de uruguay,” *Agrociencia Uruguay*, vol. 27, p. e1181, 2023.
- [13] P. Cracco, M. C. Cabrera, G. Gallieta, and A. Saadoun, “Polifenoles y minerales en propóleos de diferentes agroregiones de uruguay,” *Agrociencia Uruguay*, vol. 28, p. e1240, 2024.

Referencias

- [14] MGAP, “Trazabilidad y calidad en la cadena apícola uruguaya,” 2022.
- [15] K. Antúnez *et al.*, “Honey bee colony losses in uruguay,” *Journal of Apicultural Research*, 2016.
- [16] F. Requier *et al.*, “The persistence of honey bees and beekeeping worldwide,” *Nature Ecology & Evolution*, 2018.
- [17] A. Zacepins *et al.*, “Precision beekeeping technologies for colony monitoring and management,” *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023.
- [18] J. Besora Magem, “Informe técnico para la construcción de una colmena y portanúcleo tipo langstroth,” 2015, consultado: 16 mayo 2026. [Online]. Available: <https://esf-cat.org/wp-content/uploads/2017/04/Informe-t%C3%A9cnico-colmena-langstroth.pdf>
- [19] J. C. Jones and B. P. Oldroyd, “Honey bee nest thermoregulation: Diversity promotes stability,” *Science*, vol. 305, no. 5682, pp. 402–404, 2004.
- [20] P. Cracco, “Evaluación del control de varroa sp. con diferentes formas de aplicación de ácido fórmico,” Jornada de Apicultura, INIA La Estanzuela, 2009, serie Actividades de Difusión No. 568.
- [21] J. Harriet, J. P. Campá, M. Grajales, C. Lhéritier, A. Gómez Pajuelo, Y. Mendoza-Spina, and L. Carrasco-Letelier, “Agricultural pesticides and veterinary substances in uruguayan beeswax,” *Chemosphere*, vol. 177, pp. 77–83, 2017.
- [22] E. Santos, C. Invernizzi, D. Sánchez, P. Cracco, V. Cesio, H. Heinzen, L. Archondo, I. Silva, and S. Niell, “Evaluación del cuerpo de la abeja como vector de ingreso de glifosato a la miel, bajo distintos escenarios de exposición,” *Revista INIA*, no. 84, pp. 58–61, 2026, consultado: 16 mayo 2026. [Online]. Available: <https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2026-03/Revista-INIA-84-Marzo2026-14.pdf>
- [23] F. Lima, J. Navarro, and M. Porto, “BeeSmart: monitoreo remoto de colmenas. Diagnóstico y acciones no presenciales.” Proyecto de fin de carrera de Ingeniería Eléctrica, Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería., 2021. [Online]. Available: <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/26381>
- [24] A. Zacepins, E. Stalidzans, and J. Meitalovs, “Application of information technologies in precision apiculture,” in *Proceedings of the 13th International Conference on Precision Agriculture (ICPA 2012)*, Indianapolis, USA, 2012.
- [25] A. Zacepins, A. Kviesis, E. Stalidzans, M. Liepniece, and J. Meitalovs, “Remote detection of the swarming of honey bee colonies by single-point temperature monitoring,” *Biosystems Engineering*, vol. 148, pp. 76–80, 2016. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511016300964>

- [26] W. G. Meikle, M. Weiss, P. W. Maes, W. Fitz, L. A. Snyder, T. Sheehan, B. M. Mott, and K. E. Anderson, “Internal hive temperature as a means of monitoring honey bee colony health in a migratory beekeeping operation before and during winter,” *Apidologie*, vol. 48, no. 5, pp. 666–680, 2017, open access. [Online]. Available: <https://hal.science/hal-02973439v1>
- [27] M. Rodríguez Echeverry and L. Sánchez Giménez, “Evaluación del uso de sensores de temperatura en colmenas de apis mellifera l.” 2020. [Online]. Available: <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/31930>
- [28] BroodMinder, “Broodminder,” 2026, accedido: 25-may-2026. [Online]. Available: <https://broodminder.com>
- [29] HiveWatch, “Hivewatch,” 2026, accedido: 25-may-2026. [Online]. Available: <https://hivewatch.es/>
- [30] Arnia, “Arnia remote hive monitoring,” 2026, accedido: 25-may-2026. [Online]. Available: <https://www.arniaperfetta.it/en/>
- [31] Label Abeille, “Label abeille - capteurs connectés pour ruches,” 2026, accedido: 26-may-2026. [Online]. Available: <https://label-abeille.org/index.php/produit>
- [32] L. L. Langstroth, “Bee-hive,” US Patent US9300A, Oct. 5, 1852. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US9300A/en>
- [33] NFC Forum, “NFC Forum,” <https://nfc-forum.org/>, 2025, sitio oficial del foro industrial sin ánimo de lucro que promueve el uso y la interoperabilidad de la tecnología NFC.
- [34] K. Finkenzeller, *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication*, 3rd ed. Chichester, England; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.
- [35] N. Hossein Motlagh, “Near field communication (nfc) - a technical overview,” Ph.D. dissertation, ResearchGate, 05 2012.
- [36] ISO/IEC JTC 1/SC 17, “Cards and security devices for personal identification – contactless vicinity objects – part 1: Physical characteristics,” ISO/IEC, Tech. Rep. ISO/IEC 15693-1:2018, July 2018, confirmed as current version in October 2024.
- [37] International Organization for Standardization, “ISO/IEC 14443-2:2020 Identification cards – Contactless integrated circuit cards – Proximity cards – Part 2: Radio frequency power and signal interface,” <https://www.iso.org/standard/86795.html>, 2020, accessed: 2025-06-19.
- [38] SpringCard, “All about the anti-collision mechanisms !” <https://www.springcard.com/en/blog/news/all-about-the-anti-collision-mechanisms>, November 2018, accessed in August 2025.

