

TFM

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

**Plataforma OTA segura y escalable
para dispositivos IoT con
criptografía ligera y post-cuántica**

Díez-Andino Herrera, Álvaro
2025-2026

Máster en análisis de datos, ciberseguridad y computación en la nube



PLATAFORMA OTA SEGURA Y ESCALABLE PARA DISPOSITIVOS IoT CON CRIPTOGRAFÍA LIGERA Y POST-CUÁNTICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER PRESENTADO EN: Escuela Politécnica Superior de MU

PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE: Máster en análisis de datos, ciberseguridad y computación en la nube

AUTOR/A: Díez-Andino Herrera, Álvaro

DIRECTOR/A: Iñaki Garitano

TUTOR/A: Haritz Saiz

EMPRESA/ORGANIZACIÓN EN LA QUE SE HA REALIZADO EL PROYECTO: Ikerlan S. Coop.

- El autor/la autora del Trabajo de Fin de Máster autoriza a la Escuela Politécnica Superior de Mondragon Unibertsitatea, con carácter gratuito y con fines exclusivamente de investigación y docencia, los derechos de reproducción y comunicación pública de este documento siempre que: se cite el autor/la autora original, y el uso que se haga de la obra no sea comercial.

-  Reconocimiento – NoComercial – CompartirIgual (by-nc-sa): No se permite un uso comercial de la obra original ni de las posibles obras derivadas, la distribución de las cuales se debe hacer con una licencia igual a la que regula la obra original.

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Yo Díez-Andino Herrera, Álvaro

Declaro que este Trabajo de Fin de Máster es original, fruto de mi trabajo personal, y que no ha sido previamente presentado para obtener otro título o calificación profesional. Las ideas, formulaciones, imágenes, ilustraciones tomadas de fuentes ajenas han sido debidamente citadas y referenciadas.

Resumen

El Trabajo de Fin de Máster propone el diseño, implementación y evaluación de una plataforma de actualización remota (OTA) segura y escalable para dispositivos IoT. La motivación principal radica en la elevada cantidad de dispositivos que sufren por vulnerabilidades y la falta de actualizaciones para solucionarlas, lo que crea vectores de ataque a gran escala. Esta plataforma permite la distribución de actualizaciones firmadas y cifradas a flotas de dispositivos para garantizar la autenticidad, integridad y confidencialidad del software desplegado.

El sistema está pensado para todo tipo de escenarios: desde dispositivos sencillos con pocos recursos hasta situaciones críticas que necesitan protegerse de futuros ordenadores cuánticos. Por eso, soporta dos tipos de criptografía: algoritmos post-cuánticos y algoritmos ligeros (lightweight cryptography), ideales para equipos con poca memoria y batería.

El trabajo incluye un análisis del estado de la práctica sobre actualizaciones OTA en IoT y de las necesidades de seguridad actuales, mostrando la importancia de incorporar criptografía ligera para dispositivos con recursos limitados y la opción de soluciones resistentes a la computación cuántica cuando el contexto lo requiera. Además, se desarrolla un prototipo de plataforma, desplegable en la nube y diseñado para escalar horizontalmente.

Palabras clave: OTA, IoT, actualizaciones seguras, post-cuántico, criptografía ligera, firma digital, cifrado.

Impacto en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), ODS 12 (Producción y Consumo Responsables).

Laburpena

Master Amaierako Lan honek IoT gailuetarako OTA (over-the-air) eguneratze-plataforma segurua eta eskalagarri baten diseinua, implementazioa eta ebaluazioa proposatzen du. Motibazio nagusia da ahul-tasunak dituzten eta eguneratzerik jasotzen ez duten gailu ugariena, eta horrek erasotze-bideak sortzen ditu eskala handian. Plataforma honek eguneratze sinatuak eta zifratutakoak banatzeko aukera ematen du, sistema batean instalatutako softwarearen jatorria, osotasuna eta konfidentzialtasuna bermatzeko.

