



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Diseño y Validación de un framework para IoT basado en tecnología RFID

Oscar Andrés Urbano Vallejo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá, Colombia
2018

Diseño y Validación de un framework para IoT basado en tecnología RFID

Oscar Andrés Urbano Vallejo

Tesis presentada en la Universidad Nacional de Colombia como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Electrónica

Director:

Ph.D Cesar Augusto Pedraza

Codirector:

Ph.D Ángel Perles

Lineas de Investigación:

Redes Inalámbricas de Sensores e Internet de las Cosas

Grupos de Investigación:

Compatibilidad Electromagnética (EMC-UN)

Redes Inalámbricas de Sensores (RIS-UPV)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Bogotá, Colombia

2018



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TELECOM ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE **UPV** INGENIEROS
DE TELECOMUNICACIÓN

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN FRAMEWORK PARA IOT BASADO EN TECNOLOGÍA RFID

Oscar Andrés Urbano Vallejo

Tutor: Ángel Perles

Cotutor: Cesar Augusto Pedraza

Trabajo Fin de Master presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Máster en Ingeniería de Telecomunicación

Curso 2017-18

Valencia, 16 de abril de 2018

A mis padres, que con su dedicación, confianza y empeño, se han preocupado por formar el ambiente perfecto para potenciar mi formación personal y profesional.

“With a few exceptions, the rich countries of today are those that embarked on the process of industrialization and technological change starting in the nineteenth century, and the poor ones are those that did not”

— Daron Acemoglu, *Why Nations Fail: The Origins of Power, Prosperity, and Poverty*

Agradecimientos

Al grupo de investigación en Compatibilidad Electromagnética (EMC-UN) de la Universidad Nacional de Colombia, cuya investigación previa sobre Sistemas Inteligentes de Transporte, Identificación por Radio Frecuencia (RFID), e Internet de las Cosas (IoT), condujo al planteamiento de este trabajo.

Al grupo de investigación en Redes Inalámbricas de Sensores (RIS-UPV) de la Universitat Politècnica de València, que con su apoyo y guía sacó adelante el desarrollo de este proyecto.

Al Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos para el Desarrollo (IIAD-UPV) de la Universitat Politècnica de València, por su colaboración en las pruebas de validación del sistema y su aportación en el artículo desarrollado, producto de esta investigación.

Resumen

Este documento presenta el diseño y validación de un framework para Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés) basado en tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID por sus siglas en inglés). El diseño parte de una revisión del estado del arte sobre tecnologías utilizadas en aplicaciones IoT. A continuación y aplicando la metodología en V [1], típica en proyectos de investigación, se describe cada etapa del diseño compuesto por módulos de hardware y software. Finalmente, el framework desarrollado es validado aplicándolo en la monitorización de temperatura en alimentos.

Palabras clave: Internet de las Cosas, Identificación por Radiofrecuencia, Redes Inalámbricas de Sensores.

Abstract

This document presents the design and validation of a framework for the Internet of Things (IoT) based on Radio Frequency Identification technology (RFID). The design starts with a review about the state of the art related to technologies used in IoT applications. Next, and applying a V methodology [1], typical in research projects, each stage of the design is described which is composed by hardware and software modules. Finally, the developed framework is validated applying it into food temperature monitoring.

Keywords: Internet of Things, Radio Frequency Identification, Wireless Sensor Networks

Contenido

Resumen	IX
Lista de figuras	XI
Lista de tablas	XIII
Lista de Símbolos y abreviaturas	XV
1. Introducción	1
2. Estado del arte	3
2.1. Tecnologías y estándares actuales en IoT	3
2.1.1. Tecnologías de área local	4
2.1.2. Tecnologías de área extendida	5
2.1.3. Protocolos de manejo de datos	6
2.2. Empresas que actualmente despliegan soluciones IoT	7
2.3. Productos para monitorización de cadena de frío	9
2.4. Justificación y objetivos	11
2.4.1. Justificación	11
2.4.2. Identificación del problema	11
2.4.3. Alcance	11
2.4.4. Objetivos	12
3. Sistema propuesto	13
3.1. Concepto operacional	14
3.1.1. Roles de usuario	14
3.1.2. Regulaciones y normas	15
3.2. Identificación de requisitos	16
3.2.1. Requisitos generales del sistema	16
3.2.2. Requisitos específicos del dispositivo sensor	17
3.3. Arquitectura propuesta	18
3.4. Plan de validación	19
3.5. Diseño y desarrollo	20
3.5.1. Dispositivos sensores	22
3.5.2. Gateways RFID	32

3.5.3. Sistema de Información y Administración	36
3.6. Evaluación de requisitos	39
3.6.1. Evaluación de requisitos generales del sistema	40
3.6.2. Evaluación de requisitos específicos del dispositivo sensor	41
4. Validación del sistema	42
4.1. Trazabilidad en la industria alimenticia	42
4.1.1. Tecnología en sistemas de trazabilidad	43
4.2. El sistema propuesto: Orbis Traceability System	43
4.3. Pruebas de validación	46
4.3.1. Monitorización de temperatura en calabaza troceada	46
4.3.2. Monitorización de temperatura en naranjas	49
5. Conclusiones y recomendaciones	52
5.1. Conclusiones	52
5.2. Recomendaciones	53
A. Anexo: Versión final de la etiqueta	55
A.1. Esquemáticos de la versión final	56
A.2. Estimación de costos	57
Bibliografía	58

Lista de Figuras

2-1. Resumen de protocolos utilizados en IoT [2].	3
3-1. Metodología en V [1].	13
3-2. Concepto operacional.	14
3-3. Arquitectura general del sistema.	18
3-4. Subsistemas e interfaces.	21
3-5. Arquitectura de los dispositivos sensores.	22
3-6. Prototipo de etiqueta inteligente.	23
3-7. Esquemático del prototipo.	24
3-8. PCB del prototipo.	25
3-9. Dimensiones de la antena de referencia [3].	26
3-10. Distancias de lectura en metros para el diseño de referencia [3].	27
3-11. Diagrama de flujo del funcionamiento del dispositivo sensor.	28
3-12. Byte de configuración del dispositivo sensor.	29
3-13. Mapa lógico de memoria del chip RFID [4].	30
3-14. Perfil de consumo del dispositivo sensor.	32
3-15. Arquitectura del gateway RFID.	33
3-16. Prototipo del gateway RFID.	33
3-17. Diagrama de flujo del funcionamiento del gateway RFID.	35
3-18. Arquitectura del Sistema de Información.	36
3-19. Visualización de la Pagina Web.	37
3-20. Funciones de back-end.	38
3-21. Funciones de front-end.	38
3-22. Base de datos relacional.	39
4-1. Arquitectura de Orbis Traceability System.	44
4-2. Plataforma IoT desplegada en la nube.	45
4-3. Esquema de operación de las pruebas de validación.	46
4-4. Pruebas con calabaza troceada.	47
4-5. Temperatura registrada en calabaza troceada.	48
4-6. Pruebas de transporte en naranjas.	49
4-7. Seguimiento de las naranjas.	50
4-8. Temperatura registrada en naranjas.	51

A-1. Esquemático de la versión final de la etiqueta inteligente. 56

Lista de Tablas

2-1. Comparación entre tecnologías de área local en IoT [5].	5
2-2. Comparación entre tecnologías LPWAN [6].	6
2-3. Productos comerciales en cadena de frío.	10
3-1. Rampas de temperatura para la calabaza troceada.	19
3-2. Componentes del prototipo	23
3-3. Campos del byte de configuración del dispositivo sensor.	29
3-4. Consumo de corriente teórico del prototipo.	31
3-5. Consumo de corriente real del prototipo.	31
3-6. Duración estimada de una batería de 620 mAh.	32
3-7. Componentes del prototipo del gateway RFID.	34
4-1. Rampas de temperatura para la calabaza troceada.	47
4-2. Tiempo total para cada rango de temperaturas.	48
A-1. Estimación de costos para 1000 unidades.	57

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>IoT</i>	Internet of Things (Internet de las Cosas)
<i>RFID</i>	Radiofrequency Identification (Identificación por Radiofrecuencia)
<i>WSN</i>	Wireless Sensor Networks (Redes Inalámbricas de Sensores)
<i>SINIEV</i>	Sistema Nacional de Identificación Electrónica Vehicular
<i>MINTIC</i>	Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones
<i>PCIV</i>	Plataforma para el Control Inteligente de Vehículos
<i>ANE</i>	Agencia Nacional del Espectro
<i>PAN</i>	Red de Área Personal (Personal Area Network)
<i>LAN</i>	Red de Área Local (Local Area Network)
<i>WAN</i>	Red de Área Amplia (Wide Area Network)
<i>PCB</i>	Tarjeta de Circuito Impreso (Printed Circuit Board)

1. Introducción

El Internet de las Cosas (IoT) supondrá la integración e interacción entre el mundo físico/real y el mundo digital/virtual, donde por medio del uso de tecnologías inteligentes, como redes inalámbricas de sensores y actuadores (WSAN), computación en la nube e inteligencia artificial, se llegará a conectar los diferentes dispositivos (things) en cualquier momento, en cualquier lugar y para cualquier aplicación [5]. A pesar de que parezca un panorama futurista, es un concepto que ya se viene desarrollando desde los 90's [7] y que cuenta actualmente con múltiples casos de uso exitosos [8, 9, 10, 11, 12, 13]. Estos sistemas IoT se basan en frameworks que varían dependiendo del fabricante y la aplicación para la que están diseñados, implementando diferentes tipos de tecnologías y estándares de acuerdo a las necesidades de cada aplicación.

La investigación que se hace alrededor de tecnologías que permitan el despliegue del Internet de las Cosas es enorme, y debido al rápido cambio y evolución que la industria tecnológica experimenta, muchas tecnologías quedan obsoletas en pocos años o su adopción es superada por otras, ya sea por temas relacionados con costos o estandarización. Es en este punto donde tecnologías maduras, y que cuenten con un alto índice de adopción en la industria, presentan un panorama más fuerte para convertirse en la infraestructura tecnológica elegida para soportar aplicaciones emergentes.

En el caso de IoT existe una tecnología que varios autores señalan como clave para su despliegue, esta es la Identificación por Radiofrecuencia (RFID) [7, 5]. Desarrollada desde la segunda guerra mundial, es una tecnología madura y con aceptación en múltiples industrias [14]. Está desplegada alrededor del mundo y cuenta con estándares que regularizan su uso y garantizan su continua evolución. En la cadena de suministro, se halla comúnmente registrando la trazabilidad de diferentes productos. En los almacenes y tiendas, se encuentra adherida a los productos que consumimos. En el transporte público, es utilizada en las tarjetas de registro. Y es de especial importancia para el ministerio de transporte de Colombia, que con la implementación del Sistema Nacional de Identificación Electrónica Vehicular (SINIEV), adoptará el uso de la tecnología RFID, regularizada bajo la norma ISO 18000-6C [4], en el recaudo automático de peajes [15].

A pesar del auge de RFID y el panorama que presenta para volverse una tecnología clave para el Internet de las Cosas, en la comunidad académica existe una falta de estudios que

respalden su uso en este campo. Los framework presentados comúnmente se basan en Redes Inalámbricas de Sensores, que implementan tecnologías como ZigBee, Bluetooth o Wi-Fi y hardware de rápido desarrollo como Arduino o Raspberry. Estas tecnologías no son suficientes cuando IoT requiere desplegarse en aplicaciones con limitada disponibilidad energética y donde, además, temas relacionados con costos de implementación también deben ser tenidos en cuenta. La tecnología RFID está actualmente desplegada en muchas empresas, que hace tiempo la adoptaron como parte de su núcleo tecnológico, lo cual constituye una ventaja al desplegar aplicaciones IoT aprovechando esta infraestructura.

Este documento presenta el diseño y validación de un framework para IoT basado en tecnología RFID. Para establecer un marco teórico, se parte con una revisión de las tecnologías más comunes en este área y se presenta algunas soluciones IoT y las empresas que las despliegan, haciendo énfasis en los protocolos que utilizan y las tecnologías en que basan sus soluciones. A continuación, siguiendo la metodología en V [1] típica en proyectos de investigación, se parte del caso de uso de monitorización de la cadena de frío, se define el concepto operacional del sistema, la identificación de requisitos, seguido del diseño de alto nivel, continuando con diseños de mas bajo nivel, enfocándose en los módulos de hardware y software que componen el sistema. Toda la etapa de desarrollo es documentada en repositorios y el proyecto en general se encuentra documentado en el sitio web <https://sites.google.com/site/rfid2iot/home>, donde queda disponible para su posterior consulta. Por último y en colaboración con el Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos para el Desarrollo de la Universitat Politècnica de València, el sistema desarrollado es validado en la monitorización de temperatura de calabaza troceada y naranjas, con el fin de reconocer ruptura de la cadena de frío o malas condiciones de almacenamiento o transporte.

El sistema desarrollado se limita a la monitorización de temperatura en aplicaciones de control de la cadena de frío. Sin embargo, es aplicable también en otros campos, donde, con la integración correcta de sensores y software a nivel de aplicación, se puede aprovechar el framework propuesto para crear nuevas soluciones tecnológicas aplicables a múltiples industrias.

2. Estado del arte

El despliegue actual de soluciones IoT se basa en múltiples tecnologías que son utilizadas dependiendo de la aplicación y sus limitantes. A continuación, se describen las tecnologías y estándares más usadas actualmente en el despliegue de soluciones IoT, seguido de algunas empresas que desarrollan esta tecnología. Posteriormente, y ya que el framework desarrollado se aplica en monitorización de la cadena de frío, se describe algunas soluciones utilizadas en este área. Finalmente, se hace un análisis de los cambios o mejoras que presenta el sistema desarrollado frente a las soluciones existentes.

2.1. Tecnologías y estándares actuales en IoT

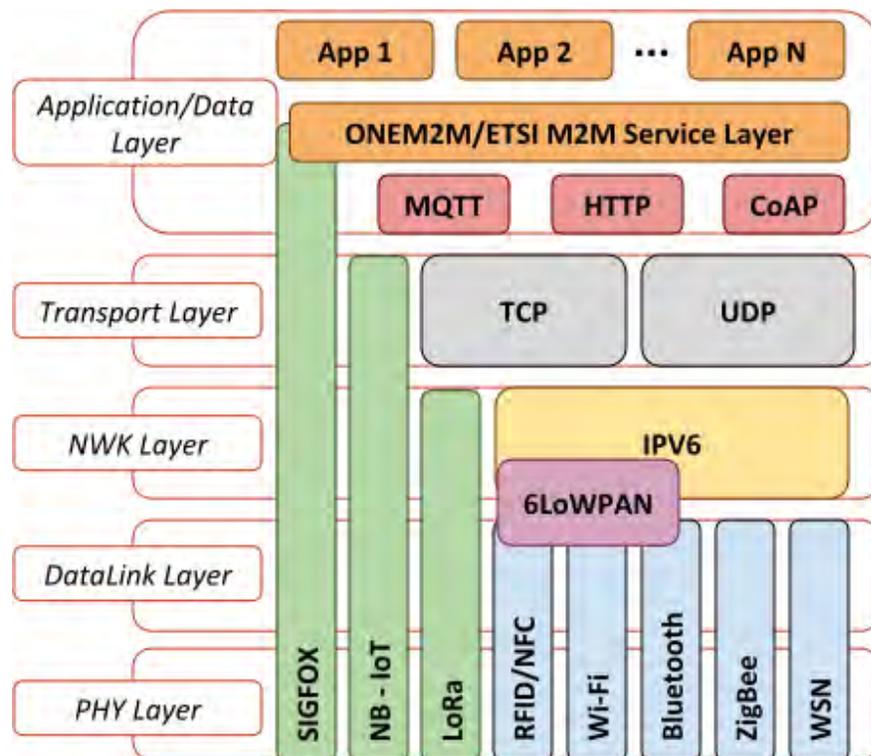


Figura 2-1. Resumen de protocolos utilizados en IoT [2].

En la figura **2-1** se resume los protocolos y las tecnologías sobre los que se viene desarrollando el Internet de las Cosas. Las tecnologías de capas menores, física y de enlace de datos, pueden ser clasificadas de acuerdo al área de cobertura, área local o área extendida. En las capas superiores, red, transporte y aplicación, se menciona los protocolos mas usados en aplicaciones IoT.

2.1.1. Tecnologías de área local

Muchas soluciones IoT se basan en tecnologías comunes como Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee o RFID. En [5] se hace una comparación de las tecnologías de comunicación mas utilizadas en aplicaciones IoT hasta el año 2014. La tabla **2-1** muestra un resumen de la comparación entre estas tecnologías. Se evalúa aspectos como: tipo de red que implementan, topología, potencia consumida, velocidad de datos, banda de frecuencias y rango de cobertura.

Wi-Fi (familia de estándares IEEE 802.11) y Bluetooth (estándar IEEE 802.15.1) fueron inicialmente diseñados en la banda de 2.4 GHz. Wi-Fi fue creado como una alternativa a las redes cableadas de área local (LAN), está orientado a conexiones centralizadas y de alta velocidad de transferencia. Bluetooth, por su parte, es comúnmente encontrado en wearables, está pensado para redes de área personal (PAN) y está orientado a aplicaciones de bajo consumo de energía y baja velocidad de transferencia. Por otro lado, ZigBee y gran cantidad de las redes inalámbricas de sensores (WSN) se basan en el estándar IEEE 802.15.4, que define la operación en la capas física y de acceso, para redes de área personal de baja velocidad. Z-Wave, WirelessHART y MiWi son algunos ejemplos de tecnologías que se extienden de este estándar [5].

RFID es el acrónimo de identificación por radiofrecuencia, es una tecnología en auge y en continuo desarrollo. NFC es un subconjunto de la tecnología RFID y está orientado a conexiones cercanas, de menos de 10 cm. La tecnología RFID se basa en etiquetas instaladas en objetos y lectores RFID, que se comunican inalámbricamente por medio de un protocolo definido, según el tipo de etiqueta, que puede ser pasiva o activa. Las etiquetas pasivas, regularizadas bajo el estándar ISO 18000-6C [4], están compuestas de una antena y un diminuto circuito integrado, se alimentan con la energía proveniente de la onda electromagnética del lector al momento de la interrogación por lo cual no necesitan baterías, lo que las hace económicas pero con rangos de comunicación reducidos, máximo 12 metros con línea de vista. Por otro lado, las etiquetas activas implementan una batería que respalda los procesos de comunicación, logrando distancias mucho mayores alrededor de 50 metros sin línea de vista. Este tipo de etiquetas implementan diferentes protocolos y frecuencias de operación, dependiendo del fabricante, muchas cuentan con capacidades de sensado y comunicaciones Ad-hoc. Sin embargo su precio es mayor que el de las etiquetas pasivas [16].

Tabla 2-1. Comparación entre tecnologías de área local en IoT [5].

	RFID	NFC	Wi-Fi	ZigBee	Buethooth	WSN
Network	PAN	PAN	LAN	LAN	PAN	LAN
Topology	P2P	P2P	Star	Mesh, Star, Tree	Star	Mesh, Star
Power	Very low	Very low	Low - High	Very low	Low	Very Low
Data rate	400 Kbps	400 Kbps	11 Mbps - 600 Mbps	20 Kbps, 250 Kbps	25 Mbps - 250 Mbps	250 Kbps
Frequency bands (MHz)	860, 960	13.56	2400 , 5000	868, 915, 2400	2400	868, 915, 2450
Coverage range (meters)	< 10	< 0.1	40 indoor, 90 outdoor	10 - 100	< 10	10 - 100

Si bien Wi-Fi es una tecnología eficiente para el Internet de hoy en día, para el caso del Internet de las Cosas requiere tener en cuenta aspectos relacionados al consumo de energía. Por su parte, ZigBee y Bluetooth se caracterizan por su bajo consumo de energía. Sin embargo, presentan una cobertura limitada cuando se quiere implementar redes inalámbricas de varios kilómetros [6]. Por otro lado, RFID y NFC han probado ser tecnologías eficientes en la identificación de objetos y comunicaciones de corta distancia. Las etiquetas de esta tecnología trabajan de manera pasiva funcionando con la energía proveniente del interrogador. Además, RFID se caracteriza por ser una tecnología madura, utilizada desde finales de los años 60's [14], con buena prospectiva, gran aceptación en la industria y de mucha importancia para el ministerio de transporte del gobierno nacional colombiano que por medio de la implementación del Sistema Nacional de Identificación Electrónica Vehicular (SINIEV), adoptará el uso de la tecnología RFID estandarizada bajo la norma ISO 18000-6C [4], con lo que las investigaciones realizadas alrededor de esta tecnología cobran importancia.