Referencias

- [39] ISO/IEC JTC 1/SC 6, “Telecommunications and information exchange between systems — near field communication interface and protocol 1 (nfcip-1),” ISO/IEC, Tech. Rep. ISO/IEC 18092:2023, December 2023, edición vigente — reemplaza ISO/IEC 18092:2013.
- [40] STMicroelectronics, “ST25 NFC Guide,” https://www.st.com/resource/en/technical_note/tn1216-st25-nfc-guide-stmicroelectronics.pdf, 2021, accessed on: August 5, 2025. See page 9 for details on the ST25R3911B features.
- [41] W. Yue, Y. Guo, J. Lee, E. Ganbold, J.-K. Wu, Y. Li, C. Wang, H. S. Kim, Y.-K. Shin, J.-G. Liang, E.-S. Kim, and N.-Y. Kim, “Advancements in passive wireless sensing systems in monitoring harsh environment and healthcare applications,” *Nano-Micro Letters*, vol. 17, no. 1, p. 106, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01599-8>
- [42] Y. Zhang, “Differential antennas: Fundamentals and applications,” *Electromagnetic Science*, vol. 1, no. 1, pp. 1–17, 2023.
- [43] STMicroelectronics, *STTS22H Datasheet: Low-voltage, ultralow-power, 0.5°C accuracy I2C/SMBus 3.0 temperature sensor*, STMicroelectronics, Aug. 2022, dS12606 Rev 7, 19 August 2022. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stts22h.pdf>
- [44] NXP Semiconductors, “NFC Antenna Tool,” <https://community.nxp.com/t5/NFC/bd-p/nfc>, 2024, accedido: febrero 2025.
- [45] —, “CLRC663 PLL, Q-factor and bandwidth calculations,” NXP Semiconductors, Tech. Rep. AN12380, March 2020, application Note. [Online]. Available: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN12380.pdf>
- [46] —, *AN11019: CLRC663, MFRC630, MFRC631, SLRC610 Antenna Design Guide*, NXP Semiconductors, Jun. 2018, application Note. [Online]. Available: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN11019.pdf>
- [47] —, *NFC Antenna Design Tool User Manual*, rev. 2 ed., NXP Semiconductors, Feb. 2024, accessed: 2026-07-24. [Online]. Available: <https://www.nxp.com/docs/en/user-manual/UM11232.pdf>
- [48] P. Pérez-Nicoli, F. Silveira, and M. Ghovanloo, *Inductive Links for Wireless Power Transfer: Fundamental Concepts for Designing High-efficiency Wireless Power Transfer Links*. Springer International Publishing. [Online]. Available: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-65477-1>
- [49] MikroElektronika, “NTAG 5 Link Click Schematic,” https://download.mikroe.com/documents/add-on-boards/click/NTAG_5_link_Click/NTAG_5_Link_click_v101_Schematic.PDF, 2022, accessed: 2026-05-08.
- [50] NXP Semiconductors, *UM10204 I2C-bus Specification and User Manual*, 7th ed., NXP Semiconductors, Oct. 2021, rev. 7.0 — 1 October 2021. [Online]. Available: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>