Baliabide mugatuak dituzten gailuetarako eta etorkizuneko eraso kuantikoen aurrean erresistentzia behar duten egoeretarako egokituz, sistemak bi kriptografia-familiari laguntha eskaintzen die: kuantumaren aurkako erresistentzia duten zifratze eta sinadura algoritmoak, eta memoria, CPU eta energia murrizketak dituzten gailuentzako optimizatutako 'lightweight' kriptografia algoritmoak.

Lanak OTA eguneratzeei buruzko egungo praktiken analisia eta segurtasun-beharren azterketa barne hartzen ditu, baliabide mugatutako gailuentzako kriptografia arina sartzeko garrantzia nabamentzen du eta beharrezkoa denean kuantumaren aurkako soluzioak aukeratzearen garrantziaz mintzo da. Gainera, hodeian martxan jar daitekeen eta horizontalki eskalatzeko diseinatutako plataforma prototipo bat garatu.

Gako-hitzak: OTA; IoT; eguneratze seguruak; post-kuantikoa; kriptografia arina; sinadura digitala; zifratzea.

Garapen Jasangarriko Helburuetan (GJH) eragina: GJH 9, GJH 12.

Abstract

This Master's thesis proposes the design, implementation, and evaluation of a secure and scalable over-the-air (OTA) update platform for IoT devices. The main motivation is the large number of devices that suffer from vulnerabilities and are not updated, creating large-scale attack vectors. The platform enables distributing signed and encrypted updates to device fleets to ensure the authenticity, integrity, and confidentiality of deployed software.

To accommodate both resource-constrained devices and scenarios requiring resilience against future quantum attacks, the system supports two families of cryptographic algorithms: post-quantum resistant encryption and signing algorithms, and lightweight cryptography algorithms optimized for devices with limited memory, CPU, and energy.

The work includes an analysis of current OTA practices and security needs, highlighting the importance of incorporating lightweight cryptography for constrained devices and offering post-quantum options when the context requires it. Additionally, a cloud-deployable prototype platform is developed, designed for horizontal scalability.

Keywords: OTA; IoT; secure updates; post-quantum; lightweight cryptography; digital signatures; encryption.

Sustainable Development Goals (SDG) impact: SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), SDG 12 (Responsible Consumption and Production).

Agradecimientos

Agradezco especialmente a mi tutor/a por su apoyo y guía durante la realización de este Trabajo de Fin de Máster.

También quiero agradecer a la empresa/organización que me ha dado la oportunidad de desarrollar este proyecto en un entorno real.

Finalmente, gracias a mi familia y amigos por su comprensión y apoyo incondicional.

Díez-Andino Herrera, Álvaro

Arrasate-Mondragón, 2025-2026

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Problemática	1
1.2	Motivación	2
1.3	Antecedentes	2
1.4	Estado del arte	3
1.4.1	Panorama de vulnerabilidades en dispositivos IoT	3
1.4.2	Plataformas OTA existentes: análisis comparativo	4
1.4.3	Necesidad de algoritmos criptográficos eficientes	6
1.5	Objetivos	6
1.5.1	Propósito y alcance	6
1.6	Planificación	7
1.6.1	Fase 1: Investigación	7
1.6.2	Fase 2: Diseño e integración de módulos de seguridad para dispositivos IoT	8
1.6.3	Fase 3: Automatización de pruebas, despliegue y ciclo de vida	8
2	Desarrollo	10
2.1	Bases teóricas de la criptografía	10
2.1.1	Criptografía simétrica	11
2.1.2	Criptografía asimétrica	13
2.1.3	Principios de seguridad asegurados con cifrado asimétrico	15
2.1.4	Firma digital	15
2.1.5	Autoridades Certificadoras y certificados digitales	17
2.2	Elección de algoritmos criptográficos	18
2.2.1	ASCON: Estándar de criptografía ligera	19
2.3	Actualizaciones de software en sistemas embebidos	23
2.3.1	Conceptos fundamentales	24
2.3.2	SWUpdate: Gestor de actualizaciones	25
2.3.3	WFX: Workflow Executioner	28