2.1.2. Tecnologías de área extendida

En IoT, las tecnologías de área extendida buscan alcanzar coberturas del orden de kilómetros, buscando un mínimo consumo de potencia en sus dispositivos. Esto se logra aplicando modernas técnicas de modulación y corrección de errores. Estas tecnologías son conocidas como Redes de Área Amplia de Baja Potencia ó LPWANs (Low-Power Wide Area Networks) por su acrónimo en inglés. Se pueden mencionar cuatro tecnologías principales: SIGFOX, Ingenu, LoRa y NB-IoT [6, 17].

SIGFOX, fundada en el 2009, fue la primer tecnología LPWAN propuesta en el mercado, utiliza modulación de banda ultra estrecha (UNB) y el resto de su stack de protocolos es cerrado. Se desempeña como operador de servicios IoT, por lo cual no necesita abrir especificaciones de sus módulos internos. Por otro lado, Ingenu, es una tecnología que trabaja en la banda de 2.4 GHz, utiliza una técnica patentada de comunicación basada en RPMA (Random Phase Multiple Access), lo que garantiza su operabilidad en desafiantes ambientes de RF. LoRa, por su parte, utiliza un tipo de modulación basado en Chirp Spread Spectrum modulation patentado por Semtech que se caracteriza por: alta tolerancia a interferencias, bajo consumo, alta sensibilidad de recepción de datos (-168 dB) y largo alcance (hasta 15 Km) [6, 18]. Por último, Narrowband IoT (NB-IoT) [19], conocida además como LTE Cat NB1, es una tecnología más reciente que las anteriores, estandarizada por la 3GPP, se empezó a desplegar en el 2016, opera en pequeños segmentos libres del espectro de LTE, sacando provecho de las redes de telefonía celular instaladas actualmente, o sea que tiene la ventaja de no requerir la instalación de nueva infraestructura. Las redes de telefonía celular actuales soportan trafico inalámbrico del orden de Gbps, con NB-IoT lo que se busca es minimizar el trafico a unos cuantos Kbps, lo cual es suficiente para muchas aplicaciones de sensado. Con esta tecnología se tiene un mejor cubrimiento en ambientes interiores (indoor), con 20 dB más en el balance de potencias respecto a GPRS [20]. La tabla **2-2** presenta una comparación entre estas 4 tecnologías [6, 17, 21].

Tabla 2-2. Comparación entre tecnologías LPWAN [6].

	SIGFOX	Ingenu	LoRa	NB-IoT
Coverage range (km)	Rural: 30 - 50 Urban: 3 - 10	15	Rural: 10 -15 Urban: 3 - 5	35
Frequency bands (MHz)	868, 902	2400	169, 433, 868, 915	Various: 1920, 1850, 824, ...
Bidirectional link	✓	<i>X</i>	✓	✓
Data rate (Kbps)	0.1	0.01 - 8	0.3 - 37.5	250
Nodes per gateway	$\approx 10^6$	$\approx 10^4$	$\approx 10^4$	—

2.1.3. Protocolos de manejo de datos

Los protocolos de manejo de datos constituyen otro aspecto importante para el despliegue de la tecnología IoT. Se busca que estos protocolos sean livianos y puedan ser implementados por dispositivos con limitadas capacidades de computo y poca disponibilidad de energía. Se pueden mencionar tres protocolos principales: 6LoWPAN, MQTT y CoAP.

6LoWPAN presenta la implementación de IPv6 sobre redes de área personal de baja potencia. Este es un protocolo de la capa de red y provee funciones de direccionamiento y comunicación entre dispositivos con bajas capacidades de cómputo. Sin embargo, no tiene el alcance de definir un estándar de comunicación entre diferentes WSN en la capa física, para lo que hace uso del estándar IEEE 802.15.4, que, como ya se mencionó anteriormente, es el utilizado por ZigBee y gran parte de las WSN [22].

Los protocolos MQTT y CoAP se encuentran en la capa de aplicación del modelo TCP/IP. MQTT fue estandarizado por OASIS el 29 de octubre de 2014 [23], se caracteriza por su simplicidad y fácil implementación. Por su parte CoAP se encuentra soportado en el documento RFC 7252 (Junio de 2014) [24] y está de camino a convertirse en un estándar para IoT.

MQTT se caracteriza por ser un protocolo liviano, de bajo contenido y encabezados pequeños, basado en una arquitectura publish/subscribe ideal para implementar en dispositivos de bajas capacidades de cómputo, se puede añadir seguridad tanto en el payload como en la capa de transporte implementando TLS que es básicamente cifrado por SSL (el mismo que convierte HTTP en HTTPS). En la capa de transporte implementa el protocolo orientado a conexión TCP y se envían constantes acknowledge, cada 5 minutos, para que no se cierre la conexión. La capa de red es transparente para MQTT y puede ser desplegado sobre conexiones IPv4 o IPv6 [25].

CoAP es una derivación de HTTP creada para aplicaciones de baja disponibilidad energética y bajas capacidades de cómputo, dentro del contexto del Internet de las Cosas, hereda la arquitectura de HTTP al implementar peticiones POST, GET, DELETE y REST. La mejora que presenta frente a HTTP es la disminución en el contenido de las cabeceras mediante la implementación de mensajes más cortos, no entendibles por el humano, dejando atrás el contenido fácilmente entendible de HTTP. Sin embargo, se han desarrollado aplicaciones para traducir texto CoAP a HTTP y viceversa. En la capa de transporte, CoAP utiliza el protocolo UDP no orientado a conexión, y mantiene la comunicación gestionandola directamente en la capa de aplicación. En la capa de red, CoAP está pensado para desplegarse sobre redes IPV6, permitiendo el despliegue de 6LoWPAN [26].

2.2. Empresas que actualmente despliegan soluciones IoT

En la literatura existen múltiples casos de éxito en la implementación de IoT en aplicaciones tan variadas como: sistemas inteligentes de transporte, agricultura inteligente, logística, domótica o control de la cadena de frío en alimentos y medicamentos. A continuación, se presenta algunas empresas que despliegan y desarrollan tecnología IoT.

Libelium: Es una compañía española reconocida a nivel mundial que apuesta por un modelo open-source, donde provee kits modulares de hardware, bastante completos, que integran sensores, baterías, equipos de procesamiento y comunicaciones, listos para integrar de acuerdo a la aplicación. Esta compañía provee además servicios de almacenamiento en la Nube, desde donde el cliente puede extraer sus datos y adecuarlos al servicio que desee desarrollar. Algunas de estas aplicaciones son: Smart Roads, Smart Lighting, Intelligent Shopping, Smart Parking, Smart Agriculture, entre otras [27].

IQRF: Es una plataforma completa para despliegue de soluciones IoT. Caracterizada por: bajo consumo, baja velocidad, bajo volumen de datos. Maneja un protocolo de conexión en malla llamado IQMesh [28]. Proveen kits de hardware modulares, donde se puede integrar sensores de humedad, temperatura, calidad del aire, monóxido de carbono, etc [29]. Cuenta con casos de estudio en áreas como: minería (detección de monóxido de carbono), smart home o smart parking [30, 31, 29, 32].

Oceasoftware: Es una empresa que diseña calibra y comercializa sensores inalámbricos inteligentes para monitorear parámetros como humedad, temperatura, niveles de CO₂ y otros utilizados en la industria agrícola. Esta empresa con mas de 10 años de trayectoria en I+D ofrece una línea de soluciones de monitoreo basada en sensores y tecnología Bluetooth de bajo consumo. Productos recientes implementan ya la tecnología LoRaWAN, siendo Oceasoftware un miembro de la LoRa Alliance, buscando así la estandarización de las comunicaciones inalámbricas de largas distancias y bajo consumo [33].

Hermes IoT platform: Es una plataforma para IoT que se basa en el uso de tecnología RFID pasiva, donde las etiquetas cuentan con sensores integrados que se activan con la onda electromagnética del interrogador. Es decir, no se almacena un historial de medidas en la etiqueta. La empresa enfoca los servicios a la monitorización de variables dentro del proceso de producción para mantener alarmas críticas de forma local e inmediata [34].

Acurite: Es una sub-marca perteneciente a la corporación estadounidense Chaney Instrument Co. Se dedica a la producción de dispositivos para medición de las variables climáticas para interior y exterior dirigidos al consumidor final y en espacios pequeños, es decir para el hogar. Desarrolla dispositivos que sensan temperatura, humedad, luz, velocidad del viento y precipitaciones, y que cuentan con aplicaciones para smart-phone o pantallas que sirven de interfaz de usuario [35].

Digi International: Compañía fundada en 1985, es un proveedor global de productos y servicios de conectividad entre maquinas (M2M) e Internet de las Cosas (IoT). En su línea DIGI SMART SOLUTIONS ofrece soluciones completas, Hardware, Software y Servicios en la Nube, para el usuario final, en las áreas de la salud, transporte, logística e industria de

alimentos. Su modelo de negocio se enfoca en vender soluciones completas para el usuario final, partiendo de una serie de requisitos hasta la producción de la solución final, que puede integrar diversas tecnologías [36].

Sensoscientific: Es una compañía estadounidense establecida desde el 2005, inicialmente con el fin de proveer servicios de calibración en la industria de monitorización de temperatura y humedad. Hoy en día esta compañía ofrece dispositivos confiables y calibrados enfocados a la monitorización de temperatura y humedad. Maneja varios dispositivos con tecnología NFC que funcionan como data loggers de temperatura, con memoria de hasta 4000 mediciones y bajo consumo de energía [37].

2.3. Productos para monitorización de cadena de frío

En la monitorización de cadena de frío los productos comerciales implementan varias de las tecnologías mencionadas anteriormente (Wi-Fi, Bluetooth, LoRa, etc.) y funcionan de maneras diversas, como simples data loggers, con conexión a Internet, almacenamiento en la nube o con conexión a smartphones y aplicaciones que sirven de interfaz de usuario. La tabla **2-3** muestra un resumen de algunos dispositivos comerciales utilizados en este campo.

Tabla 2-3. Productos comerciales en cadena de frío.

Producto	Descripción	Imagen
EMERALD Temperature Recorder [38]	Rango: -40 a 85 °C Grabaciones: 4000 Interfaz: Smart-phone App, Cloud Tecnología: Bluetooth	
SensoTag NFC [39]	Rango: -40 a 60 °C Grabaciones: 4000 Interfaz: Smart-phone App, Cloud Tecnología: NFC	
Cobalt ML3 Temperature Recorder [40]	Rango: -40 a 60 °C Grabaciones: 4000 Interfaz: Smart-phone App, Cloud Tecnología: LoRaWAN	
Monnit Wireless Temperature Sensor [41]	Rango: -7 a 60 °C Grabaciones: 512 Interfaz: RF - 900 MHz, Cloud Tecnología: Propietaria (900 MHz)	
CCP Smart Tags [42]	Rango: - °C Monitoriza: Puntos críticos Interfaz: Cloud Tecnología: WiFi, NFC, 4G, Sigfox y NBloT	
STICKNTRACK GPS/TEMP [43]	Rango: -20 a 60 °C Monitoriza: Temperatura y GPS Interfaz: Cloud Tecnología: Sigfox	

2.4. Justificación y objetivos

2.4.1. Justificación

En [44] se muestra una revisión de las tecnologías que contribuyen a la implementación de IoT. Según los autores, 4 características deben coexistir en la electrónica desarrollada para el Internet de las Cosas, estas son: capacidad de sensado, capacidad de comunicación, autonomía energética y ser eco-amigables. Gracias a avances en RFID como: integración de sensores [45, 46], energy harvesting [47, 12] y solución a los problemas de seguridad [48, 49], RFID tiene el potencial de cumplir estas cuatro características y algunos autores incluso afirman que RFID y WSN van a llegar a converger produciendo pequeñas y económicas etiquetas conectadas unas con otras, cerrando la brecha existente entre los objetos reales y su interpretación digital [16].

Como se puede observar, las soluciones IoT para monitorización de cadena de frío normalmente no tienen en cuenta la tecnología RFID de largo alcance, limitando su uso únicamente a aplicaciones de identificación. Y a pesar del potencial de RFID como una de las tecnologías claves en IoT, se evidencia una falta de estudios que respalden esta idea [50].

2.4.2. Identificación del problema

A pesar del auge de RFID y el panorama que presenta para volverse una tecnología clave para el Internet de las Cosas, en la comunidad académica existe una falta de estudios que respalden su uso en este campo. Los framework presentados, comúnmente se basan en WSN, que implementan tecnologías como ZigBee, Bluetooth o WI-FI y hardware de rápido desarrollo como Arduino, Raspberry o Beagle. Estas tecnologías no son suficientes cuando IoT requiere desplegarse en aplicaciones con limitada disponibilidad energética, donde aspectos como la ejecución del sistema operativo y los protocolos de comunicación, consumen demasiada energía. Es en este punto, donde estándares de bajo consumo de energía, como los utilizados por la tecnología RFID, evidencian la gran utilidad que pueden prestar al despliegue de IoT.

2.4.3. Alcance

El framework desarrollado toma como base la tecnología RFID de largo alcance, estandarizada bajo la norma ISO 18000-6C, y partiendo de etiquetas con sensores integrados, se propone toda una solución para monitorización de temperatura en la cadena de frío, cuyo alcance es evaluar el desempeño de esta tecnología en el área. Si bien es cierto que implementando soluciones de seguridad o energy harvesting se podría potenciar al máximo el framework desarrollado, estos cambios no se consideran, pues se salen del alcance de este trabajo.

2.4.4. Objetivos

Objetivo general

- Diseñar y validar un framework para Internet de las Cosas, implementando tecnología RFID para la etapa de comunicaciones correspondiente a la capa de percepción de datos.

Objetivos específicos

- Diseñar una arquitectura de IoT compuesta por: sensores (en las etiquetas RFID), gateways recolectores de datos (lectores RFID), y un sistema de información (base de datos).
- Desarrollar un prototipo de hardware de una etiqueta RFID equipada con capacidades de sensado, como: temperatura, humedad o aceleración.
- Desarrollar un prototipo de gateway compatible con la tecnología RFID, con conexión a la capa de red y al sistema de información a implementar.
- Validar el framework propuesto, por medio de un experimento o prueba de campo.

3. Sistema propuesto

El sistema propuesto en este trabajo se desarrolló aplicando la metodología en V [1], típica en proyectos de investigación, mostrada en la figura 3-1.

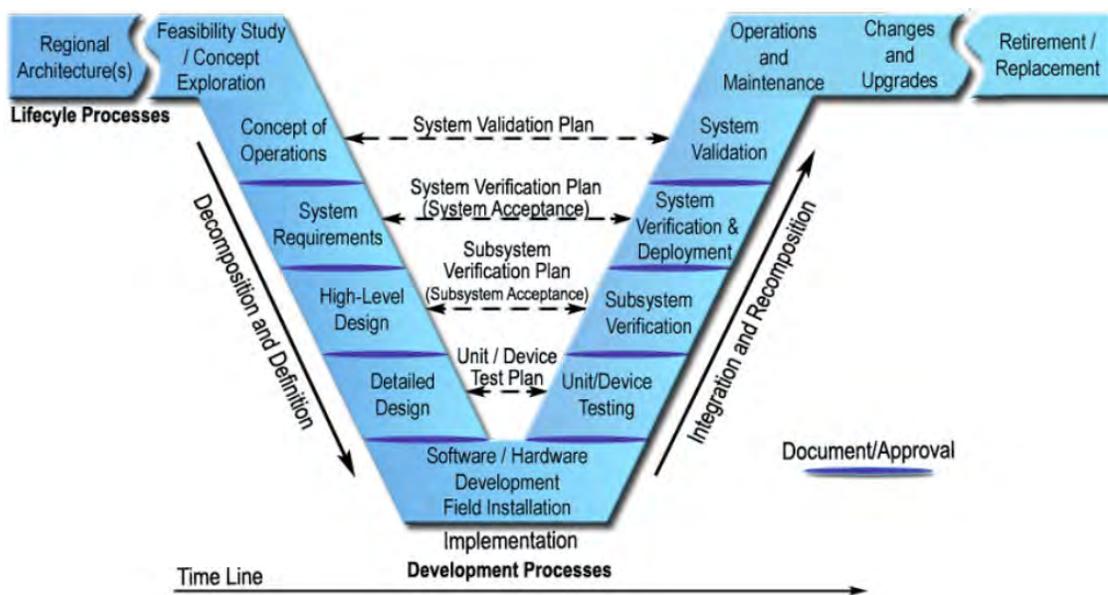


Figura 3-1. Metodología en V [1].

Esta sección resume la aplicación de la metodología mostrando los pasos principales del proceso de desarrollo. Debido a que la metodología parte de un problema a solventar, el desarrollo del sistema propuesto parte del caso de monitorización de la cadena de frío, que es una aplicación ideal para el uso de tecnología RFID, aprovechando ventajas como: escalabilidad, bajo consumo de energía y economía. El framework se plantea como cualquier sistema general para IoT, compuesto por dispositivos sensores (etiquetas RFID con sensores embebidos), gateways recolectores de datos (compatibles con tecnología RFID del ISO 18000-6C [4]) y una plataforma online, que sirve como interfaz con el usuario final.

3.1. Concepto operacional

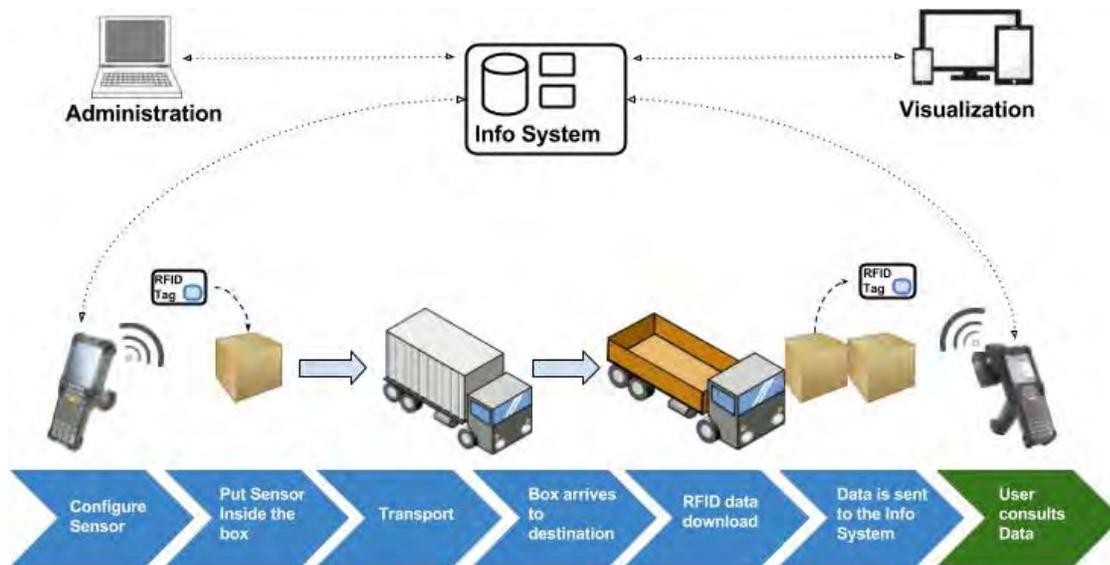


Figura 3-2. Concepto operacional.

La figura 3-2 ilustra de manera general el concepto operacional del sistema dentro del caso de monitorización de la cadena de frío en el transporte de alimentos, que, de hecho, ya implementa tecnología RFID en los procesos de logística. Como primera instancia, se configura la etiqueta RFID antes de ser adherida al producto a monitorizar. Con la etiqueta adherida al producto, se empieza el proceso de registro de temperaturas que se hace cada determinado tiempo y durante todo el recorrido. En el punto de llegada, se descarga los datos almacenados en la memoria de usuario de la etiqueta RFID. Esta información es procesada y enviada al sistema de información, desde donde el usuario puede consultar los datos de temperatura asociados a cada etiqueta, verificando así si se cumple o no con los rangos permitidos.

3.1.1. Roles de usuario

El sistema a desarrollar tiene como usuarios finales a los agentes involucrados en la monitorización de la cadena de frío, que interactuarán con el sistema a través de la interfaz gráfica o sistema de información. Se diferencian dos roles principales de usuario:

Administración: Desde donde se podrá configurar y sincronizar los dispositivos sensores y los gateways, además de agregar y eliminar usuarios.

Visualización: Abierto al público general que desee consultar los datos de determinado sensor y acceder a las gráficas de históricos. Será necesario validarse para poder acceder.

La pagina de visualización de datos mostrará, a través de una gráfica, las mediciones obtenidas de las etiquetas RFID, donde se especificará información sobre fecha, etiqueta asociada y el tipo de medida.