- [51] —, *NTP53x2 Product Data Sheet*, NXP Semiconductors, Feb. 2023, rev. 3.3 — 20 February 2023. [Online]. Available: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/NTP53x2.pdf>
- [52] STMicroelectronics, “Mb1136 nucleo-l476rg schematic,” https://www.st.com/resource/en/schematic_pack/mb1136-default-c03_schematic.pdf, 2023, accessed: 2026-05-10.
- [53] European Commission, Joint Research Centre, “PVGIS Photovoltaic Geographical Information System,” <https://pvgis.com/es>, 2026, accedido: 24 mayo 2026.
- [54] S. Knoll, W. Pinna, A. Varcasia, A. Scala, and M. G. Cappai, “The honey bee (*apis mellifera* l., 1758) and the seasonal adaptation of productions. highlights on summer to winter transition and back to summer metabolic activity. a review,” *Livestock Science*, vol. 235, p. 104011, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1871141319317603>
- [55] L. Ramirez, F. Luna, C. A. Mucci, and L. Lamattina, “Fast weight recovery, metabolic rate adjustment and gene-expression regulation define responses of cold-stressed honey bee brood,” *Journal of Insect Physiology*, vol. 128, p. 104178, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002219102030322X>
- [56] Raspberry Pi Foundation, “Raspberry Pi OS Lite (64-bit), Bookworm release,” https://downloads.raspberrypi.com/raspios_lite_arm64/images/, 2025, imagen utilizada: 2025-02-12-raspios-bookworm-arm64-lite.img.xz. Accedido: 18 mayo 2026.
- [57] Quectel Wireless Solutions Co., Ltd., *BC66 & BC66-NA MQTT Application Note*, Quectel Wireless Solutions Co., Ltd., Mar. 2020, nB-IoT Module Series.
- [58] —, *BC66 & BC66-NA AT Commands Manual*, Quectel Wireless Solutions Co., Ltd., Mar. 2020, nB-IoT Module Series.
- [59] Nxpperia B.V., “An90044: A study of i2c with examples,” Nxpperia B.V., Application Note AN90044, Jun. 2023, accessed: 2026-05-17. [Online]. Available: <https://assets.nxp.com/documents/application-note/AN90044.pdf>

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Acrónimos

Access Point Name APN.

Acknowledgement ACK.

American Wire Gauge AWG.

Application Programming Interface API.

Automatic Gain Control AGC.

Coordinated Universal Time UTC.

Electromagnetic Interference EMI.

Flame Retardant-4 FR-4.

Full Duplex FDX.

General-Purpose Input/Output GPIO.

Graphical User Interface GUI.

Half Duplex HDX.

High Frequency HF.

Inter-Integrated Circuit I²C.

International Mobile Equipment Identity IMEI.

Internet of Things IoT.

Low Frequency LF.

Low Speed Internal LSI.

Message Queuing Telemetry Transport MQTT.

Narrowband Internet of Things NB-IoT.

Acrónimos

Near Field Communication NFC.

Passive Integrated Circuit Card PICC.

Printed Circuit Board PCB.

Quality of Service QoS.

radio frequency RF.

Radio Frequency Identification RFID.

Received Signal Strength Indicator RSSI.

Run-Length Encoding RLE.

Sequential SEQ.

Serial Clock Line SCL.

Serial Data Line SDA.

Serial Peripheral Interface SPI.

Single Wire Interface SWI.

Static Random-Access Memory SRAM.

Surface-Mount Device SMD.

Ultra High Frequency UHF.

Unique Identifier UID.

Universal Asynchronous Receiver-Transmitter UART.

Vector Network Analyzer VNA.

Definiciones

apicultura de precisión Enfoque moderno de apicultura que utiliza tecnologías digitales, IoT y análisis de datos para monitoreo de colmenas. Permite toma de decisiones basada en datos (cuando hacer tratamientos, detectar enfermedades, optimizar cosecha).

Back-Scattering Técnica de comunicación en campos lejanos donde el tag refleja parcialmente las ondas electromagnéticas del lector modulando su reflectividad.

BC66 (Módulo NB-IoT) Módulo LTE NB-IoT de Quectel integrado en Lector HiveCare.

BQ24074 Controlador de carga solar integrado de Texas Instruments en Lector HiveCare.

caja estanca Recipiente de protección IP65 ubicado en el exterior de la colmena que contiene Lector HiveCare. Garantiza aislamiento contra lluvia, humedad, polvo y agentes externos.

colmena En este documento se hace referencia a colmenas de tipo Langstroth, estructura modular estándar compuesta principalmente por cajones de madera apilados, cada uno con varios marcos de madera diseñados para favorecer el desarrollo del panal.

Colmena HiveCare Una colmena del sistema HiveCare. Cada colmena incluye: una Cámara de Cría con al menos un marco HiveCare para adquisición de temperatura, un lector HiveCare ubicado en el exterior para recolección y transmisión de datos, y una Caja Estanca que protege el Lector y su fuente de alimentación.

cría Término general para huevos, larvas y pupas en desarrollo dentro del nido de cría.

cámara de cría Cajón inferior de la colmena Langstroth donde es ubicada la reina para depositar huevos.

energy harvesting Técnica de recolección de energía del campo electromagnético RF para alimentar circuitos pasivos sin batería.

Definiciones

enjambrazón Proceso natural y cíclico mediante el cual una colonia de abejas se divide en dos colonias independientes. Genera nuevo enjambre que abandona la colmena madre con reina fecundada.

far-field Región electromagnética lejana a la antena (distancia $\gg \lambda/2\pi$) donde dominan ondas radiadas sobre campo reactivo.

Grafana Plataforma de visualización e interacción de datos en tiempo real. Genera dashboards interactivos, gráficos de tendencias, alertas en tiempo real. Interfaz web accesible desde navegadores locales/remotos.

HiveService Servicio software desarrollado en Python que actúa como intermediario central entre Sistema HiveCare (dispositivos IoT en campo), base de datos MariaDB, broker MQTT Mosquitto y GUI Grafana. Ejecuta en Raspberry Pi OS Lite. Tareas: procesamiento de datos, almacenamiento, sincronización.