3.1.2. Regulaciones y normas

En España, de acuerdo al ministerio de agricultura, pesca, alimentación y medio ambiente [51], se establece las disposiciones aplicables a la conservación, almacenamiento y transporte en dos documentos principales:

- Decreto 2484/1967, del 21 de septiembre, por el que se aprueba el texto del Código Alimentario Español.
- Reglamento 37/2005 de la Comisión, del 12 de enero de 2005, relativo al control de las temperaturas en los medios de transporte y los locales de depósito y almacenamiento de alimentos ultracongelados destinados al consumo humano.

Donde se establece que el almacenamiento y transporte de alimentos perecederos deberá cumplir las condiciones de temperatura y humedad relativa adecuadas a la naturaleza específica de cada alimento. Además, el reglamento 37/2005 de la Comisión establece que a partir del 1 de enero de 2006, todos los instrumentos de medición utilizados para controlar temperatura deben cumplir las normas establecidas en los estándares europeos EN 12830, EN 13485 y EN 13486 [52] .

En Colombia, de acuerdo al ministerio de salud, la reglamentación vigente relacionada al tratamiento de alimentos está organizada en regulación sanitaria general y regulación específica [53] .

- Regulación sanitaria general de alimentos y bebidas para consumo humano, por la cual se dictan medidas sanitarias.
- Regulación específica, dependiendo del tipo de producto. Ejemplo: frutas y hortalizas - resolución 1155 de 2014, derivados cárnicos - decreto 2131 de 1997. Una lista completa de la regulación puede ser vista en [54].

Las regulación colombiana en el área de cadena de frío depende del producto en cuestión, por lo cual no existe una regulación global respecto al tema. Sin embargo, basándose en los hallazgos encontrados por la organización Proexport Colombia [55] se pueden extraer los

requisitos que las tecnologías aplicadas a monitorización de cadena de frío deben cumplir.

- Los aparatos de medición de temperatura deben tener una precisión de ± 0.5 °C.
- Deben tener un rango de medición comprendido entre -30 °C y 20 °C.
- Los instrumentos de medición deben contar con un certificado de calibración válido.

Proexport Colombia, afirma además, que en el caso colombiano, existen vacíos legales para el control y seguimiento en el expendio y comercialización de productos perecederos, acompañado, de una deficiente supervisión y vigilancia por parte de las autoridades de salud y los proveedores en los puntos de venta. Por lo cual, se evidencia la necesidad de un sistema que gestione todas las operaciones logísticas, desde la toma de pedidos, pasando por la recepción, almacenamiento, carga, transporte y punto de venta. El contar con un software completo y con personal calificado y capacitado, potenciaría el cumplimiento de la cadena de frío en los alimentos que produce el país. El requerimiento principal de este sistema es que pueda llevar un registro y control permanente de las temperaturas de los productos a lo largo de toda la cadena de abastecimiento [56].

3.2. Identificación de requisitos

La identificación de requisitos es una parte crucial dentro de cualquier proyecto de desarrollo, puesto que el sistema será evaluado teniendo como criterio el cumplimiento de los mismos.

3.2.1. Requisitos generales del sistema

Protocolo y estándar: el protocolo que implementarán los sensores en la capa de percepción esta definido en el estándar ISO 18000-6C, también conocido como EPC gen 2 (segunda generación). Se implementa en la banda de 900 MHz en comunicaciones RFID de larga distancia.

Comunicación inalámbrica: los lectores RFID extraen la información que es procesada por el gateway antes de ser enviada al sistema de información haciendo uso de la red de Internet. En este punto es indiferente la tecnología sobre la cual se implemente la conexión a Internet, siempre y cuando se garantice su disponibilidad.

Operación stand-alone: los gateways deben contar con conexión a Internet fiable que no produzca ninguna pérdida de información. Además, deben operar de manera autónoma, configurando, extrayendo, empaquetando y enviando la información de las etiquetas. Por otro

lado, los dispositivos sensores, una vez configurados, deben ser capaces de operar sin la ayuda de agentes externos. Es decir, deben operar de manera autónoma y confiable, guardando los datos de mediciones internamente.

Autonomía energética: para ser económicamente viable y brindar mas comodidad al usuario final, la batería de los dispositivos sensores debe durar un mínimo de 1 año.

Memoria interna: para ser suficiente, la memoria interna de los dispositivos sensores debe almacenar la información necesaria que permita interpretar las condiciones de los productos monitorizados.

Rangos de operación (temperatura): si bien los rangos de temperatura dependen de cada aplicación, basándose en la regulación y el estudio de dispositivos similares, se estima que el rango de temperatura en que debe funcionar el sensor, debe estar comprendido entre -30 y 40 °C. Por su parte los gateways RFID son contemplados para funcionar en ambientes interiores (indoor), es decir, en temperaturas comprendidas entre 5 y 40 °C.

Interfaz de usuario: el sistema debe contar con una interfaz de usuario que facilite la consulta y descarga de datos relacionados al proceso de medición. Para ello, se debe disponer de una base de datos que almacene de forma segura la información recolectada. Este sistema debe facilitar además la gestión y el manejo de los recursos asociados al mismo, es decir, gestión de gateways, etiquetas RFID y usuarios.

3.2.2. Requisitos específicos del dispositivo sensor

Para que los dispositivos sensores presenten practicidad para el usuario y quepan en los contenedores en que se transportan (usualmente alimentos o medicamentos), se establece los siguientes criterios respecto a dimensiones, peso, distancia de descarga de datos de la interfaz RFID, etc.

Dimensiones: 8 cm x 5 cm x 0.7 cm máximo

Peso: 120 gramos máximo

Precisión de medidas: ± 0.5 °C

Rango de medidas: -30 a 40 °C

Distancia de lectura (Interfaz RFID): 0.1 a 6 metros ó mayor (con línea de vista)

Velocidad de descarga de datos: 10 segundos máximo

Autonomía energética: 1 año mínimo

3.3. Arquitectura propuesta

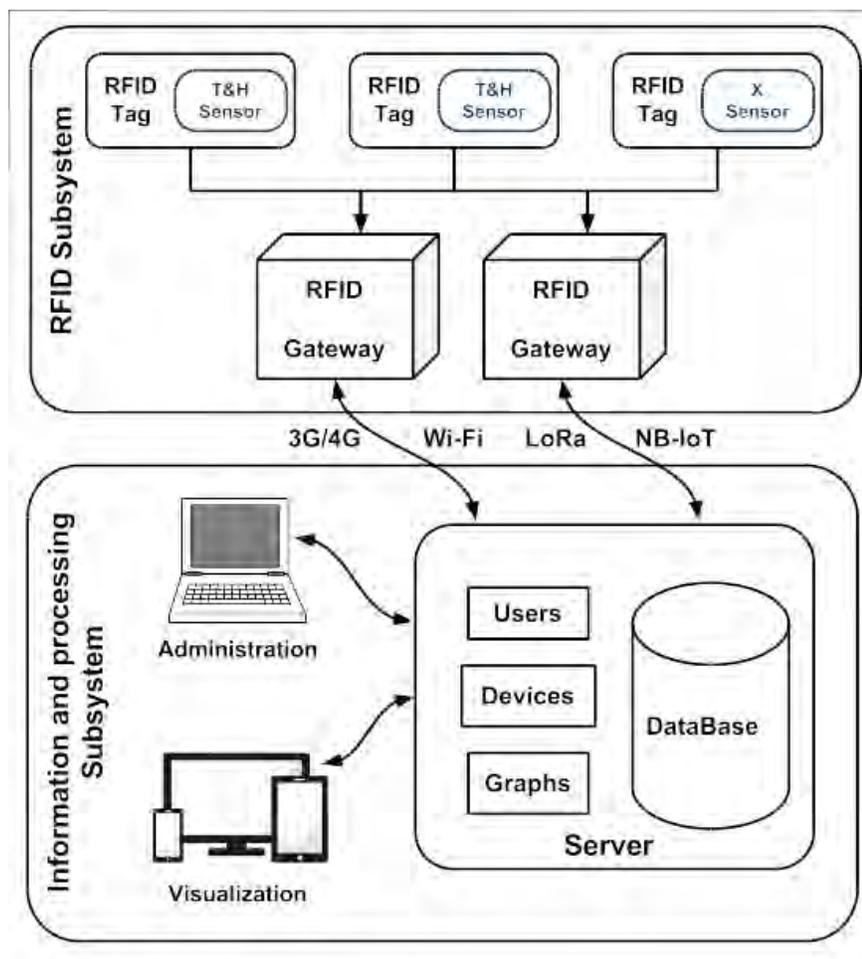


Figura 3-3. Arquitectura general del sistema.

La figura 3-3 muestra la arquitectura del sistema propuesto, en esta se puede diferenciar 3 componentes principales:

Dispositivos sensores: conformados por la unión de una etiqueta RFID y un sensor, cuentan además con un microcontrolador, un sistema de alimentación y toda la electrónica necesaria. Los datos serán extraídos del sensor por el microcontrolador, que los almacenará en la memoria de usuario del chip RFID, cada determinado tiempo.

Gateways RFID: este dispositivo extrae los datos de las etiquetas RFID, los procesa y los envía al sistema de información. Contará con un módulo lector RFID para comunicarse con la etiquetas, un sistema embebido para procesar los datos, y un subsistema de comunicaciones para su conexión a Internet, que puede implementar tecnología Wi-Fi, 3G/4G, LoRa o

NB-IoT.

Sistema de Información y Administración: el sistema de información es el encargado de recibir los datos de los gateways y almacenarlos en una base de datos para su posterior procesamiento y presentación, de acuerdo a los servicios que se desee implementar. Desde él se podrá gestionar los gateways y los dispositivos sensores.

3.4. Plan de validación

El plan de validación se realiza teniendo en cuenta el proceso habitual descrito en la figura 3-2, en colaboración con el Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos para el Desarrollo de la Universitat Politècnica de València, en la monitorización de las temperaturas de calabaza troceada, en los procesos de: almacenamiento, transporte y puesta en venta.

Tabla 3-1. Rampas de temperatura para la calabaza troceada.

Etapa	Temperatura (°C)	Tiempo (días)
Cámara	4.0	7.0
Transporte	7.0	1.0
Punto de venta	4.0	7.0
Consumidor	7.0	7.0

La tabla 3-1 muestra las rampas de temperatura típicas para este producto. La calabaza troceada tiene un tiempo de caducidad de 22 días desde el momento en que es envasado. A continuación, se describe el procedimiento que se llevará a cabo durante la validación:

1. **Configuración inicial de la etiqueta:** al adherir la etiqueta RFID al producto, esta deberá ser configurada y activada pasando cerca del gateway RFID, donde se fijarán parámetros como: fecha de inicio, tiempos de grabación y rangos de tempera máximos y mínimos, dependiendo del tipo de aplicación.
2. **Depositar el sensor en el contenedor:** el sensor es adherido al producto a monitorizar.
3. **Proceso logístico:** el proceso logístico comprende las etapas de almacenamiento, transporte, puesta en venta y hogar del consumidor (estos dos últimos establecidos para el caso de estudio). Durante este tiempo, la etiqueta tomará las medidas cada determinado tiempo y las almacenará en la memoria del chip RFID.
4. **Final del proceso logístico:** al final de las cuatro etapas descritas en la tabla 3-1 la etiqueta se pasa cerca del gateway para ser leída por el lector RFID.

5. **Descarga de los datos de la etiqueta:** accediendo a la memoria de usuario del chip, el lector RFID extrae los datos de temperatura asociados a la etiqueta.
6. **Procesamiento y envío de los datos al Sistema de información:** los datos son interpretados por el sistema de procesamiento interno del gateway, que los empaqueta en un formato determinado y los envía por la red de Internet disponible hacia el sistema de información.
7. **Visualización de los datos:** los datos del sensor son consultados en la plataforma web, por medio de gráficos que describen a los datos descargados de cada etiqueta.

3.5. Diseño y desarrollo

La metodología en V establece un proceso de diseño top-down, donde se empieza con la definición de la arquitectura del sistema general y se parte en bloques más pequeños o subsistemas. En este caso, se identificaron 3 componentes principales del sistema: dispositivos sensores, gateways y sistema de información.

El proceso de diseño se divide en dos: diseño de alto nivel y diseño de bajo nivel. En el diseño de alto nivel se describe cada componente en términos de su funcionalidad y desempeño, especificando las interfaces entre sistemas externos y otros componentes. El punto crucial aquí es asegurar el cumplimiento de los requisitos previamente identificados. En el diseño de bajo nivel se crea especificaciones de diseño. Para el Hardware se define los esquemáticos junto con la lista de componentes. Para el Software se describe los algoritmos y los bloques UML o bloques orientados a objetos, según sea el caso [1].

El diseño de alto nivel parte de la definición del concepto operacional (figura 3-2), la arquitectura del sistema (figura 3-3), y la identificación de requisitos. La figura 3-4 muestra el diseño de alto nivel del sistema completo, entrando en detalle sobre los protocolos implementados entre los subsistemas principales.

Los dispositivos sensores, compuestos por una etiqueta RFID con un sensor embebido, se comunicarán con el gateway implementando tecnología RFID bajo el estándar ISO 18000-6C [4]. El gateway y el sistema de información se comunicarán a través de Internet, implementando tecnología Wi-Fi ó GPRS, lo que asegurará una conexión continua y de buena velocidad al ejecutar el firmware contenido en el sistema embebido del gateway. A continuación, se desglosa el diseño de alto y bajo nivel de cada uno de los 3 subsistemas, así como su implementación final y sus pruebas de verificación.

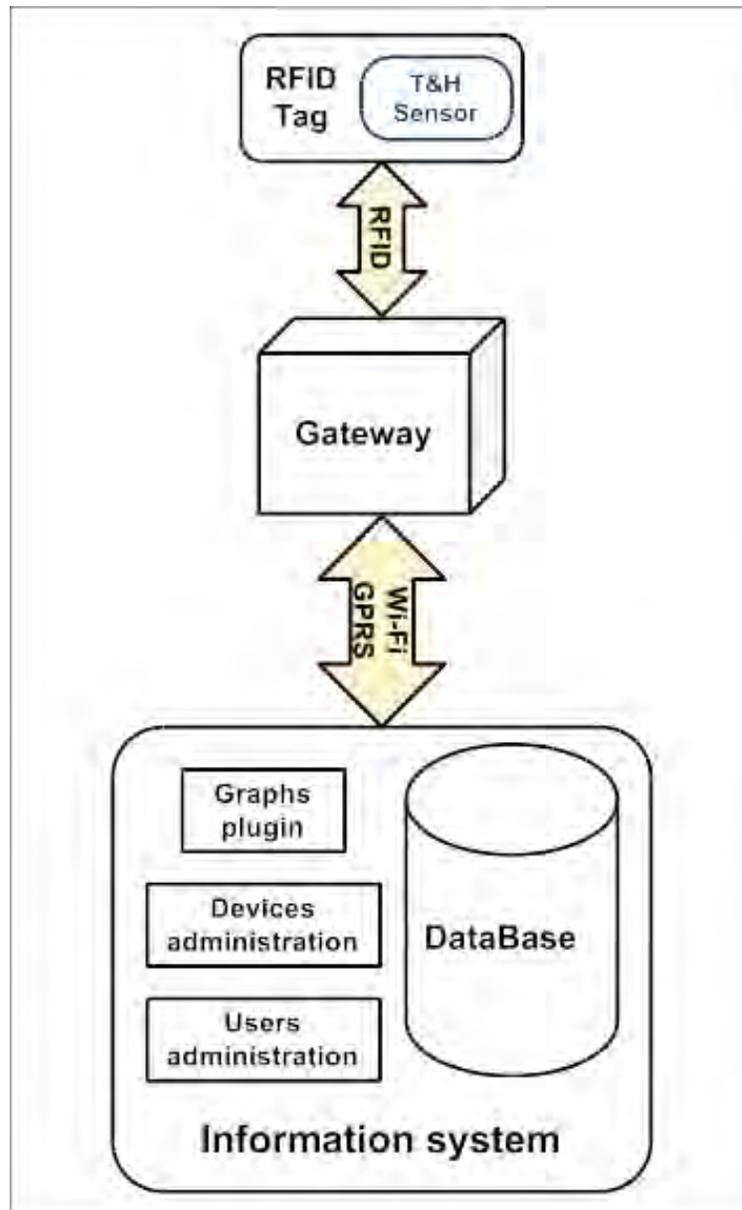


Figura 3-4. Subsistemas e interfaces.

3.5.1. Dispositivos sensores

El dispositivo sensor, también llamado “etiqueta inteligente”, se encarga de tomar las medidas y almacenarlas en la memoria ROM del chip RFID. La figura 3-5 presenta la arquitectura de este dispositivo y los protocolos de comunicación entre sus componentes. Se diferencian 5 elementos principales: microcontrolador, sensor, etapa de potencia, chip RFID y antena.

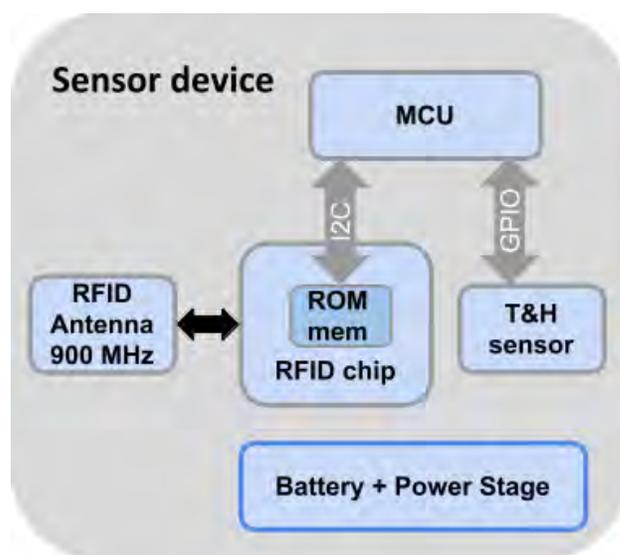


Figura 3-5. Arquitectura de los dispositivos sensores.

El desarrollo inicial se basa en un prototipo, descrito a continuación, que se diseñó teniendo en cuenta la reducción de los tiempos de desarrollo, para cumplir con el cronograma propuesto y ser aplicado en las pruebas de validación del sistema. Sin embargo, una vez validado el sistema, se generó un segundo diseño, esta vez teniendo en cuenta costos de fabricación y minimización del consumo de energía, rentabilizando de esta manera su producción en masa. El esquemático de dicho diseño y la estimación de costos se muestran en el anexo A.

Prototipo

La figura 3-6 muestra el prototipo de la etiqueta inteligente. La tabla 3-2 describe los componentes utilizados en su diseño. Las figuras 3-7 y 3-8 muestran el esquemático y el PCB, respectivamente.

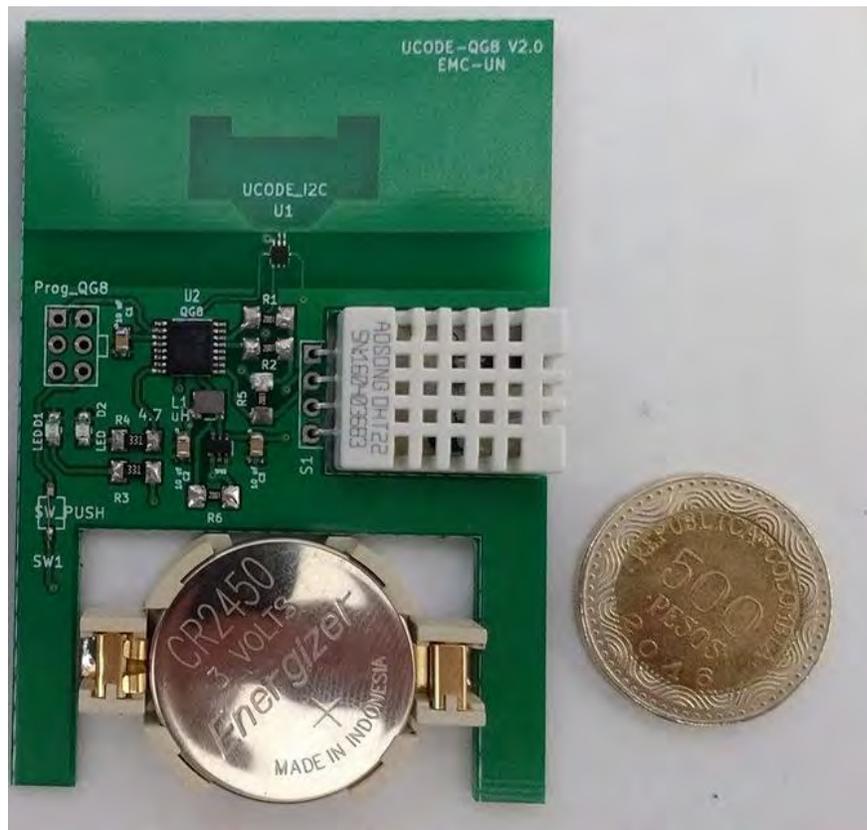


Figura 3-6. Prototipo de etiqueta inteligente.

Tabla 3-2. Componentes del prototipo

Componente	Referencia	Características
MCU	MC9S08QG8	20 MHz HCS08 CPU 8Kbytes FLASH, 512 bytes RAM Periféricos: ADC, I2C, SCI, SPI, KBI.
Chip RFID	SL3S4011	ISO 18000-6C compatible 160-bit memoria EPC, 96-bit memoria TID 3328-bit memoria de usuario I2C Interface (100 - 400 kHz)
Sensor	DTH22	3.3 V - 5.5 V Puero Serial de datos (bidireccional) Precisión: ± 1 °C
Elevador de voltaje	TPS61221	90 % eficiencia 5 uA de corriente de fuga
Batería	CR2450	3 V , 620 mAh

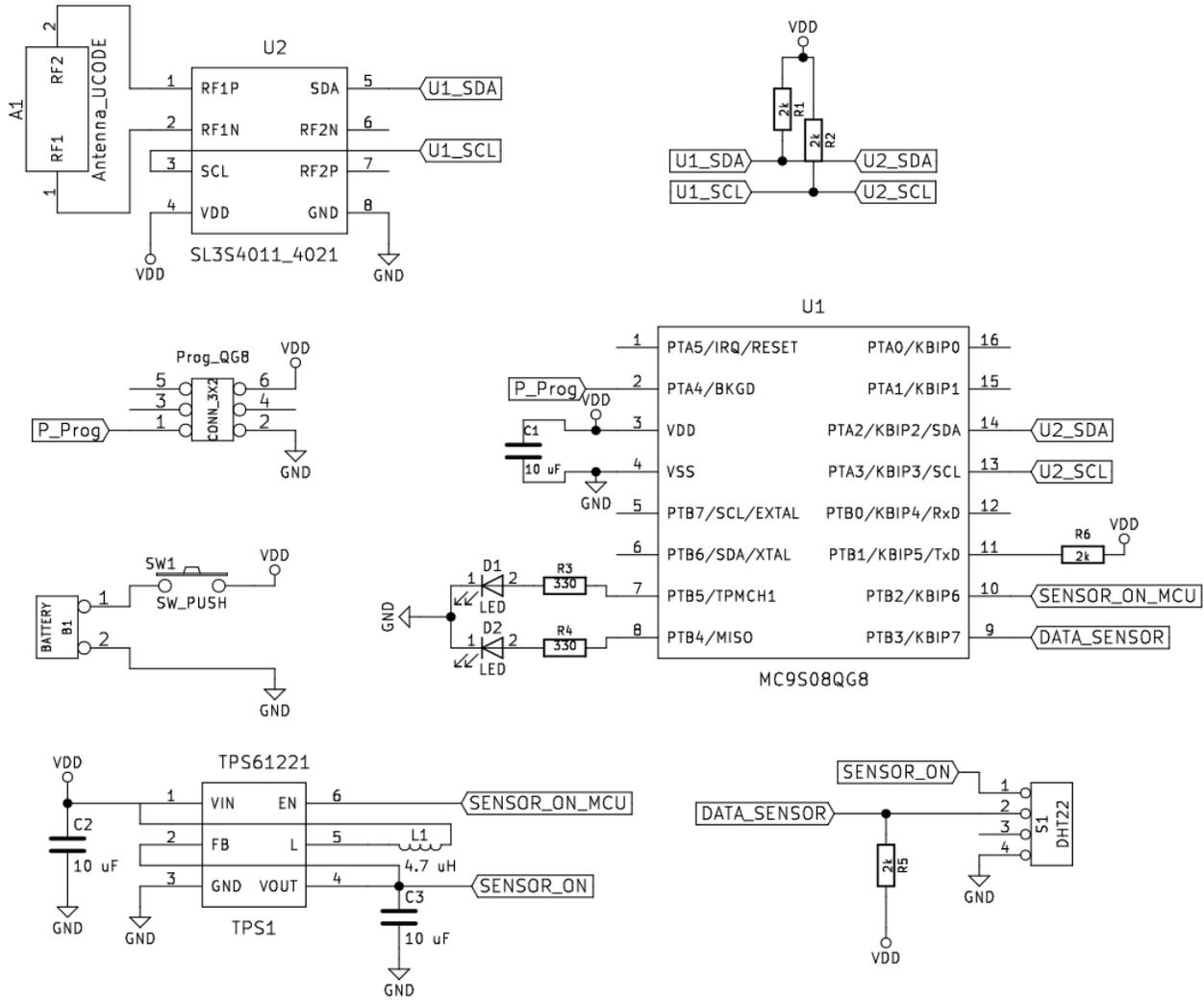


Figura 3-7. Esquemático del prototipo.



Figura 3-8. PCB del prototipo.

El prototipo de etiqueta inteligente es un producto liviano, de tamaño reducido y de operación stand-alone, ideal para las pruebas de validación. Cuenta con una autonomía energética estimada de un año y es completamente compatible con el estándar ISO 18000-6C. Estas son sus especificaciones:

Dimensiones: 7.5 cm x 5 cm x 1.5 cm

Peso: 30 gramos

Precisión de medidas: ± 1 °C (Garantizado por el fabricante)

Rango de operación (temperatura): -30 a 60 °C

MCU: -40 a 80 °C

Sensor: -40 a 80 °C

Chip RFID: -40 a 85 °C

Elevador de voltaje: -40 a 80 °C

Batería: -30 a 60 °C

Memoria interna : 416 bytes

Diseño de la antena

El diseño de la antena para el chip RFID fue extraído la nota de aplicaciones del fabricante [3], donde se describe diseños de referencia para el chip UCODE I2C de NXP, para implementación en PCB. Adicionalmente, la nota de aplicaciones brinda instrucciones para la conexión de las líneas de la interfaz I2C del chip.

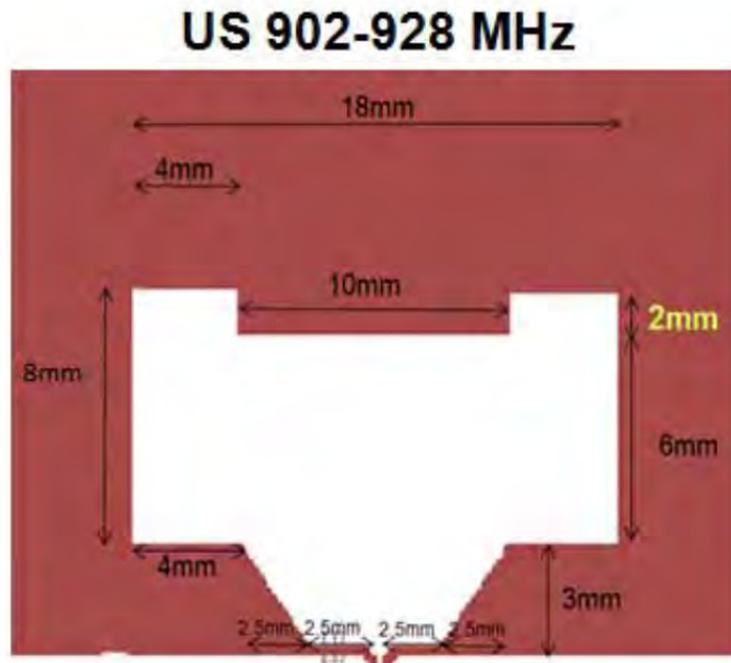


Figura 3-9. Dimensiones de la antena de referencia [3].

La figura 3-9, extraída de la nota de aplicaciones [3], muestra las dimensiones de la antena implementada en el prototipo. La sección de 2 mm resaltada en amarillo constituye la medida de sintonización (tuning) de la frecuencia de la antena, correspondiente a 2 mm para la banda de 902 a 928 MHz para Colombia, Estados Unidos y Asia, o 5 mm para la banda de 865.6 a 867.6 MHz para Europa.

La figura 3-10, extraída de la nota de aplicaciones [3], muestra la distancia de lectura (en metros) sobre el espectro de frecuencias de 840 MHz a 960 MHz para la antena de referencia. La línea azul muestra la distancia de lectura para dimensiones exteriores máximas de la antena (80x45 mm), la línea negra muestra la distancia de lectura para la misma antena pero con dimensiones exteriores mínimas (30x20 mm). La antena implementada en el prototipo tiene unas dimensiones exteriores de 50x20 mm con lo que se espera que su distancia de lectura máxima sea superior a 8 metros.

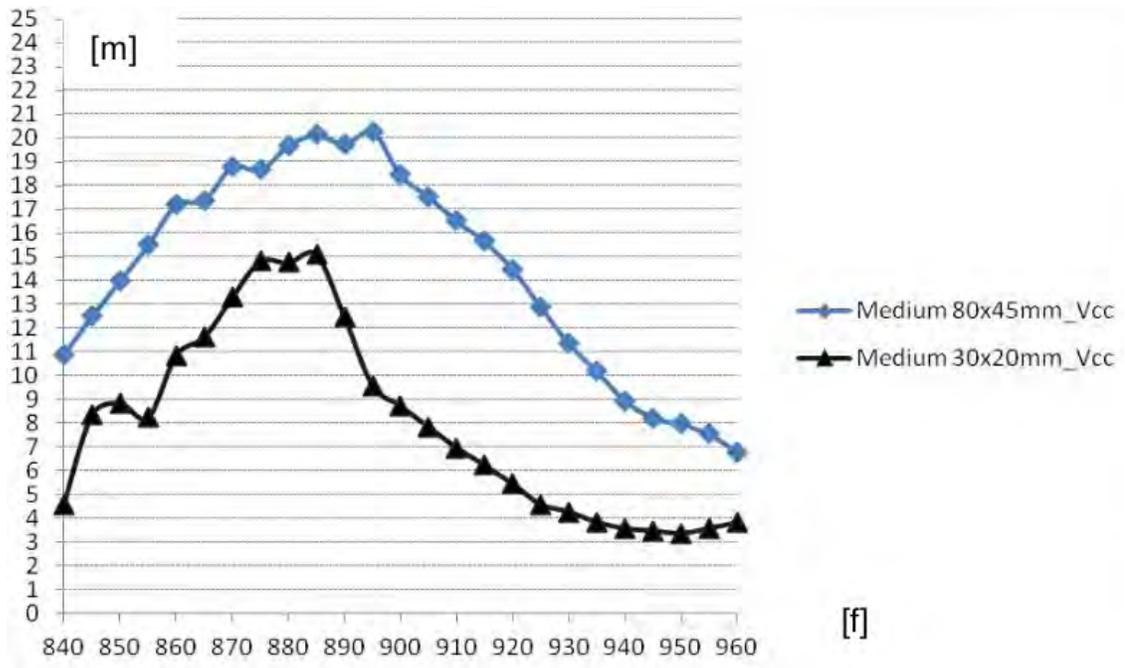


Figura 3-10. Distancias de lectura en metros para el diseño de referencia [3].

Funcionamiento

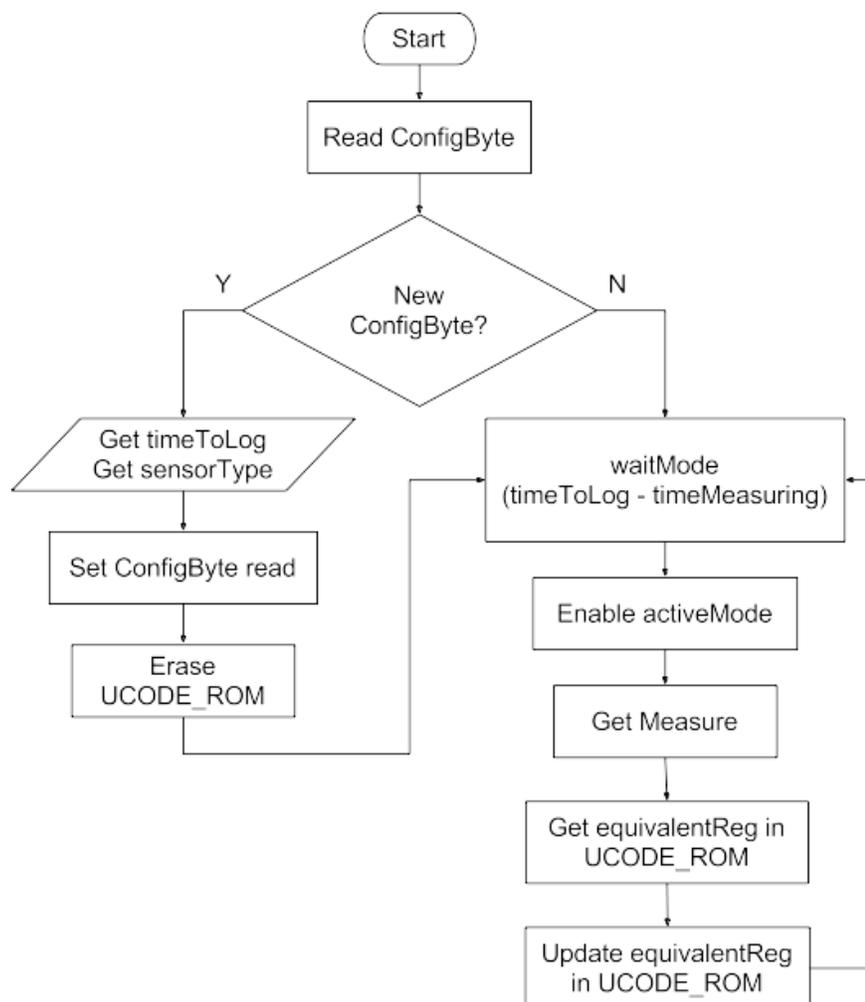


Figura 3-11. Diagrama de flujo del funcionamiento del dispositivo sensor.

La figura **3-11** ilustra el algoritmo del funcionamiento de las etiquetas inteligentes. Su funcionamiento se fundamenta en dos estados, estado de espera (`waitMode`) y estado activo (`activeMode`). En estado de espera el dispositivo entra un modo de mínimo consumo reduciendo su frecuencia de operación interna y apagando sus periféricos. Cada determinado tiempo (5, 15, 30 o 60 minutos) el dispositivo despierta, toma la medida de temperatura correspondiente y la almacena en la memoria de usuario del chip RFID.

Para que el dispositivo pueda ser configurado antes de empezar el proceso de registro de temperatura, se implementó un esquema de byte de configuración (figura **3-12**), utilizando el primer byte de la memoria de usuario del chip RFID. La tabla **3-3** describe el funcionamiento de cada campo.

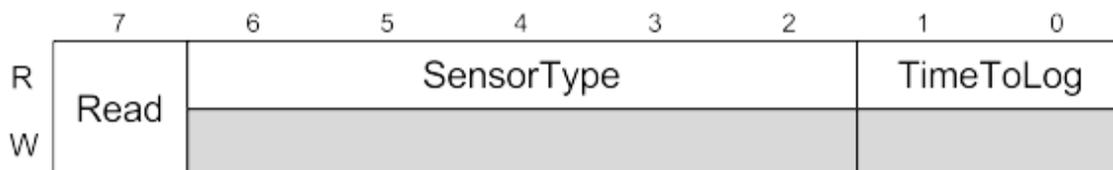


Figura 3-12. Byte de configuración del dispositivo sensor.

Tabla 3-3. Campos del byte de configuración del dispositivo sensor.

Campo	Descripción
7 Read	Read: Establece si el byte de configuración ya ha sido leído o no. 0 Nuevo byte de configuración 1 Byte de configuración antiguo
6:2 SensorType	SensorType: Establece el tipo de sensor del cual tomar medidas. 00000 Temperatura 00001 Humedad 00010 Vibración
1:0 TimeToLog	TimeToLog: Tiempo entre cada medición. 00 5 minutos 01 15 minutos 10 30 minutos 11 60 minutos

Gestión de la memoria del chip RFID

Para masificar el uso de la tecnología RFID, esta se ha enfocado en reducir los costos de producción de sus etiquetas, aspecto que ha limitado ciertas características de esta tecnología. Debido a que las etiquetas deben funcionar con la limitada energía que les llega del interrogador y generar una respuesta de vuelta, características como memoria o complejidad del protocolo han sido optimizadas al máximo.

El mapa de memoria, descrito en la figura 3-13, pertenece al estándar ISO 18000-6C [4], es de tamaño reducido y está organizada en 4 bancos: EPC, TID, memoria reservada y memoria de usuario. El TID es el número de identificador único de cada etiqueta, no se repite incluso entre diferentes fabricantes. El EPC puede ser modificado por el usuario, asociando el esquema de numeración que desee implementar, este es el número que primero emite la etiqueta cuando es interrogada, siendo el que menos consumo de energía presenta y más distancia de comunicación alcanza (hasta 12 metros con línea de vista). La memoria reservada almacena contraseñas y otro tipo de registros propios del protocolo. La memoria de usuario es opcional y puede ser utilizada a voluntad.

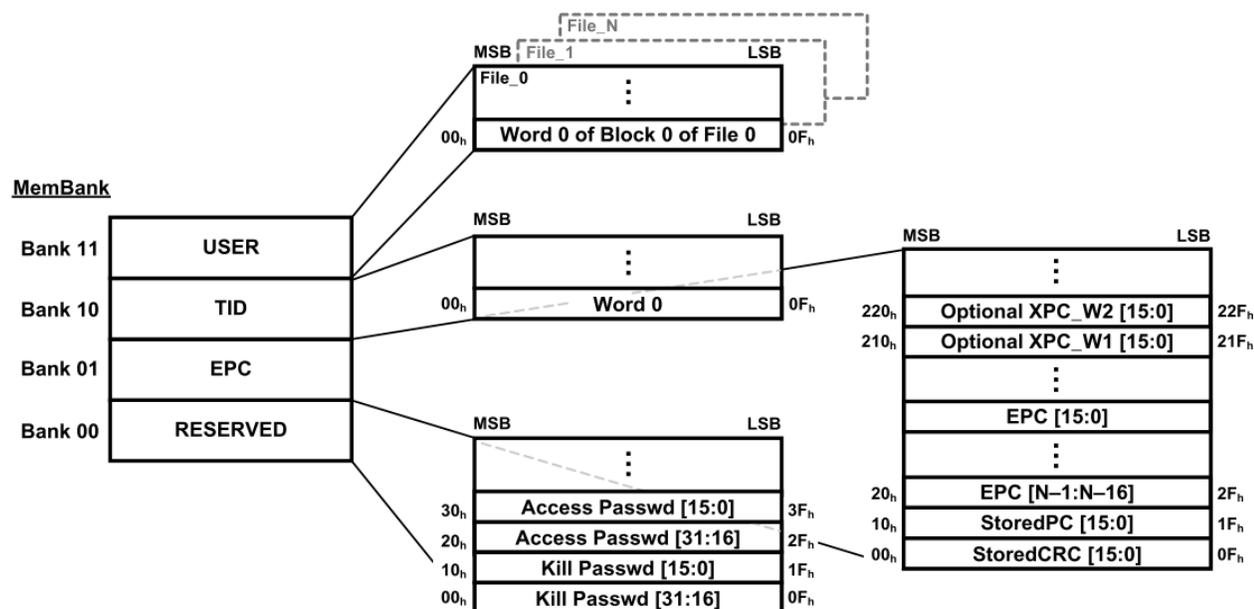


Figura 3-13. Mapa lógico de memoria del chip RFID [4].

El chip RFID utilizado (SL3S4011 de NXP [57]) cuenta con una memoria de usuario de 416 bytes que puede ser escrita o leída desde la interfaz I2C o RFID. Data loggers típicos para aplicaciones de monitorización de temperatura cuentan generalmente con tamaños de memoria de varios kilobytes, lo que no se compara con la reducida memoria del chip RFID. Sin embargo, si se descarta información de la marca de tiempo de cada muestra y se lleva a cabo una cuenta del tiempo total que el sensor fue expuesto a ciertos valores de temperatura, la información resultante puede caber sin ningún problema dentro de la memoria de usuario del chip RFID.

Pruebas de consumo de energía

El consumo de energía es un punto clave en el diseño de las etiquetas inteligentes. Uno de los requisitos establece autonomía energética de un año. Según las hojas de datos de los diferentes elementos, la tabla 3-4 presenta los valores de consumo para condiciones extremas para el microcontrolador (85 °C) y condiciones normales de operación para los demás elementos (25 °C). La tabla 3-5 presenta los valores de consumo obtenidos en el laboratorio, utilizando un multímetro digital de alta precisión (Agilent 34405A) y bajo condiciones normales de temperatura (25 °C).

Tabla 3-4. Consumo de corriente teórico del prototipo.