Lector HiveCare Dispositivo central ubicado en exterior de la colmena encargado de leer los datos de temperatura de los Marcos HiveCare que se encuentran en el interior de la colmena y de la transmisión de esos datos. Integra: microcontrolador, lector NFC, módulo NB-IoT, panel solar, batería, controlador de carga y antena NFC.

lector RFID Dispositivo de lectura que emite campo electromagnético alterno y decodifica señales de los tags. Se compone de una antena, uno o más circuitos integrados de control y procesamiento y una fuente de alimentación..

load modulation Técnica de comunicación en campos cercanos donde el tag modula su impedancia de antena para reflejar información al lector. Cuando el tag cambia su impedancia, el campo magnético del lector se ve afectado, permitiendo al lector detectar cambios de voltaje.

Marco HiveCare Marco de colmena tipo Langstroth modificado para recolección automática de temperatura en la cámara de cría. Contiene: PCB con sensores de temperatura, tag NFC pasivo y antena..

MariaDB Sistema gestor de base de datos relacional de código abierto.

Mosquitto Broker MQTT de código abierto. Versión pública test.mosquitto.org.

near-field Región electromagnética cercana a la antena (distancia $\ll \lambda/2\pi$ a la frecuencia operativa) donde domina el campo magnético reactivo sobre el radiado.

nido de cría Sección específica dentro de la cámara de cría donde se encuentran huevos, larvas y pupas en crecimiento.

NTP5332 Tag NFC pasivo de NXP integrado en Marco HiveCare.

panal Conjunto de celdillas de cera de forma hexagonal, que construyen las abejas en la colmena para depositar miel.

Sistema HiveCare Plataforma completa de monitoreo IoT que integra un conjunto de colmenas HiveCare. Permite monitoreo no invasivo de una red de colmenas con adquisición de temperatura, lectura remota vía NFC y transmisión de datos a servidor.

ST25R3916B Lector NFC/RFID de STMicroelectronics utilizado en Lector HiveCare.

STM32L476RG Microcontrolador de bajo consumo de STMicroelectronics utilizado en el Lector HiveCare.

STTS22H Sensor de temperatura digital de precisión de STMicroelectronics utilizado en el Marco HiveCare.

tag RFID Dispositivo utilizado para la identificación. Se compone de un chip IC integrado y una antena. Puede presentar batería, en cuyo caso se lo denomina tag RFID activo o no presentarla, siendo así un tag RFID pasivo.

watchdog timer Temporizador de seguridad integrado en el microcontrolador que reinicia automáticamente el dispositivo si el software no refresca el contador dentro de período especificado. En HiveCare: período de 32.8 segundos. Evita bloqueos indefinidos en caso de fallo de firmware.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Índice de tablas

1.1. Comparación entre soluciones de monitoreo apícola.	8
3.1. Comparación de características de tags RFID según banda de frecuencia.	30
3.2. Comparación de tags RFID/NFC comerciales considerados	38
3.3. Comparación de lectores RFID/NFC comerciales considerados. . .	38
4.1. Configuraciones de hardware evaluadas en la prueba de concepto. La x en <i>Lector</i> puede tomar el valor de 1 o 6.	43
4.2. Distancias máximas de comunicación entre lector y tag para las distintas configuraciones evaluadas	51
4.3. Resumen comparativo de las configuraciones evaluadas para el Marco HiveCare. Las configuraciones se encuentran definidas en la Tabla 4.1.	52
6.1. Conexiones entre módulos.	75
6.2. Resumen de modificaciones realizadas en los módulos	78
7.1. Campos del mensaje JSON enviado a través de MQTT	88
8.1. Estructura de la tabla <i>mediciones</i> , que almacena las lecturas individuales de temperatura y RSSI de cada Marco HiveCare por mensaje recibido, incluyendo el identificador de la colmena a la que pertenece cada medición. La columna <i>Nulo</i> indica si el campo admite valores nulos en la base de datos.	104
8.2. Estructura de la tabla <i>mediciones_generales</i> , que registra los datos globales de cada mensaje recibido: temperatura exterior, identificador de mensaje y contador de reinicios del <i>watchdog</i>	104
8.3. Estructura de la tabla <i>configuraciones</i> , que almacena los parámetros configurables por colmena y los indicadores de estado utilizados por HiveService para coordinar el flujo de configuración remota vía MQTT.	105
8.4. Estructura de la tabla <i>colmenas</i> , que registra las colmenas asociadas a cada usuario, permitiendo que distintos usuarios asignen nombre y descripción independientes a una misma colmena.	105

Índice de tablas

8.5. Estructura de la tabla <i>colmena_uids_detectadas</i> , que mantiene el historial de marcos detectados por cada colmena, registrando la fecha de primera detección y si el marco estuvo activo en el último mensaje recibido.	106
8.6. Estructura de la tabla <i>colmena_marcos</i> , que define el orden físico de los marcos dentro de cada colmena asociando cada posición numérica al UID del marco correspondiente.	106
8.7. Estructura de la tabla <i>power_status</i> , que registra el estado de las señales <i>CHG</i> y <i>P_GOOD</i> del módulo BQ24074 a lo largo del tiempo, permitiendo estimar el nivel de carga de la batería y la disponibilidad de energía solar. Ambas señales son activas en nivel bajo.	107