Componente	Referencia	Consumo (mA) modo activo	Consumo (mA) modo espera
MCU	MC9S08QG8	3.500	0.035
Chip RFID	SL3S4011	0.040	0.010
Sensor	DTH22	0.750	0.010
Elevador de Voltaje	TPS61221	0.005	0.005
	TOTAL	4.295	0.060

Tabla 3-5. Consumo de corriente real del prototipo.

Componente	Referencia	Consumo (mA) modo activo	Consumo (mA) modo espera
MCU	MC9S08QG8	3.700	0.052
Chip RFID	SL3S4011	0.040	0.007
Sensor	DTH22	1.480	0.060
Elevador de Voltaje	TPS61221	0.005	0.005
	TOTAL	5.225	0.124

Como se puede observar en las tablas **3-4** y **3-5**, las corrientes registradas en el laboratorio son, en la mayoría de casos, superiores. Esto se debe principalmente a que la tensión considerada en las hojas de datos es de 3.3 V, mientras que la tensión a la que se hicieron las pruebas de laboratorio fue fijada en 3 V. Ya que el dispositivo está contemplado para funcionar con una batería de 3 V.

Según las hojas de datos de los diferentes dispositivos, las corrientes de consumo aumentan cuando se aumenta la temperatura, por encima de la temperatura ambiente (25 °C). En el caso de temperaturas menores a la temperatura ambiente, las hojas de datos sugieren que los dispositivos presentan consumos de corriente menores. Ya que las etiquetas inteligentes están diseñadas para operar en cadena de frío, se considera que los consumos serán incluso menores a los registrados en la tabla **3-5**.

La figura **3-14** muestra el perfil de consumo de corriente del dispositivo completo, para una tensión de entrada de 3 voltios. Cuando está activo el dispositivo consume 5.23 mA y cuando está en modo espera consume 0.12 mA. Los tiempos T1 y T2 corresponden con los tiempos en modo activo y modo espera, respectivamente. El dispositivo tarda 2 segundos (T1) en tomar una medida y almacenarla en la memoria del chip RFID, el resto es el tiempo de espera que dependiendo de la aplicación puede ser ajustado entre 5, 15, 30 y 60 minutos (T2). Para la batería de 620 mAh, la duración estimada se presenta en la tabla **3-6**.

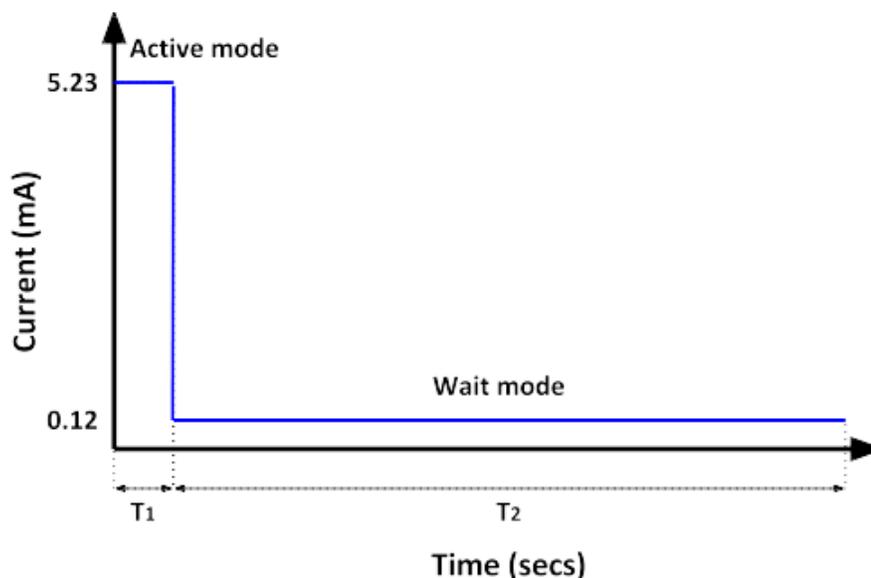


Figura 3-14. Perfil de consumo del dispositivo sensor.

Tabla 3-6. Duración estimada de una batería de 620 mAh.

Logging-time (min)	Teóricos (meses)	Reales (meses)
5	9.8	5.6
15	12.4	6.6
30	13.3	6.9
60	13.8	7.0

Uno de los requisitos establece que la batería de las etiquetas inteligentes debe tener una duración de mínimo un año, aspecto que se busca cumplir en el diseño planteado para producción en masa (anexo A). En cualquier caso, con los resultados obtenidos, se puede empezar con las pruebas de validación del framework IoT desarrollado.

3.5.2. Gateways RFID

El gateway RFID es la puerta de acceso o pasarela del subsistema de RFID con Internet. Es compatible con la tecnología RFID, bajo el estándar ISO 18000-6C, e implementa módulos de comunicación Wi-Fi o de telefonía celular 2G/3G, para acceder a la red. Este dispositivo extrae la información de las etiquetas RFID, la encapsula y la envía al sistema de información. La figura 3-15 muestra la arquitectura del gateway.

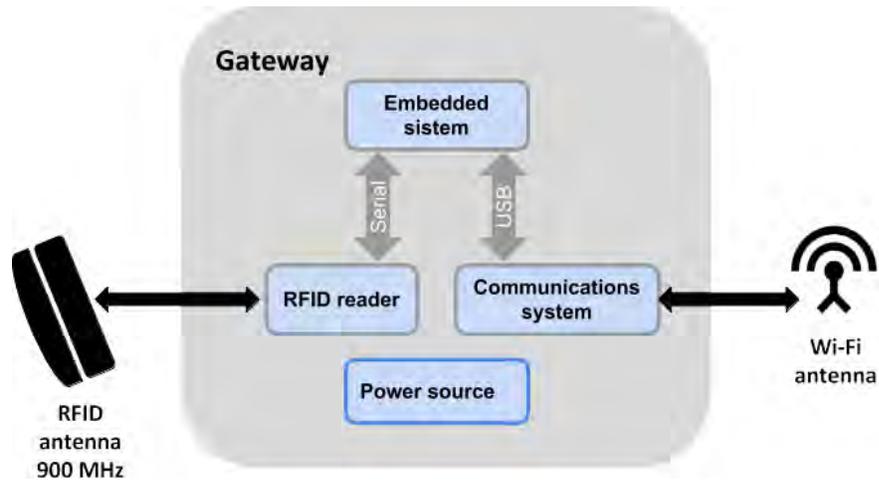


Figura 3-15. Arquitectura del gateway RFID.

Prototipo

La figura 3-16 muestra el prototipo del gateway desarrollado. La tabla 3-7 muestra los elementos que lo componen. A continuación, se describe cada uno de sus componentes y se justifica su elección.



Figura 3-16. Prototipo del gateway RFID.

Tabla 3-7. Componentes del prototipo del gateway RFID.

Componente	Referencia	Características
Lector RFID	ThingMagic M6e	Protocolo: EPCglobal UHF Class 1 Gen 2. ISO 18000-6C Frecuencia: 902-928 MHz Potencia Tx: 5-31.5 dBm Interfaces : Serial, USB
Sistema embebido	BeagleBone Black rev C	Procesador: AM335x 1 GHz ARM Cortex-A8 RAM: 512 MB FLASH: 4 GB Interfaces: Serial, USB, Ethernet, SPI.
Sistema de comunicaciones	Wi-Fi dongle	Chip: Realtek 8192cu Interfaz: USB 2.0 Velocidad: 300 Mbps Estandar: IEEE 802.11b/g/n
Fuente de alimentación	XP POWER ECP60UD01	Voltaje: 5 y 12 V Corriente máxima: 5 y 3 A
Antenna	Harting RF-ANT-WR30-EU	Ganancia: 8.5 dBic Frecuencia (EU): 865-870 MHz Frecuencia (US): 902-928 MHz Angulo de apertura: 69 ° Protección: IP 65

El lector RFID ThingMagic M6e es un dispositivo compacto que cumple con el estándar ISO 18000-6C. Está basado en el procesador Indy R2000 y es capaz de entregar hasta 1 Watt de potencia de transmisión, cuenta con interfaces de comunicación SPI, serial y un API (Application Program Interface) con códigos fuente de acceso libre (escritos en JAVA, C# y C) suministrado por el fabricante.

El sistema de procesamiento BeagleBone Black es un dispositivo robusto y ampliamente utilizado en aplicaciones industriales. Está respaldado por la comunidad de desarrolladores de software y hardware libre. Es capaz de ejecutar diferentes distribuciones del sistema operativo Linux, constituye la herramienta perfecta para ejecutar el API del lector RFID y realizar el procesamiento de la información extraída de las etiquetas. Cuenta con diferentes puertos seriales, I2C, SPI, GPIO, USB y HDMI. Brinda compatibilidad completa con el dongle WIFI basado en el chip RTL 8192cu.

La fuente de alimentación seleccionada tiene salidas de 12 y 5 Voltios capaces de entregar hasta 3 y 5 Amperios de corriente máxima, respectivamente. Provee la potencia necesaria

para alimentar el sistema embebido y el lector RFID, cuyos consumos típicos (en estado activo) son de 0.5 y 2 Amperios, respectivamente.

Por último, la antena RFID cuenta con una ganancia de 8.5 dBic, es compatible con frecuencias de 865-870 MHz para la Unión Europea y 902-928 MHz para Estados Unidos y América, Colombia en particular. Cuenta con un ángulo de apertura de 69 °C y protección IP-65, lo que la hace resistente a las condiciones típicas medioambientales.

A continuación, se mencionan las especificaciones para este dispositivo:

Dimensiones: 25 cm x 20 cm x 6 cm

Peso: 500 gramos

Rango de operación (temperatura): 0 a 50 °C

Tecnologías soportadas: RFID(ISO 18000-6C), Wi-Fi, Celular 2G/3G

Protección: IP-65

Voltaje (AC) de entrada: 220 - 110 V

Funcionamiento

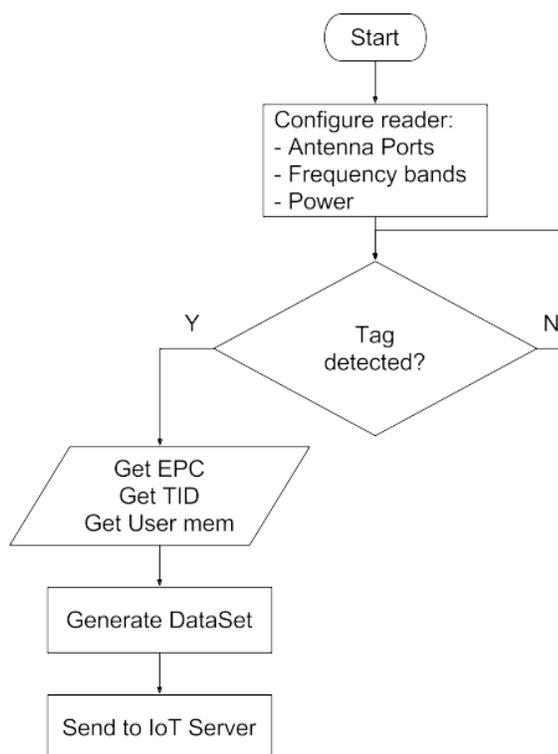


Figura 3-17. Diagrama de flujo del funcionamiento del gateway RFID.

La figura **3-17** muestra el algoritmo del código implementado sobre las funcionalidades del API (de uso libre) que provee el fabricante, más conocida como mercury API. Esta consigue abstraer todas las funciones de bajo nivel del lector RFID, funciones que lidian con el protocolo de bajo nivel o protocolo LLRP (Low Level Reader Protocol).

Gracias al API se consigue extraer la información del chip RFID, particularmente el EPC (Electronic Product Code), el TID (Tag Identification) y la memoria de usuario (User Memory) que guarda toda la información de sensado. Esta herramienta brinda además la posibilidad de interactuar con otras funcionalidades del protocolo RFID, como: lectura masiva de etiquetas, modificación de EPC, configuración de potencia y selección de banda de frecuencias del lector RFID.

3.5.3. Sistema de Información y Administración

El sistema de información recibe las peticiones entrantes de los gateways RFID, interpreta la información y la almacena en la base de datos, donde queda disponible para su posterior consulta y procesamiento. Este sistema sistema provee además opciones de gestión y administración de recursos, así como también de visualización. La figura **3-18** presenta la arquitectura de este sistema. La figura **3-19** muestra la interfaz de usuario desarrollada.

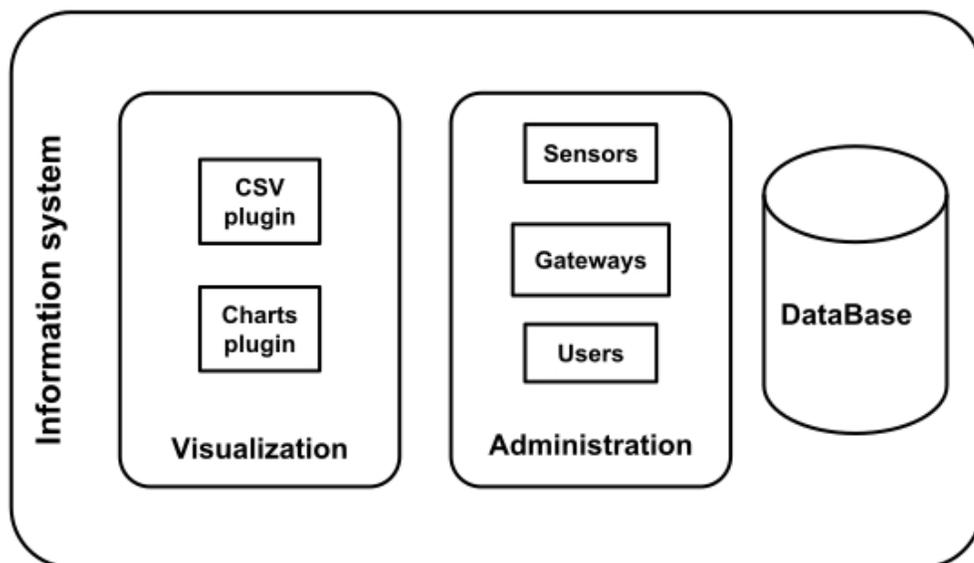


Figura 3-18. Arquitectura del Sistema de Información.

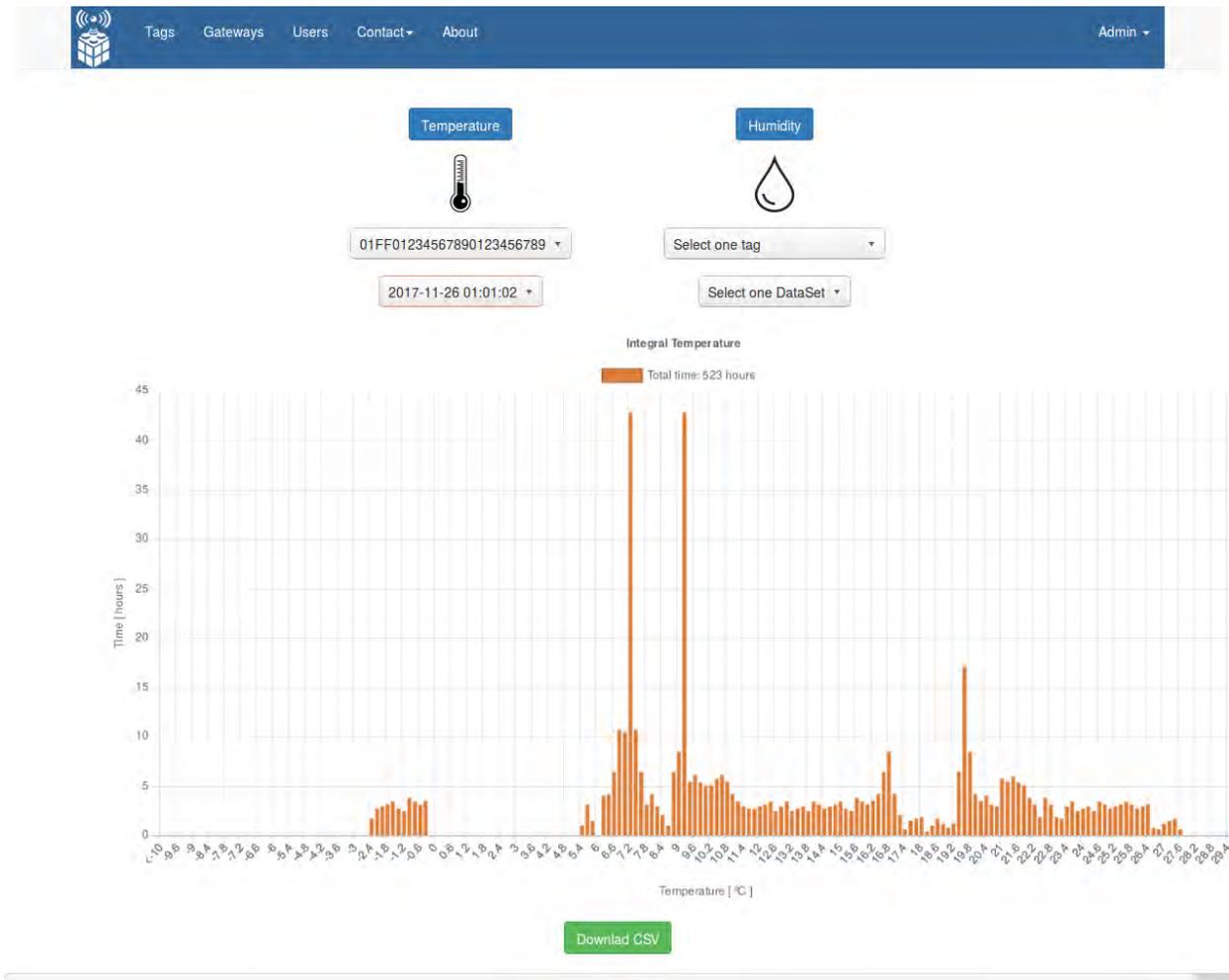


Figura 3-19. Visualización de la Pagina Web.

El diseño del sistema de información se dividió principalmente en funciones de back-end y front-end.

En el back-end (figura 3-20), desarrollado principalmente en MySQL y PHP7, se monta la base de datos, creada a partir del modelo relacional de la figura 3-22. Donde se diferencia 3 componentes principales: gateways, tags, y users. Las funciones de back-end implementadas en PHP7 dan soporte a la creación y gestión de los diferentes componentes en la base de datos, así como también soportan el manejo sesiones de usuario y peticiones para almacenamiento de datos, provenientes de los gateways.

En el front-end (figura 3-21) se implementa la parte de visualización de la pagina web. Haciendo uso de CSS, JavaScript, HTML y jQuery para hacer la página mas dinámica e interactiva. Se implementa además, librerías desarrolladas en JavaScript para realizar los gráficos de los datos y para descargar su equivalente CSV.

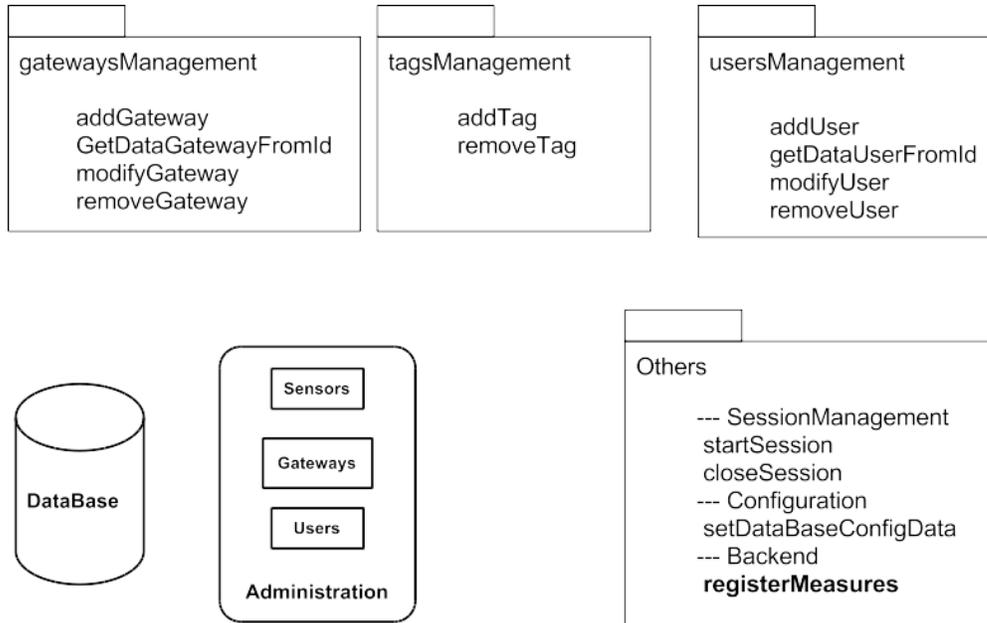


Figura 3-20. Funciones de back-end.

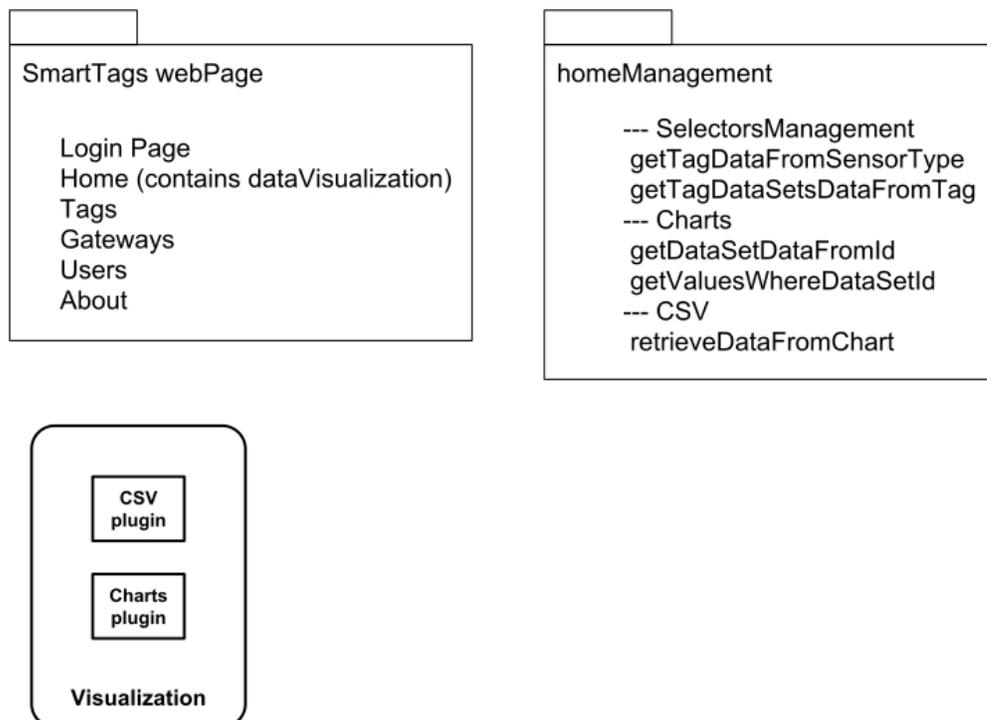


Figura 3-21. Funciones de front-end.

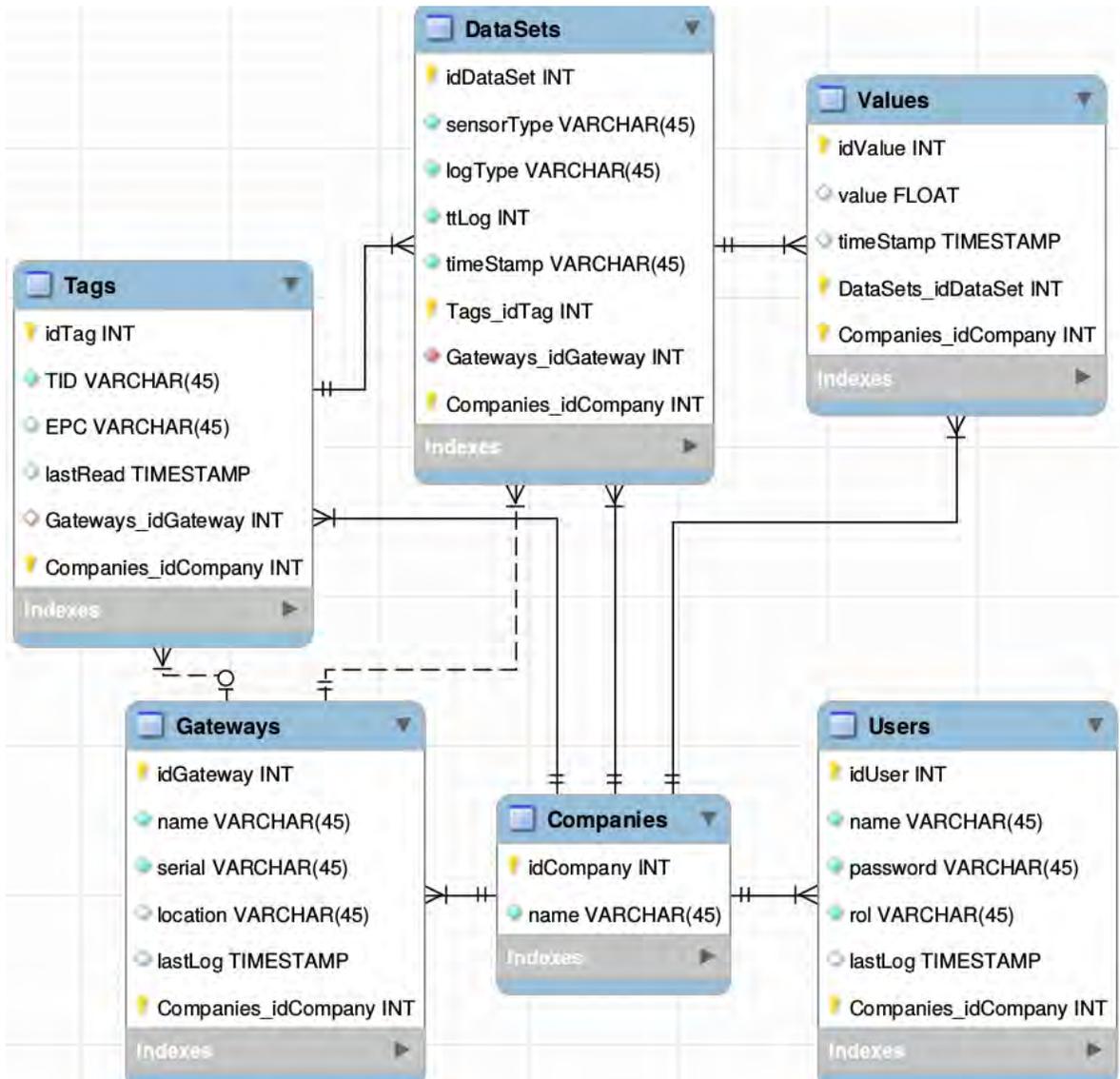


Figura 3-22. Base de datos relacional.

3.6. Evaluación de requisitos

De acuerdo a la metodología en V, antes de empezar con las pruebas de validación, se debe corroborar el cumplimiento de los requisitos definidos en la sección 3.2. A continuación, se evalúa el cumplimiento de los requisitos y se propone alternativas para los requisitos aún no cumplidos.

3.6.1. Evaluación de requisitos generales del sistema

Protocolo y estándar: Cumplido. El sistema es compatible con la tecnología RFID estandarizada bajo la norma ISO 18000-6C. Las etiquetas implementan dicha tecnología gracias al chip SL3S4011 de NXP [57], integran una antena impresa en el PCB, que funciona a 900 MHz, y cuyo diseño se tomó de la nota de aplicaciones del fabricante. Por su lado, el gateway utiliza el lector RFID ThigMagic M6e, capaz de operar en los rangos de frecuencias: 865-870 MHz para la Unión Europea y 902-928 MHz para Estados Unidos y América, Colombia en particular.

Comunicación inalámbrica: Cumplido. El gateway puede implementar múltiples tecnologías de comunicación inalámbrica para conectarse a la red de Internet. En el prototipo se soportan dos: Wi-Fi y telefonía celular (2G/3G). Adicionalmente, aprovechando la versatilidad del sistema operativo, que corre sobre el sistema de procesamiento (BeagleBone Black), se puede dar soporte a otras tecnologías, como: Bluetooth, Zig-Bee, etc.

Operación stand-alone: Cumplido. Los gateways operan automáticamente, extrayendo los datos de las etiquetas, empaquetandolos y enviandolos al sistema de información. La conexión a Internet es gestionada por el sistema operativo, que se conecta de forma automática, una vez la red Wi-Fi es configurada, asegurando su estabilidad. Por otro lado, las etiquetas inteligentes también funcionan automáticamente, son configuradas al inicio del proceso de monitorización y son desactivadas cuando llegan al punto de entrega, su funcionamiento es completamente autónomo e independiente del resto del sistema.

Autonomía energética: Parcialmente cumplido. El desarrollo del prototipo de etiqueta inteligente demuestra un mínimo de 5 meses de autonomía energética, en la versión de producción (anexo A) se espera superar los 12 meses y reducir costos de producción.

Memoria interna: Cumplido. Como se explica en la sección 3.5.1 (Gestión de la memoria del chip RFID), el método de mapeo de memoria utilizado, descarta información sobre la marca de tiempo de cada muestra y guarda la cuenta total sobre el tiempo que el sensor fue expuesto a ciertos rangos de temperatura, lo cual asegura que las etiquetas inteligentes puedan funcionar con el limitado espacio de memoria que disponen (416 bytes).

Rangos de operación (temperatura): Cumplido. Las etiquetas inteligentes funcionan en el rango de temperaturas comprendido entre -30 y 60 °C, lo que posibilita su uso en variedad de aplicaciones. Por otra parte, el gateway RFID opera en el rango de 0 a 50 °C, lo cual asegura su operación en ambientes interiores (indoor).

Interfaz de usuario: Cumplido. El sistema de información implementa funciones de con-

sulta, visualización y almacenamiento de datos, permite además la gestión de gateways, etiquetas y usuarios. Adicionalmente, permite descargar las medidas asociadas a cada etiqueta, para que el usuario las pueda manipular a conveniencia.

3.6.2. Evaluación de requisitos específicos del dispositivo sensor

Los dispositivos sensores, se conciben como dispositivos livianos y de tamaño reducido, pensados para aplicaciones relacionadas a la monitorización de la cadena de frío en alimentos. Se considera que su tamaño debe ser similar al de un carnet o tarjeta de crédito. A continuación, se presenta las especificaciones del prototipo desarrollado.

Dimensiones: 7.5 cm x 5 cm x 1.5 cm

Peso: 94 gramos

Precisión de medidas: ± 1 °C (Garantizado por el fabricante)

Rango de medidas: -30 a 60 °C

Distancia de lectura (Interfaz RFID): 0.05 a 8 metros (con línea de vista)

Velocidad de descarga de datos: 8 segundos

Autonomía energética: 5 meses

Comparando con los requisitos para las etiquetas inteligentes, se observa que el prototipo desarrollado no satisface los requisitos de dimensiones, precisión y autonomía energética. Por lo cual se propone un segundo diseño, mostrado en el anexo A, que busca reducir costes de producción y satisfacer dichas especificaciones.

4. Validación del sistema

La validación del sistema propuesto se llevó a cabo en la monitorización de la cadena de frío, en colaboración con el Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos para el desarrollo de la Universitat Politècnica de València. El sistema propuesto fue aplicado haciendo un estudio previo sobre la tecnología en los sistemas de trazabilidad disponibles en este ámbito. A continuación, se introduce el concepto clave de trazabilidad y las tecnologías utilizadas por estos sistemas, posteriormente se presenta las pruebas de validación.

4.1. Trazabilidad en la industria alimenticia

La actual economía globalizada ha cambiado la industria alimenticia aumentando la distancia que los alimentos viajan desde el productor hasta el consumidor, trayendo muchos desafíos relacionados con la trazabilidad de los alimentos. Escándalos relacionados con los cultivos modificados genéticamente, la encefalopatía espongiforme bovina (enfermedad de las vacas locas), o el brote de Salmonella y Escherichia coli han aumentado las preocupaciones de los consumidores sobre la calidad de los alimentos y la transparencia sobre sus orígenes [58]. Mantener la calidad e integridad de los alimentos durante toda la cadena de suministro y prevenir el brote de enfermedades son algunas de las principales preocupaciones en esta industria [59].

Trazabilidad comprende dos conceptos bien diferenciados en inglés, *tracing* y *tracking*. *Tracing* se refiere a determinar los orígenes y características de un determinado producto (upstream path), mientras que *tracking* se refiere a seguir el rastro de un producto a lo largo de la cadena de suministro (downstream path). Trazabilidad puede ser definida como una parte del manejo logístico, donde se captura, almacena y transmite información adecuada acerca del producto en todas las etapas de la cadena de suministro, de forma que los stakeholders puedan ejercer un control de seguridad y calidad sobre sus productos en cada una de las etapas [60, 61].

4.1.1. Tecnología en sistemas de trazabilidad

El surgimiento de nuevas tecnologías como smartphones, IoT o computación en la nube, están cambiando rápidamente la industria alimentaria. El acceso a Internet a través de los smartphones volvió la industria alimentaria más orientada hacia el consumidor, ya que los clientes pueden acceder fácilmente a la información de los productos. Además, gracias a las redes sociales, las quejas de los clientes se pueden volver virales, afectando la imagen de las empresas. Regulaciones establecidas por los gobiernos han forzado a las compañías a proveer información sobre productos modificados genéticamente y sus orígenes, ya que ahora los consumidores están más alerta de los orígenes y el manejo de sus alimentos [59].

Para cumplir con estas normativas, las empresas de alimentos han implementado sistemas de trazabilidad basados en diversas tecnologías. Sistemas de códigos de barras impresos son ampliamente utilizados y gracias a su bajo costo pueden ser encontrados en toda la cadena de suministro [62, 59]. Otras tecnologías más recientes como RFID y NFC han tenido gran aceptación, ya que proveen ventajas de automatización sobre los sistemas de etiquetado basados en papel [63, 64]. Otras técnicas como: Análisis de Isotopos, DNA barcoding, o espectroscopia infrarroja se enfocan en el análisis de la composición química de los alimentos. Sin embargo, son demasiado costosas para ser aplicadas en pruebas de rutina, pero son útiles en escenarios de falsificación y verificación [65]. Adicional a esto, se han propuesto sistemas conceptuales, que se enfocan en el tratamiento de la información obtenida de las diferentes tecnologías, como el TraceFood Framework [66] o el Food Track and Trace Ontology (FTTO) [67]. Existen además múltiples estudios que buscan aplicar estos sistemas conceptuales en escenarios reales [68, 69, 70, 8, 9, 71]. El desafío de estos sistemas consiste en superar las barreras económicas y lograr una exitosa transferencia tecnológica de las empresas de tecnología hacia las empresas de alimentos, con el fin de aprovechar todo su potencial.

A pesar, de que estas tecnologías han logrado solucionar muchos de los problemas, existe aún una falta de estudios que muestren una implementación efectiva de estos sistemas. Algunas de sus barreras más fuertes son económicas, ya que no se percibe retorno de inversión, y problemas de interconexión, que se presentan entre sistemas de diferentes proveedores de tecnología. Haciendo uso del framework IoT desarrollado se propone un sistema de trazabilidad basado en tecnología RFID (ISO 18000-6C [4]) con capacidades de sensado, que permite además la interconexión con diferentes sistemas ya que fue desarrollado siguiendo un paradigma IoT, haciendo la información accesible a todos los stakeholders.

4.2. El sistema propuesto: Orbis Traceability System

El sistema de trazabilidad propuesto, mostrado en la figura 4-1, hace uso de una plataforma IoT, basada en computación en la nube, desplegada en Google App Engine. Esta plataforma

es un producto patentado y fue inicialmente desarrollado en el 2014, por la Universidad Nacional de Colombia, en el marco del proyecto "Plataforma para el Control Inteligente Vehicular (PCIV)" [72], con el fin de obtener estadísticas relacionadas al transporte público en Colombia. En el 2016, en un proyecto en conjunto con la Agencia Nacional del Espectro (ANE), la plataforma fue ampliada y aplicada a la monitorización de Radiación No Ionizante [10], con el fin de regular el uso del espectro electromagnético en Colombia. Como un spin-off de este trabajo, nació ORBIS, una plataforma inalámbrica de sensores basada en IoT y computación en la nube.

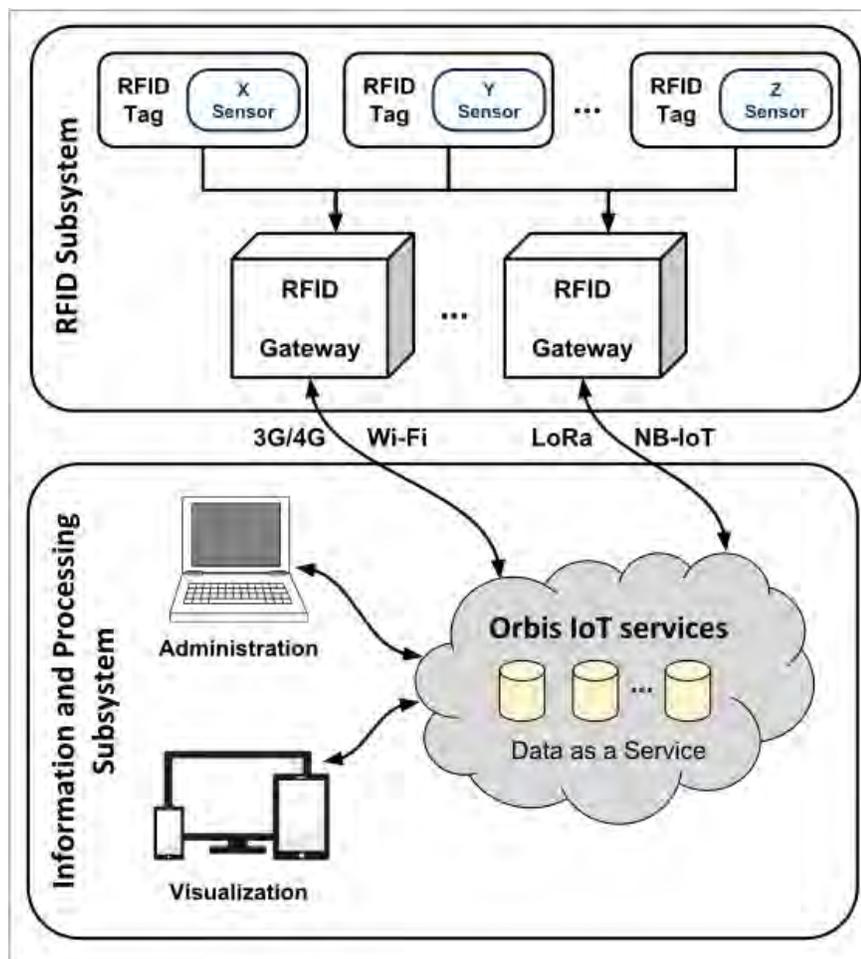


Figura 4-1. Arquitectura de Orbis Traceability System.

La plataforma IoT, mostrada en la figura 4-2, está compuesta por dos subsistemas principales, conocidos como IoT middleware y DaaS middleware. El IoT middleware se encarga de manejar todas las peticiones (entrantes y salientes) de los subsistemas de medición conectados a la plataforma, mientras que el DaaS middleware es el encargado del intercambio de información con las aplicaciones de consulta. El esquema de Datos como Servicio (Data As

a Service [73]) es un punto clave en este sistema, ya que todo el esquema de cobro se basa en este concepto. La interconexión con ambos sistemas se hace posible gracias a la definición de un API (Application Programming Interface), que establece el intercambio de información por medio de formatos JSON establecidos.

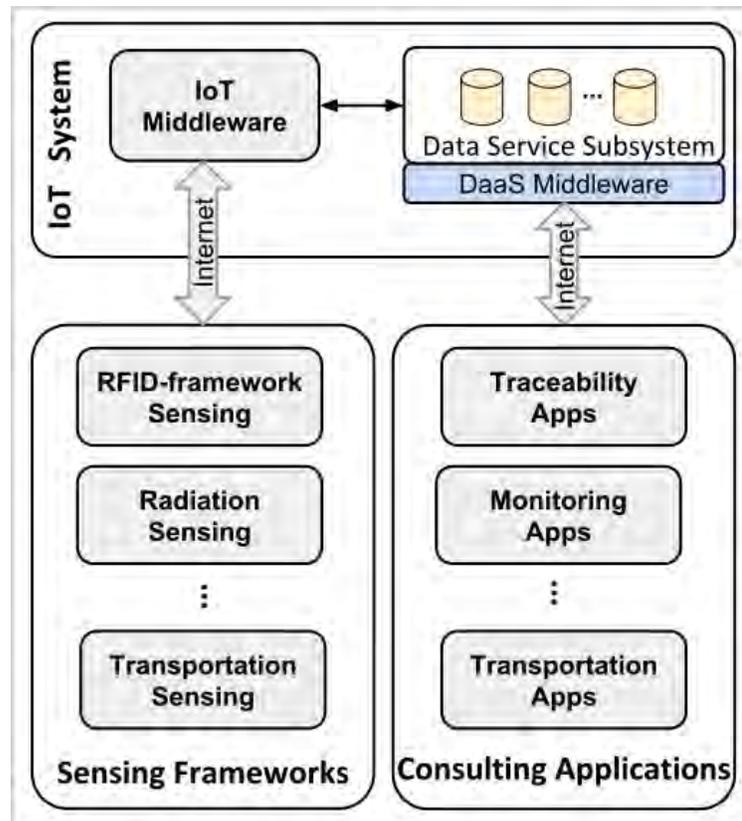


Figura 4-2. Plataforma IoT desplegada en la nube.