Índice de figuras

1.1.	Esquema simplificado de una colmena tipo Langstroth. Generado con asistencia de ChatGPT (OpenAI).	3
1.2.	Esquema simplificado de la integración del Sistema HiveCare en una colmena tipo Langstroth, conformando así una Colmena HiveCare. Se muestran los Marcos HiveCare ubicados dentro de la cámara de cría y el Lector HiveCare instalado en el exterior de la colmena dentro de una caja estanca. Además se muestra como esta manda los datos hacia la infraestructura remota. Generado con asistencia de Claude (Anthropic).	10
2.1.	Esquema de colmena tipo Langstroth, donde se observan sus diferentes componentes. Adaptada de [18].	13
2.2.	Diagrama de bloques del Sistema HiveCare. Se observa en color muestra la cámara de cría la cual contiene los diversos Marcos HiveCare. Éstos se comunicarán con el Lector HiveCare mediante NFC, poniéndole a disposición los datos sensados. Una vez recolectados los datos el Lector HiveCare los transmitirá a la nube mediante NB-IoT, haciéndolos accesibles por el usuario mediante la GUI. El usuario a través de la GUI podrá establecer parámetros de configuración del sistema como el período de sensado. Esta información es transmitida hacia el Lector HiveCare.	16
2.3.	Diagrama de red del Sistema HiveCare. Se ilustra la arquitectura multicolmena del sistema, donde cada Lector HiveCare recolecta los datos de sus Marcos HiveCare mediante NFC y los transmite de forma independiente hacia la infraestructura remota.	17
2.4.	Flujo de operación del Sistema HiveCare. Se muestran las etapas de adquisición, recolección, transmisión y visualización de datos, junto con los componentes involucrados en cada una de ellas: Marco HiveCare, Lector HiveCare, nube e interfaz gráfica de usuario.	17
2.5.	Diagrama conceptual del Marco HiveCare. Se muestran los sensores de temperatura, el módulo de control y comunicación (tag NFC), y la interfaz de acoplamiento con el Lector HiveCare, utilizada tanto para la transferencia de datos como de energía.	19
2.6.	Esquema del Marco HiveCare. Generado con asistencia de ChatGPT (OpenAI).	20

Índice de figuras

2.7. Diagrama de bloques del Lector HiveCare. Se muestran los subsistemas principales, incluyendo la fuente de energía, el sistema de control y los módulos de comunicación utilizados para la interacción con los Marcos HiveCare y la transmisión de datos hacia la infraestructura remota.	21
3.1. Diagrama de RFID. Se observan los componentes principales de un sistema RFID (lector y tag), con su respectiva estructura interna. Es posible visualizar también el flujo de comunicación, siendo este bidireccional, así como que la energía es entregada por el lector hacia el tag.	26
3.2. Diagrama de FDX, HDX y SEQ. Se puede observar los tres tipos de comunicación temporalmente. Los datos de bajada corresponden a los transmitidos desde el lector al tag y los datos de subida a los transmitidos en la dirección opuesta. La energía corresponde a la entregada a través del campo electromagnético por el lector. Para la comunicación tanto <i>Full</i> como <i>Half Duplex</i> la energía que el lector provee al tag se mantiene encendida durante toda la comunicación. La diferencia entre estos es que, en el primero, los datos de subida y bajada pueden suceder a la vez, no así en el segundo. En el caso secuencial, se observa que el campo es encendido únicamente mientras el lector transmite datos, respondiendo el tag mientras el campo esta apagado. Reproducido de [34].	27
3.3. Diagrama de bloques de la comunicación bidireccional. Se puede observar que el lector emite una onda hacia el tag que será luego reflejada por el mismo y receptionada por el lector.	29
3.4. Señal de ASK evaluada en el dominio temporal, con una portadora de 20 Hz. El gráfico azul muestra la onda sinusoidal y el rojo la decodificación binaria que se obtiene de la onda. Se puede observar que a los 0,25 s la amplitud de la onda azul disminuye y es interpretada como un cero lógico (reflejado en el gráfico rojo). Al momento que la onda aumenta la amplitud nuevamente (a los 0,75 s), la señal binaria refleja un uno lógico.	32
3.5. Señal de FSK evaluada en el dominio temporal, con portadoras de 20 Hz y de 60 Hz. El gráfico azul muestra la onda sinusoidal y el rojo la decodificación binaria que se obtiene de la onda. Se puede observar que a los 0,25 s la onda sinusoidal aumenta su frecuencia (y se produce un desfase producto de este cambio de frecuencia), lo que pasa a interpretarse como un cero lógico por la señal binaria hasta el momento que se vuelve a la frecuencia original, interpretándose como un uno lógico.	34

3.6.	Señal de PSK evaluada en el dominio temporal, con una portadora de 5 Hz. El gráfico azul muestra la onda sinusoidal y el rojo la decodificación binaria que se obtiene de la onda. Se puede observar, entre los 0,25 y los 0,5 s cómo la fase de la señal azul cambia 180°, lo que se refleja en un cero lógico en la señal binaria. Este nivel se mantiene hasta que se vuelve a producir un desfase de la señal en el tiempo 1 s.	35
3.7.	Diagrama de bloques de la comunicación con un IR. Se puede observar aquí, el flujo tanto de los datos como de la energía. Siendo la energía emitida por el lector y extendida espacialmente por el repetidor.	35
3.8.	Ilustración de una antena diferencial (izquierda) y una antena Single-ended (derecha). Reproducida de [42]	37
4.1.	Esquema de las distintas configuraciones evaluadas durante la etapa de pruebas preliminares. Cada alternativa combina un lector NFC, un tag y uno o más sensores de temperatura.	42
4.2.	Curvas corriente-voltaje obtenidas para los tags ST25DV y NTP5332 a distintas distancias entre lector y tag.	45
4.3.	Conexiones y perfil de consumo obtenidos para la configuración A.	47
4.4.	Conexiones y perfil de consumo obtenidos para la configuración B.	48
4.5.	Conexiones y perfil de consumo obtenidos para la configuración C.	50
5.1.	Diagrama del montaje experimental utilizado para realizar las medidas de distancia. Es importante mencionar que las antenas se disponen en planos paralelos.	54
5.2.	Voltaje inducido en ambas antenas de referencia en función de la distancia, comparando el desempeño del lector ST25R3911B-DISCO (verde) y el X-NUCLEO-NFC08A1 (azul).	55
5.3.	Circuito equivalente del tag. R_S representa las resistencias intencionales de $2,2\Omega$ incorporadas en cada terminal para el control del factor de calidad. El resto de la nomenclatura sigue la convención de [45].	56
5.4.	Módulo y fase de la impedancia de la antena del tag (dos espiras con capacitor de resonancia), medidos con VNA. El máximo de $ Z $ y el cruce por cero de la fase coinciden en 13,56 MHz, confirmando la frecuencia de resonancia del circuito.	59
5.5.	Comparación del factor de acoplamiento k en función de la distancia para distintas configuraciones de antenas.	60
5.6.	Módulo y fase de la impedancia de la antena del lector (una espira, sin capacitor), medidos con VNA. A 13,56 MHz la impedancia es predominantemente inductiva ($Z = 4,0 + j110,2\Omega$), mientras que la autorresonancia se ubica en torno a los 50,45 MHz, donde el cruce por cero de la fase confirma que la impedancia es puramente real.	62

Índice de figuras

6.1. Conjunto de bloques que conforman el circuito diseñado para el Marco HiveCare.	64
6.2. Circuito de adaptación de la antena diseñado para ajustar la frecuencia de resonancia a 13,56 MHz dadas las características de la antena diseñada (alambre acerado AWG (<i>American Wire Gauge</i>) 28 –aprox. 0,3 mm de diámetro–, dos vueltas y con un tamaño de 45 cm × 23 cm) y disminuir el factor de calidad con el fin de reducir la interferencia intersimbólica. <i>LA</i> y <i>LB</i> corresponden a las señales de entrada de antena del tag NTP5332.	64
6.3. Circuito correspondiente al bloque <i>NFC Tag IC</i> . En él se observa el integrado (IC4) con sus señales y pasivos asociados. Sobre el lado derecho se puede apreciar el capacitor de desacople (C5).	65
6.4. Circuito correspondiente a la interfaz I ² C. Se puede observar en él las resistencias de <i>pull-up</i> correspondientes al bus de datos (<i>SDA</i>) y al bus de reloj (<i>SCL</i>).	66
6.5. Circuito correspondiente al bloque Sensores de temperatura. En él se muestran los tres sensores de temperatura STTS22H. Se observan resistencias de 0 Ω en las líneas <i>SDA</i> y <i>SCL</i> , utilizadas como puentes de soldadura auxiliares en el <i>layout</i> . En el lado derecho de la figura se observan los capacitores de desacople y la resistencia utilizada para establecer la dirección estática del integrado <i>IC1</i> . Los demás integrados establecen su dirección estática directamente con GND o EH. Asociado al pin de <i>ALERT/INT</i> de cada integrado se encuentra una resistencia de <i>pull-up</i>	67
6.6. Ubicación de los sensores de temperatura en el marco. Se observa que los sensores (S1, S2 y S3) se encuentran centrados verticalmente y equiespaciados horizontalmente.	68
6.7. Marcos de colmena de distinto material.	69
6.8. Contorno de la PCB. Se puede observar, en el lado izquierdo de la figura, el área rectangular diseñada para alojar los bloques Adaptación de antena, Tag NFC e Interfaz I ² C. Se aprecian también las tres orejuelas diseñadas para el montaje mecánico, ubicadas en los puntos de alojamiento de los sensores de temperatura.	70
6.9. Porciones de la PCB del sistema: sección empotrada en el reborde del marco (a) y sección de sensores de temperatura (b).	70
6.10. Fotorgrafías del Marco HiveCare: vistas anterior y posterior.	71
6.11. Componentes principales del lector. Se puede observar el microcontrolador en el centro, comunicándose con los módulos de temperatura (STTS22H), NFC (NUCLEO-NFC08A1) y NB-IoT (NB IoT 2 Click). A su vez se muestra el microcontrolador controlando el <i>Load Switch</i> encargado de la energización de los módulos previamente mencionados. Se observan tres colores distintos, anaranjado agrupando los componentes generales del sistema, en verde los encargados de adquisición de datos y en turquesa el módulo relativo a la telemetría.	73