Las principales funcionalidades de la plataforma IoT son:

- Recibir y verificar información enviada por gateways y sensores, previamente registrados.
- Proveer servicios de gestión de sistemas de medición y aplicaciones de consulta.
- Interpretar, clasificar y almacenar la información entrante.
- Garantizar privacidad e integridad de los datos así como auto escalabilidad de las bases de datos, siguiendo el modelo de almacenamiento de Google Datastore - BigTable.
- Prevenir ataques de inyección SQL y denegación de servicio.

4.3. Pruebas de validación

Las pruebas de validación se hicieron con el apoyo del Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos para el Desarrollo de la Universitat Politècnica de València, en la monitorización de temperaturas para dos productos diferentes; calabaza troceada y naranjas. Los datos obtenidos de la etiquetas son validados comparándolos con los datos obtenidos de un data logger comercial calibrado, Testo 174H.

El desarrollo de las pruebas se realizó siguiendo el esquema de operación mostrado en la figura 4-3. Para empezar se adhiere la etiqueta inteligente al producto y se realiza un escaneo inicial, donde se configuran parámetros como: tiempo de muestreo, rangos, EPC de la etiqueta, entre otros. El dispositivo sirve como una etiqueta RFID normal durante todo el proceso de almacenamiento y transporte, y al mismo tiempo toma medidas cada determinado tiempo y las almacena en la memoria de usuario del chip RFID. En el punto de llegada la información de sensado es extraída por un lector RFID convencional, compatible con el ISO 18000-6C. Finalmente, la información extraída es enviada al sistema de información, donde es accedida y tratada a conveniencia.

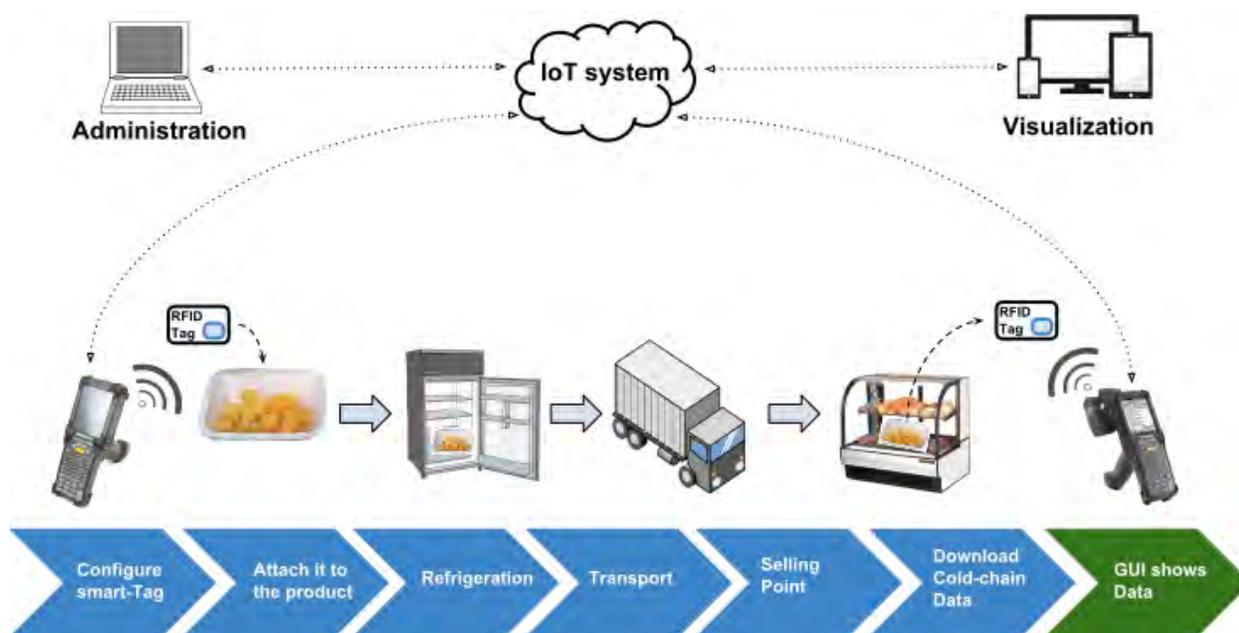


Figura 4-3. Esquema de operación de las pruebas de validación.

4.3.1. Monitorización de temperatura en calabaza troceada

La figura 4-4 muestra las pruebas realizadas en calabaza troceada. Este experimento tuvo una duración de 22 días, donde, en un ambiente de laboratorio, se simulaban condiciones

ambientales para 4 etapas diferentes: cámara, transporte, punto de venta y consumidor.



Figura 4-4. Pruebas con calabaza troceada.

La tabla 4-1 muestra las rampas de temperatura típicas para este producto, en cada una de las cuatro etapas. La calabaza troceada tiene un tiempo de caducidad de 22 días desde el momento en que es envasado. En las etapas de cámara y punto de venta, la temperatura promedio es de 4 °C, mientras que en las etapas de transporte y hogar del consumidor, se espera obtener una temperatura promedio de 7 °C.

Tabla 4-1. Rampas de temperatura para la calabaza troceada.

Etapa	Temperatura (°C)	Tiempo (días)
Cámara	4.0	7.0
Transporte	7.0	1.0
Punto de venta	4.0	7.0
Consumidor	7.0	7.0

Resultados

La figura 4-5 muestra los resultados extraídos de las etiquetas inteligentes al final del experimento. El eje X muestra los valores de temperatura registrados y el eje Y (en escala logarítmica) muestra el tiempo total para cada uno de estos valores. Se observa que la mayor concentración de datos se encuentra al rededor de 4 y 7 °C, mientras hay unos valores considerables entre 12 y 18 °C.

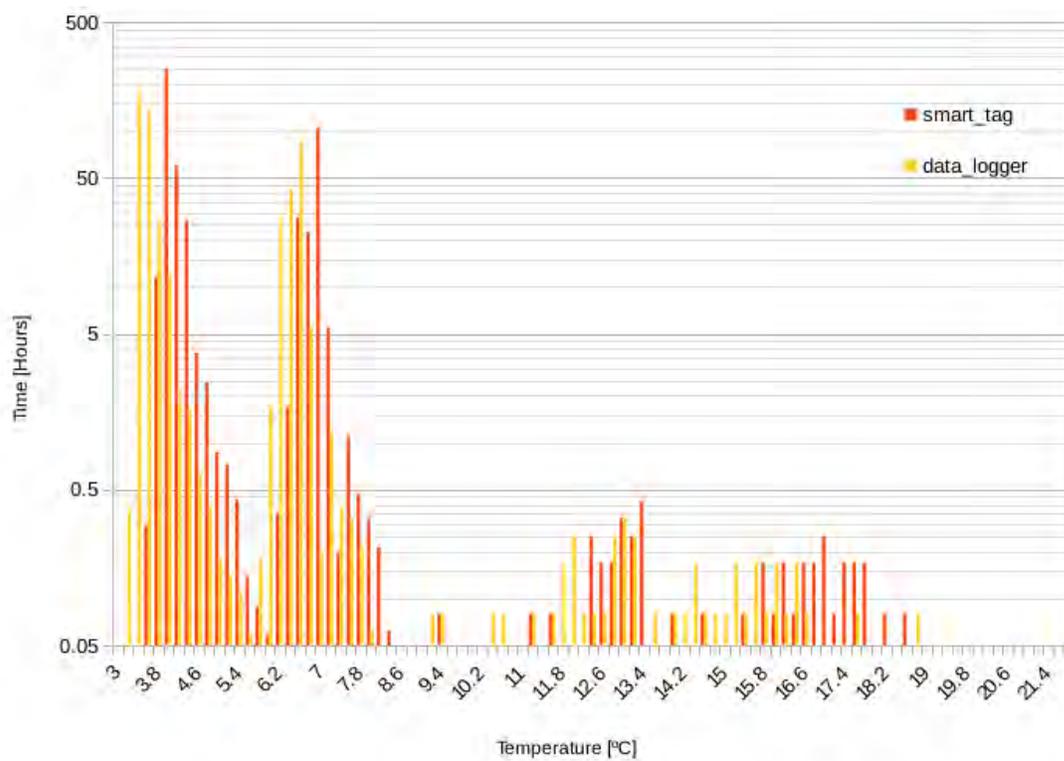


Figura 4-5. Temperatura registrada en calabaza troceada.

A partir de la figura 4-5 se puede extraer información sobre el tiempo total al que el sensor estuvo expuesto a ciertos rangos temperatura. La tabla 4-2 muestra dicha información.

Rango de temperatura (°C)	Tiempo total
3.2 - 5.6	14.96 días
5.8 - 8.4	6.86 días
9 - 22.4	3.99 horas

Tabla 4-2. Tiempo total para cada rango de temperaturas.

Las etapas de cámara, punto de venta y consumidor fueron simuladas en un ambiente controlado en el laboratorio. Sin embargo la etapa de transporte fue llevada a cabo ingresando las calabazas y los sensores dentro de una caja de icopor (poliestireno expandido), como normalmente se transporta estos productos. Evidentemente, la cadena de frío se rompió durante el transporte, etapa en la que se registraron valores comprendidos entre 9 y 22.4 °C durante casi 4 horas.

4.3.2. Monitorización de temperatura en naranjas

Tras los resultados satisfactorios de la primera prueba en un ambiente simulado, se decidió llevar a cabo una segunda prueba en un ambiente real, donde se instaló el dispositivo en una caja de naranjas (figura 4-6) enviada desde Valencia, España hasta Cork, Irlanda. Esta prueba tuvo una duración de 8.8 días, que es el tiempo que tardó el producto en llegar a su destino final.



Figura 4-6. Pruebas de transporte en naranjas.

La figura 4-7 muestra la ruta tomada por la caja de naranjas, extraída del servicio de tracking ofrecido por la empresa de envíos. El envío se realizó al final del invierno, en los primeros días de marzo del 2018. Para esta época del año, las temperaturas típicas en lugares como Holanda o Reino Unido oscilan entre -5 y 10 °C, en Lyon, Francia oscila entre 2 y 10 °C, mientras que en lugares como Barcelona o Valencia oscilan entre 8 y 15 °C.



Figura 4-7. Seguimiento de las naranjas.

Resultados

La figura 4-8 muestra los resultados extraídos de las etiquetas inteligentes para este experimento. El eje X muestra los valores de temperatura registrados y el eje Y muestra el tiempo total para cada uno de estos valores. Se observa que la mayor concentración de datos se encuentra al rededor de los valores: 1.4 , 3.4 , 9.0 , 12.0 y 15.8 °C. Se puede diferenciar además unos valores pequeños, que no alcanzan a sumar una hora, entre 16.0 y 21.6 °C.

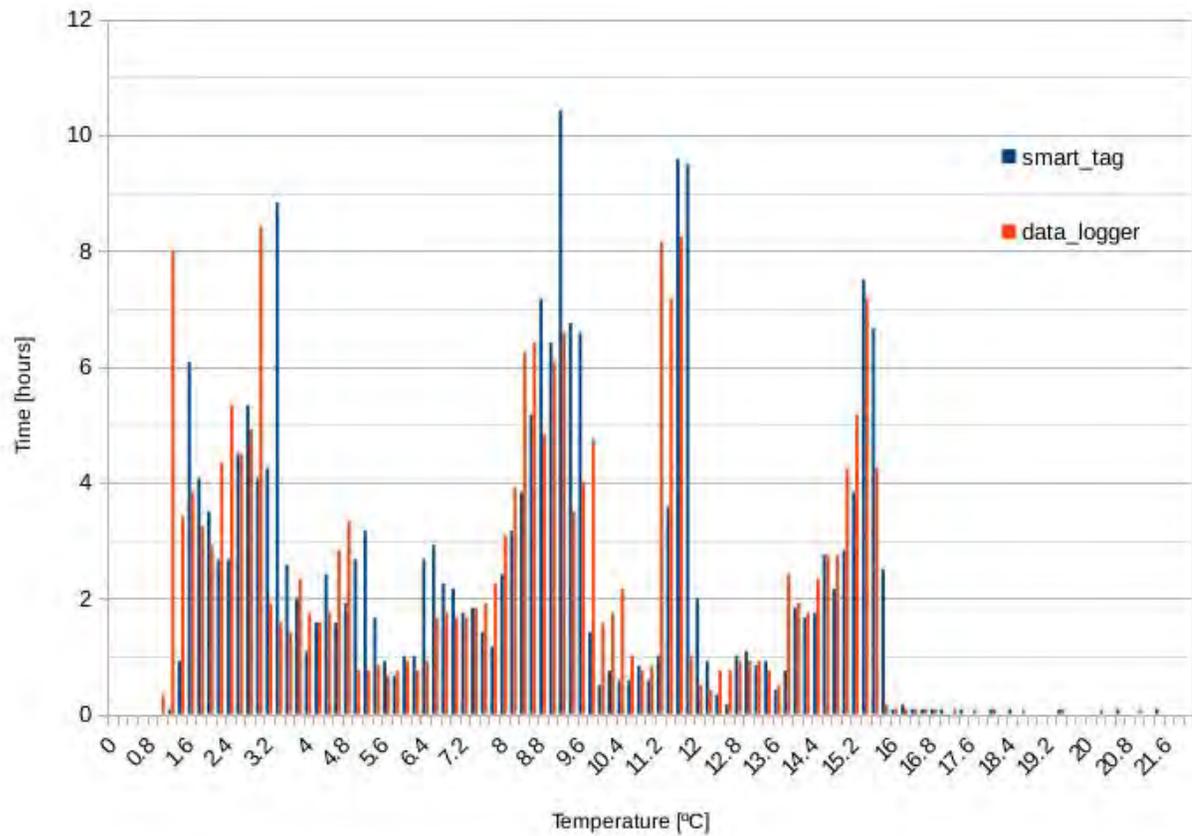


Figura 4-8. Temperatura registrada en naranjas.

En el caso de las naranjas no se necesita garantizar valores rigurosos de temperatura, siendo estas usualmente transportadas a temperatura ambiente. Sin embargo, si existe un límite inferior, por debajo de 0 °C, que afecta la calidad de las mismas. Las naranjas llegaron a su destino en buen estado y como se observa en la figura 4-8 no se registraron valores menores a 0.8 °C, lo cual asegura la calidad del producto final.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

El framework desarrollado constituye un conjunto de herramientas de hardware y software sobre el que se puede desplegar completas soluciones IoT aplicadas a la monitorización de diferentes variables. El framework está compuesto por: sensores embebidos en las etiquetas RFID, gateways, integrados con lectores RFID, y un sistema de información, que contiene la base de datos y la interfaz de usuario. El proceso de desarrollo se enfocó a la aplicación de monitorización de la cadena de frío en alimentos, donde se consiguió monitorizar exitosamente la temperatura de dos productos diferentes, calabaza troceada y naranjas. Los resultados demuestran que el uso de la tecnología RFID en este tipo de aplicaciones es viable y constituye una herramienta económica y de rápido despliegue, teniendo en cuenta que muchas empresas ya cuentan con esta tecnología en sus procesos de logística. Aprovechar esta infraestructura brinda posibilidades infinitas para la aplicabilidad de la tecnología RFID en aplicaciones IoT.

El prototipo de etiqueta inteligente desarrollado en este trabajo tiene completa compatibilidad con la tecnología RFID, estandarizada bajo la norma ISO 18000-6C, y constituye un dispositivo pequeño, liviano y versátil, que puede ser adaptado a la monitorización de múltiples aplicaciones. Frente a dispositivos que se basan en tecnologías como Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth o incluso LPWAN, presenta ventajas relacionadas a consumo de energía y costos. Sin embargo, no está pensado para aplicaciones donde se necesite transferir o almacenar mucha información. La aplicación de la tecnología RFID potencializa estos dispositivos en aplicaciones donde la baja disponibilidad de energía y la reducción de costos sean un requerimiento. Tal es el caso de la cadena de frío, donde muchos de los pequeños productores de alimentos no tienen la capacidad económica de adquirir costosas soluciones tecnológicas. Aplicar dispositivos como el desarrollado en este trabajo podría solucionar este problema.

Si bien el framework constituye un buen conjunto de herramientas y demuestra la aplicabilidad la tecnología RFID en IoT, existe un obstáculo que es la poca cantidad de memoria de la que dispone el chip RFID. Esto se puede superar optimizando el uso de memoria, enfocándose solo en la información crucial del proceso a monitorizar. En el caso del framework desarrollado se aplicó un esquema de mapeo de memoria con un rango de temperatura amplio y que puede abarcar varios productos. Sin embargo, no es el más óptimo. Un esquema de memoria óptimo consistiría en enfocarse en cada alimento y establecer con ello rangos,

puntos críticos y tiempos límite, es decir, casos en los que el producto puede estropearse. En otras palabras, dotar de un poco más de autonomía e “inteligencia” a la etiqueta y que esta sea capaz de deducir el estado del producto, brindaría valor agregado a la solución. Que por medio de una señal visual o auditiva, embebida en la etiqueta, pueda alertar sobre el estado del producto sin la necesidad de acceder a herramientas externas.

La interconexión de sistemas de tecnología es uno de los pilares sobre los que se fundamenta IoT. Para el caso de la cadena de frío, se requiere que los datos extraídos de la monitorización sean almacenados y queden disponibles para todos los agentes involucrados en la cadena. Como lo demuestra la sección de regulación, compartir información sobre las condiciones durante la cadena de frío es una obligación para la industria alimenticia. Esto brinda grandes oportunidades a empresas de tecnología capaces de prestar estos servicios. El sistema de información desarrollado en este trabajo almacena la información extraída de las etiquetas en una base de datos, desde donde se extrae y se muestra al usuario a través de la interfaz gráfica, que además, permite la descarga de los datos asociados a cada etiqueta en un formato CSV. El sistema desarrollado brinda la posibilidad de extraer la información del proceso de monitorización permitiendo la interconexión con otros sistemas.

5.2. Recomendaciones

El sistema desarrollado constituye un framework IoT completo, compuesto por herramientas de hardware y software, que puede ser customizado y aplicado a múltiples casos de monitorización. Al desarrollar un sistema tan grande, se perdió nivel de detalle en cada componente. Por tanto, a continuación se presenta una serie de aspectos a mejorar en cada componente principal.

- Mejorar el diseño de la antena embebida en la etiqueta, aprovechando al máximo el espacio disponible, buscando mejorar la distancia máxima de comunicación de la interfaz RFID.
- Desarrollar esquemas de mapeo de memoria personalizados para cada producto, consiguiendo abstraer los valores límite y puntos críticos que permitan a la etiqueta, por sí sola, deducir el estado del producto monitorizado.
- Implementar la funcionalidad de personalización de esquemas de mapeo de memoria en la interfaz gráfica de usuario, de manera que se pueda cargar en la configuración inicial de la etiqueta antes de empezar con el proceso de monitorización.
- Dotar a los gateways de una interfaz de configuración offline (en el lugar de instalación), extendiendo la GUI se puede desarrollar una serie de aplicaciones que permitan

conectarse con los gateways en el lugar de instalación y configurar parámetros como potencia de transmisión, modo de lectura, etc.

Implementar soluciones de seguridad o energy harvesting en las etiquetas inteligentes podría alargar su vida útil y potenciar al máximo su adopción. Sin embargo, es un aspecto que debe tomarse en cuenta cuando las soluciones a estos problemas adquieran la maduración suficiente.

Una cosa es monitorizar las condiciones durante la cadena de frío y otra es tomar acciones sobre la misma. El desarrollo de sistemas que además de monitorizar condiciones sean capaces de actuar en el momento necesario, es el propósito del Internet de las Cosas. Fusionar el sistema desarrollado con sistemas de control de temperatura o integrar estos sistemas dentro del mismo, es una alternativa que solucionaría, de manera definitiva, los problemas asociados a la cadena de frío.