6.12. Diagrama de conexiones entre los módulos que conforman el Lector HiveCare. Los tres módulos sobre la placa NUCLEO-L476RG se conectan a ella mediante el <i>ARDUINO connector</i> . 3v3 y 5V en dichas placas se encuentran aislados de los pines correspondientes en la placa NUCLEO-L476RG.	74
6.13. Diagrama de energización del lector. El sistema se alimenta mediante un panel solar, un cargador LiPo y una batería, que proveen energía al microcontrolador y a los distintos módulos del sistema. La distribución de 3,3 V se realiza a través de un Load Switch, mientras que un convertidor Step-Up genera 5 V para el módulo NFC, necesarios para incrementar la potencia de transmisión del lector.	76
6.14. Circuito de energización del ST-LINK. Extraído del esquemático de la placa STM32 NUCLEO-L476RG [52].	77
6.15. Medidas de consumo del sistema con un período establecido en un minuto. Se observa el período de operación del sistema, con un consumo alto, del orden de los 150 mA correspondiente a las lecturas NFC, seguido de un consumo menor, de aproximadamente 25 mA de media, correspondiente a la transmisión de datos mediante NB-IoT, y finalmente un período de consumo casi nulo correspondiente al microcontrolador en modo de bajo consumo y los módulos desenergizados.	79
6.16. Instalación del lector en una colmena, incluyendo la caja estanca con los módulos electrónicos, el panel solar y la estructura de fijación utilizada para el montaje del dispositivo.	80
7.1. Diagrama de flujo del firmware. En él se muestran las distintas fases por las que transcurre el sistema. Comienza por la etapa de inicialización, pasando luego por la adquisición de datos y el envío de los mismos mediante MQTT, finalizando el ciclo con una etapa de bajo consumo. Se muestran también aspectos relativos al encolado de mensajes, actualización de parámetros y sensado de energía.	84
7.2. Diagrama de secuencia de la comunicación entre el lector, un tag y un sensor de temperatura. Lo enmarcado como medida de temperatura se realizará una vez por cada sensor del Marco HiveCare.	87
7.3. Diagrama de arquitectura del firmware. Se muestran las cuatro capas (<i>Application</i> , <i>Platform</i> , <i>Driver</i> y <i>Core</i> o <i>STM32 HAL</i>). Se observan en la capa de aplicación tres componentes principales (<i>Hive</i> , <i>Cloud</i> y <i>Acquisition</i>), cada uno representado por un color distinto. Dentro de los tres se destaca como central el componente <i>Hive</i> , ya que concentra la lógica de aplicación y hace uso de los otros dos componentes principales. Los colores se conservan en el diagrama, permitiendo identificar fácilmente la estructura vertical de cada componente principal. Se observan ciertos módulos como <i>Temperature</i> en <i>Platform Layer</i> y <i>GPIO</i> en <i>STM32 HAL</i> que presentan un gradiente de dos colores, indicando que son consumidos por las dos verticales.	91