A. Anexo: Versión final de la etiqueta

A.1. Esquemáticos de la versión final

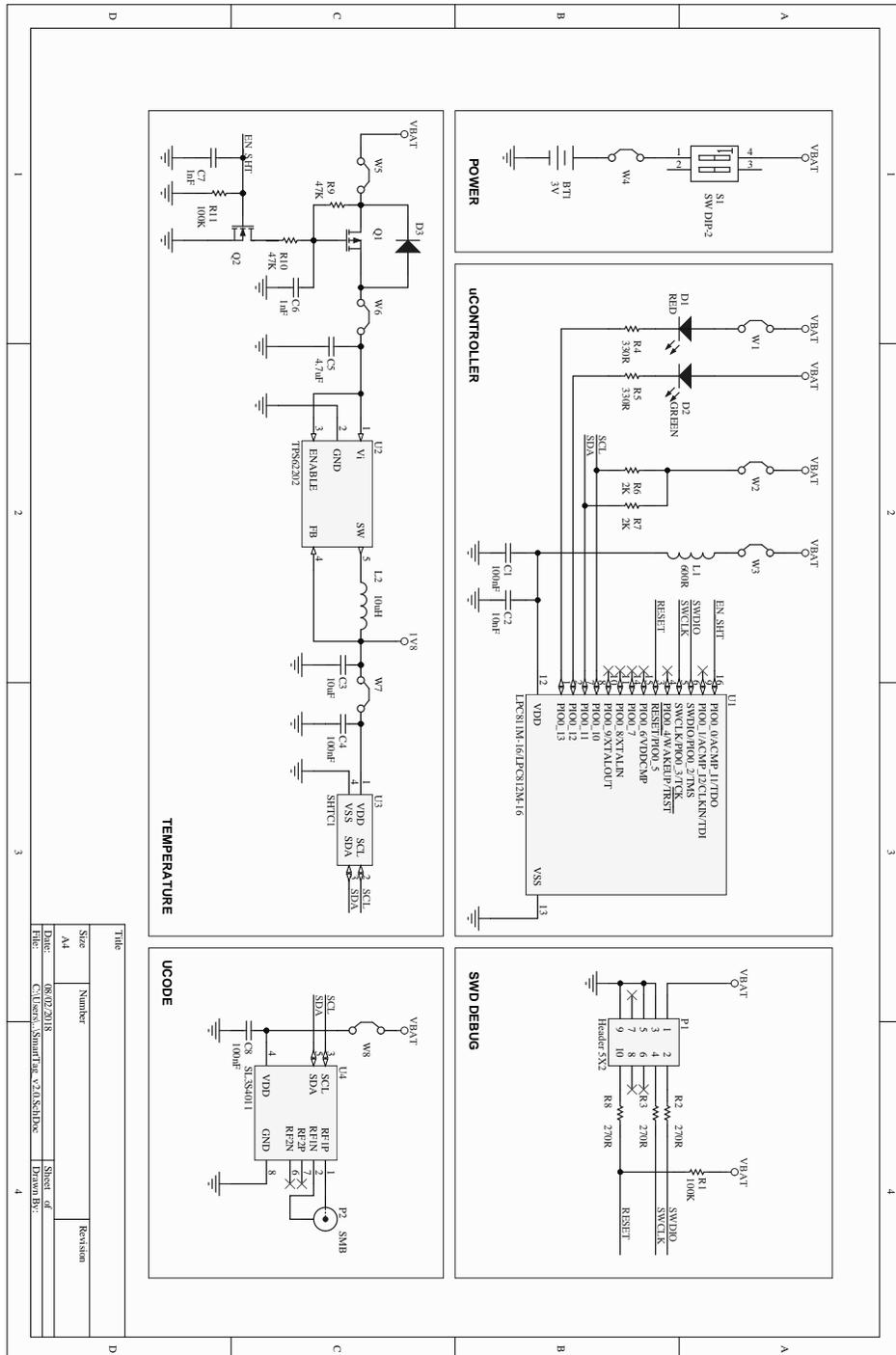


Figura A-1. Esquemático de la versión final de la etiqueta inteligente.

A.2. Estimación de costos

Tabla A-1. Estimación de costos para 1000 unidades.

Device	Quantity	Minimum Quantity	Price per unit (EUR)	Total (EUR)	Store
LED RED	1	5000	0.03256	0.03256	Digikey
LED GREEN	0	5000	0.03256	0.00000	Digikey
Resistor 270	3	5000	0.00829	0.02487	Digikey
Resistor 330	2	5000	0.00936	0.01872	Digikey
Resistor 2k	2	5000	0.03021	0.06042	Digikey
Resistor 47k	2	5000	0.03021	0.06042	Digikey
Resistor 100k	2	5000	0.03021	0.06042	Digikey
Capacitor 1nF	2	4000	0.01529	0.03058	Digikey
Capacitor 10nF	1	4000	0.03493	0.03493	Digikey
Capacitor 100nF	3	10000	0.01773	0.05319	Digikey
Capacitor 4.7uF	1	2000	0.02841	0.02841	Digikey
Capacitor 10uF	1	3000	0.02703	0.02703	Digikey
Inductor 10uH	1	3000	0.68985	0.68985	Digikey
Inductor 600nH	1	4000	0.43720	0.43720	Digikey
Diode 10005	1	4000	0.03114	0.03114	Digikey
Transistor-N DMN65D8L-7	1	3000	0.02600	0.02600	Digikey
Transistor-P DMG2305UX-7	1	3000	0.05990	0.05990	Digikey
Battery & holder	1	1	1.14000	1.14000	Digikey
MCU LPC811M-16	1	2500	0.45243	0.45243	Digikey
UCODE SL3S4011	1	2500	0.29800	0.29800	Farnell
Sensirion SHTC1	1	500	1.35882	1.35882	Digikey
PCB	1	265	1.93000	1.93000	Wurt electroniks
Mounting & soldering			1000	1.00000	
Plastic molde			25000	0.15000	
Certification			20000		
				8.00489	per Unit

Bibliografía

- [1] US Department of Transportation (UDOT)-Federal Highway Administration, “Systems engineering for intelligent transportation systems,” Tech. Rep., 2007. [Online]. Available: <http://ops.fhwa.dot.gov/publications/seitsguide/seguide.pdf>
- [2] Postscapes, “IoT Standards and Protocols.” [Online]. Available: <https://www.postscapes.com/internet-of-things-protocols/>
- [3] NXP Semiconductors, “AN11180 UCODE I2C PCB antenna reference designs,” pp. 1–32, 2012. [Online]. Available: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN11180.pdf>
- [4] E. Inc, “EPC global Gen2 Specification,” pp. 1–152, 2013.
- [5] V. Bhuvaneshwari and R. Porkodi, “The internet of things (IOT) applications and communication enabling technology standards: An overview,” in *Proceedings - 2014 International Conference on Intelligent Computing Applications, ICICA 2014*, 2014, pp. 324–329.
- [6] A. Z. M. Z. Marco Centenario, Lorenzo Vangelista, “Long_Range Communications in Unlicensed Bands: The rising stars in the IoT and Smart City Scenarios,” *IEEE Wireless Communications*, no. October, pp. 60–67, 2016.
- [7] G. Santucci, “From internet of data to internet of things,” *International Conference on Future Trends of the Internet*, no. January, pp. 1–19, 2009. [Online]. Available: <http://www.ipv6council.lu/AgendaLfICT.html>
- [8] S. Monteleone, M. Sampaio, and R. F. Maia, “A novel deployment of smart Cold Chain system using 2G-RFID-Sys temperature monitoring in medicine Cold Chain based on Internet of Things,” pp. 205–210, 2017.
- [9] L. Mainetti, F. Mele, L. Patrono, F. Simone, M. L. Stefanizzi, and R. Vergallo, “An RFID-based tracing and tracking system for the fresh vegetables supply chain,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2013, 2013.
- [10] F. Vega, J. Pantoja, S. Morales, O. Urbano, A. Arevalo, E. Muskus, C. Pedraza, M. Patino, M. Suarez, and N. Hernandez, “An IoT-based open platform for monitoring non-

- ionizing radiation levels in Colombia,” *2016 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing, COLCOM 2016 - Conference Proceedings*, 2016.
- [11] R. L. Admilson, F. C. S. Silva, L. C. Freitas, and R. Carlos, “SensorBus : A Middleware Model for Wireless Sensor Networks,” no. c, pp. 1–9, 2005.
- [12] M. M. Tentzeris, S. Kim, A. Traille, H. Aubert, K. Yoshihiro, A. Georgiadis, and A. Collado, “Inkjet-printed RFID-enabled sensors on paper for IoT and ”Smart Skin.” applications,” in *ICECom 2013 - Conference Proceedings: 21st International Conference on Applied Electromagnetics and Communications*, 2013.
- [13] Chunxiao Fan, Zhigang Wen, Fan Wang, and Yuexin Wu, “A middleware of Internet of Things (IoT) based on ZigBee and RFID,” in *IET International Conference on Communication Technology and Application (ICCTA 2011)*, 2011, pp. 732–736. [Online]. Available: <http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2011.0765>
- [14] J. Landt, “The history of RFID,” *IEEE Potentials*, vol. 24, no. 4, pp. 8–11, 2005.
- [15] Revista de Logística, “SINIEV: un centro inteligente de control de tránsito y transporte que beneficiará a todo el país.” [Online]. Available: <https://revistadelogistica.com/actualidad/sinie-v-un-centro-inteligente-de-control-de-transito-y-transporte-que-beneficiara>
- [16] J. Sung, T. S. Lopez, and D. Kim, “The EPC Sensor Network for RFID and WSN integration infrastructure,” in *Proceedings - Fifth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, PerCom Workshops 2007*, 2007, pp. 618–621.
- [17] M. Lauridsen, H. Nguyen, B. Vejlgaard, I. Z. Kovacs, P. Mogensen, and M. Sorensen, “Coverage Comparison of GPRS, NB-IoT, LoRa, and SigFox in a 7800 km Area,” *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 2017-June, pp. 2–6, 2017.
- [18] LoRa Alliance, “LoRa Alliance.” [Online]. Available: <https://www.lora-alliance.org/>
- [19] GSMA, “3GPP Low Power Wide Area Technologies,” p. 19, 2016. [Online]. Available: <https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2016/10/3GPP-Low-Power-Wide-Area-Technologies-GSMA-White-Paper.pdf>
<http://www.gsma.com/connectedliving/wp-content/uploads/2016/10/3GPP-Low-Power-Wide-Area-Technologies-GSMA-White-Paper.pdf>
- [20] Ublox, “Narrowband IoT (NB-IoT).” [Online]. Available: <https://www.u-blox.com/en/narrowband-iot-nb-iot>

- [21] R. S. Sinha, Y. Wei, and S. H. Hwang, "A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT," *ICT Express*, vol. 3, no. 1, pp. 14–21, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ict.2017.03.004>
- [22] A. Dunkels and J. Vasseur, "IP for Smart Objects," 2008.
- [23] OASIS, "MQTT Version 3.1.1," p. 81, 2014. [Online]. Available: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html>
- [24] I. E. T. F. (IETF), "The Constrained Application Protocol (CoAP)." [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc7252>
- [25] dc-square, "MQTT." [Online]. Available: <https://www.hivemq.com/mqtt/>
- [26] C. Bormann, "The Constrained Application Protocol (CoAP)." [Online]. Available: <http://coap.technology/>
- [27] Libelium, "Wasmote, technical guide." [Online]. Available: http://www.libelium.com/downloads/documentation/wasmote_technical_guide.pdf
- [28] P. Seflova, V. Sulc, J. Pos, and R. Spinar, "IQRF Wireless Technology Utilizing IQ-MESH Protocol," pp. 101–104, 2012.
- [29] R. Hajovsky and M. Pies, "Use of IQRF technology for large monitoring systems," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 28, no. 4, pp. 486–491, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.07.082>
- [30] M. Pies, R. Hajovsky, and S. Ozana, "Wireless Measurement of Carbon Monoxide Concentration," in *International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 2014, pp. 567–571.
- [31] V. Sulc, R. Kuchta, and R. Vrba, "IQRF smart house - A case study," *Proceedings - 3rd International Conference on Advances in Mesh Networks, MESH 2010*, pp. 103–108, 2010.
- [32] IQRF Alliance, "IQRF Technology." [Online]. Available: <https://www.iqrf.org/>
- [33] Oceansoft, "Wireless solutions for temperature & humidity monitoring, and beyond." [Online]. Available: <http://www.oceansoft.com/>
- [34] RF Micron, "Hermes Smart Edge IoT Platform for Smart Passive Sensing." [Online]. Available: <http://rfmicron.com/wp-content/uploads/2016/06/1p-PB011F10-RFM5103-A-Hermes-Smart-Edge-IoT-Platform-Brochure-720px.png>
- [35] ACURITE, "Know Your Environment Inside and Out." [Online]. Available: <https://www.acurite.com/learn/my-acurite>

- [36] DIGI, “DIGI SMART SOLUTIONS.” [Online]. Available: <https://www.digi.com/smart-solutions>
- [37] Sensoscientific, “Wireless Temperature Monitoring System.” [Online]. Available: <https://www.sensoscientific.com/>
- [38] Oceasoft, “EMERALD.” [Online]. Available: <http://www.oceasoft.com/product/emerald#.WdzUKHC7Vpg>
- [39] Sensoscientific, “SENSOTAG-NFC.” [Online]. Available: https://www.sensoscientific.com/wp-content/uploads/2016/01/Spec_SensoTagNFC.pdf
- [40] Oceasoft, “Cobalt L3, long-range wireless temperature and humidity monitoring.” [Online]. Available: <http://www.oceasoft.com/product/cobalt-l3#.WdObkxe7Vph>
- [41] MONNIT, “Wireless Temperature Sensors.”
- [42] CCP, “Monitoring Critical Control Points.” [Online]. Available: <http://us.ccp-network.com/>
- [43] Sensolus, “STICKNTRACK TEMP.” [Online]. Available: <https://www.sensolus.com/sticknsense-temp/>
- [44] L. Roselli, C. Mariotti, P. Mezzanotte, F. Alimenti, G. Orecchini, M. Virili, and N. B. Carvalho, “Review of the present technologies concurrently contributing to the implementation of the Internet of Things (IoT) paradigm: RFID, Green Electronics, WPT and Energy Harvesting,” in *2015 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks, WiSNet 2015*, 2015, pp. 1–3.
- [45] D. Hai, M. Varanasi, K. Swigger, O. Garcia, R. Ogan, and E. Kougiianos, “Design of Sensor-Embedded Radio Frequency Identification (SE-RFID) systems,” *2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2006*, vol. 2006, pp. 792–796, 2006.
- [46] Z. Zou, Q. Chen, I. Uysal, and L. Zheng, “Radio frequency identification enabled wireless sensing for intelligent food logistics,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 372, no. 2021, pp. 20140209–20140209, 2014. [Online]. Available: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rsta.2014.0209>
- [47] E. Lai, A. Redfern, and P. Wright, “Vibration powered battery-assisted passive RFID tag,” pp. 1058–1068, 2005.

- [48] D. W. Engels, Y. S. Kang, and J. Wang, "On security with the new Gen2 RFID security framework," in *2013 IEEE International Conference on RFID, RFID 2013*, vol. 7, 2013, pp. 144–151.
- [49] S. Guizani, "Security Applications Challenges of RFID Technology and Possible Countermeasures," in *2014 International Conference on Computing, Management and Telecommunications (ComManTel)*, vol. 2, 2014, pp. 291–297.
- [50] M. A. Razzaque, M. Milojevic-Jevric, A. Palade, and S. Clarke, "Middleware for Internet of Things: a Survey," *Internet of Things Journal, IEEE*, vol. PP, no. 99, p. 1, 2015.
- [51] DIRECCIÓN GENERAL DE LA INDUSTRIA ALIMENTARIA, "Principales disposiciones aplicables a la conservación, almacenamiento y transporte de los alimentos," pp. 1–26. [Online]. Available: http://www.mapama.gob.es/es/alimentacion/legislacion/recopilaciones-legislativas-monograficas/pdaalaconservacionalmacenamientoytransportesumariocompleto17122016_tcm30-79000.pdf
- [52] COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS, "Reglamento (CE) No 37/2005 de la comisión de 12 de Enero de 2005," pp. 1–12, 2005. [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2005R0037:20050202:ES:PDF>
- [53] Ministerio de salud de Colombia, "ABECÉ de la inocuidad de alimentos," pp. 1–7, 2017. [Online]. Available: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SNA/abc-inocuidad.pdf>
- [54] G. C. Rodriguez and A. y. B. Subdirección de Salud Nutricional, "NORMOGRAMA SANITARIO DE ALIMENTOS Y BEBIDAS," p. 2, 2017. [Online]. Available: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SNA/normograma-sanitario-alimentos-bebidas.pdf>
- [55] PROEXPORT COLOMBIA, "PROEXPORT COLOMBIA." [Online]. Available: <http://www.proexport.ca/>
- [56] H. Navarro and Proexport Colombia, "Logística En La Cadena De Frio," pp. 1–35, 2013. [Online]. Available: http://www.colombiatrade.com.co/sites/default/files/conferencia_logistica_en_la_cadena_de_frio_proexport_2013.pdf
- [57] NXP, "SL3S4011.4021: UCODE I²C." [Online]. Available: https://www.nxp.com/products/identification-and-security/smart-label-and-tag-ics/ucode/ucode-ic:SL3S4011_4021
- [58] M. Bertolini, M. Bevilacqua, and R. Massini, "FMECA approach to product traceability in the food industry," vol. 17, pp. 137–145, 2006.

- [59] M. M. Aung and Y. S. Chang, "Traceability in a food supply chain : Safety and quality perspectives," *Food Control*, vol. 39, pp. 172–184, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.11.007>
- [60] T. Bosona and G. Gebresenbet, "Food traceability as an integral part of logistics management in food and agricultural supply chain," *Food Control*, vol. 33, no. 1, pp. 32–48, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.02.004>
- [61] A. Bechini, M. G. C. A. Cimino, F. Marcelloni, and A. Tomasi, "Patterns and technologies for enabling supply chain traceability through collaborative e-business," *Information and Software Technology*, vol. 50, no. 4, pp. 342–359, 2008.
- [62] A. Kaarina, H. Seppo, J. Kaarle, L. Eva, and R. Laura, *Traceability of foods and food-borne hazards*, 2007.
- [63] C. Costa, F. Antonucci, F. Pallottino, J. Aguzzi, D. Sarriá, and P. Menesatti, "A Review on Agri-food Supply Chain Traceability by Means of RFID Technology," *Food and Bioprocess Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 353–366, 2013.
- [64] J. M. Azzarelli, K. A. Mirica, J. B. Ravnsbæk, and T. M. Swager, "Wireless gas detection with a smartphone via rf communication," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, no. 51, pp. 18 162–18 166, 2014. [Online]. Available: <http://www.pnas.org/lookup/doi/10.1073/pnas.1415403111>
- [65] R. Badia-Melis, P. Mishra, and L. Ruiz-García, "Food traceability: New trends and recent advances. A review," *Food Control*, vol. 57, pp. 393–401, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.05.005>
- [66] J. Storoy, M. Thakur, and P. Olsen, "The TraceFood Framework - Principles and guidelines for implementing traceability in food value chains," *Journal of Food Engineering*, vol. 115, no. 1, pp. 41–48, 2013.
- [67] T. Pizzuti, G. Mirabelli, M. A. Sanz-bobi, and F. Gómez-gonzaléz, "Food Track & Trace ontology for helping the food traceability control," *Journal of Food Engineering*, vol. 120, pp. 17–30, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.07.017>
- [68] R. Y. Chen, "Autonomous tracing system for backward design in food supply chain," *Food Control*, vol. 51, pp. 70–84, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.11.004>
- [69] M. Zhang and P. Li, "RFID Application Strategy in Agri-Food Supply Chain Based on Safety and Benefit Analysis," *Physics Procedia*, vol. 25, pp. 636–642, 2012. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389212005536>

-
- [70] C. Amador, U. States, W. Lake, R. Lakeland, and U. States, “Development of Rfid Temperature Tracking Systems for Combat Feeding Logistics,” pp. 1–11, 2010.
- [71] L. Catarinucci, I. Cuiñas, I. Expósito, R. Colella, J. Antonio, G. Fernández, and L. Tarricone, “RFID and WSNs for Traceability of Agricultural Goods from Farm to Fork : Electromagnetic and Deployment Aspects on Wine Test-Cases,” *Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2011 19th International Conference on*, pp. 1 – 4, 2011.
- [72] E. Neira, J. Pantoja, N. Figueroa, G. Mañana, C. Pedraza, and F. Vega, “of an intelligent vehicle control platform based on radio frequency identification,” in *Actas de Ingeniería*, vol. 1, 2014, pp. 153–159. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Ernesto_Neira/publication/296692272_DEVELOPMENT_OF_AN_INTELLIGENT_VEHICLE_CONTROL_PLATFORM_BASED_ON_RADIO_FREQUENCY/links/56d851b408aee1aa5f7d0e58.pdf
- [73] K. Yang and X. Jia, “Data storage auditing service in cloud computing : challenges , methods and opportunities,” pp. 409–428, 2012.