Índice de figuras

7.4.	El diagrama de secuencia expone cómo interactúan los componentes principales de la capa de aplicación (<i>Hive</i> , <i>Cloud</i> y <i>Acquisition</i>) entre sí en la fase de inicialización del sistema. Para dar noción de consumo eléctrico, en <i>Cloud</i> se utiliza la barra de actividad para representar que no solo esos componentes están activos sino que hay un consumo elevado asociado a ellos en dicho período.	92
7.5.	El diagrama de secuencia expone cómo interactúan los componentes principales de la capa de aplicación (<i>Hive</i> , <i>Cloud</i> y <i>Acquisition</i>) entre sí en el ciclo de ejecución principal. Para dar noción de consumo eléctrico, en <i>Acquisition</i> y <i>Cloud</i> se utiliza la barra de actividad para representar que no solo esos componentes están activos sino que hay un consumo elevado asociado a ellos en dicho período. . .	93
8.1.	Arquitectura de módulos del servicio HiveService, mostrando las dependencias entre los cuatro módulos Python (<i>config.py</i> , <i>hivecare_service.py</i> , <i>mqtt_handler.py</i> y <i>db.py</i>) y su interacción con los componentes externos: el broker MQTT Mosquitto, la base de datos MariaDB y la interfaz gráfica Grafana.	98
8.2.	Diagrama de secuencia del flujo de configuración remota de colmenas. Cuando el usuario modifica parámetros en la GUI, el servicio HiveService detecta el cambio en la base de datos, publica la nueva configuración por MQTT y activa el mecanismo de reintentos hasta recibir el ACK de confirmación por parte de la colmena. Por simplificación del esquema, el <i>broker</i> MQTT no se representa explícitamente; este se encuentra entre el Servicio y la Colmena, siendo el punto al que ambos publican y del que ambos reciben los mensajes MQTT.	99
8.3.	Diagrama de secuencia del flujo de recepción de medidas. El servicio HiveService recibe los datos enviados por la colmena vía MQTT, los valida para descartar duplicados o errores, los inserta en MariaDB y actualiza el estado de los marcos activos, reflejando los cambios de forma inmediata en la interfaz gráfica. Por simplificación del esquema, el <i>broker</i> MQTT no se representa explícitamente; este se encuentra entre el Servicio y la Colmena, siendo el punto al que ambos publican y del que ambos reciben los mensajes MQTT. . . .	100
8.4.	Ventana principal del panel de control HiveCare en Grafana, desde donde el usuario puede registrar nuevas colmenas ingresando nombre, descripción e IMEI, y acceder a las opciones de visualización de datos o configuración de cada colmena registrada.	101
8.5.	Ventana de configuración de colmena en Grafana, dividida en tres secciones: ajuste de período de muestreo y cantidad de marcos activos (con indicador de estado de confirmación), edición de nombre y descripción, y asignación de UUIDs detectados a posiciones físicas dentro de la colmena.	102

8.6.	Gráficas de temperatura de dos Marcos HiveCare pertenecientes a una misma colmena, visualizadas en la ventana de datos de Grafana durante una ventana temporal de un día. Cada gráfica presenta tres series de temperatura según la posición del sensor respecto al tag (Cerca, Centro, Lejos) y la temperatura exterior	103
9.1.	Diagrama de módulo de la impedancia de la antena diseñada para el marco con el capacitor de adaptación hallado obtenidas mediante un VNA. Se puede observar que la impedancia alcanza su punto máximo a los 13,63 MHz.	112
9.2.	Evolución de las señales de estado del sistema de carga en una ventana temporal de tres días. Período de lectura de cinco minutos. En rojo se observa cuándo el panel solar entrega energía y en verde cuándo la batería esta siendo cargada. Ambas señales son activas por nivel bajo.	114
9.3.	Marco del sistema luego de tres semanas de introducido en la colmena. Se puede observar en él cómo las abejas aceptaron el marco modificado y comenzaron a estirarlo. En el núcleo de abejas que se observa en la mitad del marco se puede ver las celdas construidas sobre el costado izquierdo del conjunto de abejas mencionado. Colmena instalada en el CRS (Centro Regional Sur), dependencia de la Facultad de Agronomía.	115
9.4.	Gráficas relevadas en una colmena en campo. En línea continua se observan las temperaturas correspondientes al marco ubicado en la posición 4, encontrado dentro del nido de cría (los marcos aledaños presentan crías). En línea punteada se observan las temperaturas correspondientes al marco ubicado en la posición 2, encontrado fuera del nido de cría.	116
D.1.	Esquema simplificado de la integración del sistema HiveCare en una colmena tipo Langstroth. Se muestran los Marcos HiveCare ubicados dentro de la cámara de cría y el Lector HiveCare instalado en el exterior de la colmena dentro de una caja estanca. Además se muestra como esta manda los datos hacia la infraestructura remota. Generado con asistencia de Claude (Anthropic).	138
D.2.	Pantalla de inicio de sesión en Tailscale. La opción <i>Usa tu contraseña</i> se encuentra en la parte inferior de la ventana y permite ingresar con la contraseña proporcionada en lugar de recibir un código por correo.	139
D.3.	Pantalla de inicio de sesión de Grafana. Para crear un nuevo usuario seleccionar <i>Sign up</i> e ingresar los datos solicitados.	140
D.4.	Interior de la caja estanca del Lector HiveCare con sus componentes identificados. El recuadro y la flecha roja señalan la ubicación del IMEI en la parte superior del módulo NB-IoT.	141
D.5.	Pantalla principal de la interfaz gráfica HiveCare en Grafana. El recuadro rojo indica el formulario para registrar una nueva colmena ingresando nombre, descripción e IMEI.	141

Índice de figuras

D.6. Pantalla de configuración de colmena en Grafana, dividida en tres secciones: ajuste de período de muestreo y cantidad de marcos activos, edición de nombre y descripción, y asignación de UUIDs a posiciones físicas dentro de la colmena.	142
D.7. Paneles de temperatura generados automáticamente para dos marcos configurados. Cada panel muestra las tres series de temperatura dentro del marco (Cerca, Centro y Lejos respecto al tag) junto con la temperatura exterior como referencia.	143

Esta es la última página.
Compilado el viernes 31 julio, 2026.
<http://iie.fing.edu.uy/>