Bibliografía **33**

Índice alfabético **34**

Índice de figuras

1.1	Planificación temporal del proyecto (Diagrama de Gantt)	9
2.1	Uso de cifrado simétrico	11
2.2	Creación de las llaves por parte de Bob	13
2.3	Alice introduce el mensaje en la caja y la cierra con la clave pública de Bob.	14
2.4	Bob abre la caja y obtiene el mensaje.	14
2.5	Bob inserta el mensaje y usa su llave privada.	14
2.6	Alice utiliza la clave pública de Bob para abrir la caja y verificar la autenticidad del mensaje.	15
2.7	Jerarquía de las Autoridades Certificadoras.	18
2.8	Resultados de rendimiento en Raspberry Pi 3	21
2.9	Resultados de rendimiento en Arduino UNO R4	21
2.10	Tamaño máximo de texto plano admitido en Arduino	22
2.11	Bytes adicionales requeridos por algoritmos AEAD	22
2.12	Proceso de instalación de actualización A/B.	25
2.13	Diagrama de estados del Workflow Directo.	29
2.14	Diagrama de estados del Workflow Por Fases.	30
2.15	Estructura de la entidad Job en WFX.	31

Índice de tablas

1.1 Comparativa de plataformas OTA existentes	5
---	---

Listado de Acrónimos

- AEAD** Authenticated Encryption with Associated Data (Cifrado Autenticado con Datos Asociados)
- AES** Advanced Encryption Standard (Estándar de Cifrado Avanzado)
- API** Application Programming Interface (Interfaz de Programación de Aplicaciones)
- ASCON** Algoritmo de criptografía ligera estandarizado por NIST
- CPU** Central Processing Unit (Unidad Central de Procesamiento)
- CRA** Cyber Resilience Act (Ley de Resiliencia Cibernética de la UE)
- DDoS** Distributed Denial of Service (Denegación de Servicio Distribuida)
- DFU** Device Firmware Update (Actualización de Firmware del Dispositivo)
- ECDSA** Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (Algoritmo de Firma Digital de Curva Elíptica)
- ICS** Industrial Control Systems (Sistemas de Control Industrial)
- IoT** Internet of Things (Internet de las Cosas)
- LWC** Lightweight Cryptography (Criptografía Ligera)
- MLDSA** Module-Lattice-Based Digital Signature Algorithm (Algoritmo de Firma Digital basado en Redes de Módulos, antes Dilithium)
- NIST** National Institute of Standards and Technology (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de EE.UU.)
- ODS** Objetivos de Desarrollo Sostenible
- OTA** Over-The-Air (Actualización remota por aire)
- PC** Personal Computer (Ordenador Personal)
- PQC** Post-Quantum Cryptography (Criptografía Post-Cuántica)
- RAM** Random Access Memory (Memoria de Acceso Aleatorio)

RSA Rivest–Shamir–Adleman (Algoritmo criptográfico de clave pública)

SDK Software Development Kit (Kit de Desarrollo de Software)

SPHINCS+ Esquema de firma digital post-cuántico basado en funciones hash

TFM Trabajo de Fin de Máster

TUTK ThroughTek Kalay (Plataforma IoT)

UE Unión Europea

AEAD Authenticated Encryption with Associated Data (Cifrado Autenticado con Datos Asociados)

1. Introducción

El Internet de las Cosas (IoT) ha transformado radicalmente la forma en que los dispositivos interactúan con el entorno físico y digital. Sin embargo, este crecimiento exponencial ha expuesto una brecha crítica: la falta de mecanismos robustos para mantener la seguridad de estos dispositivos a lo largo de su ciclo de vida operativo. Esta introducción presenta el contexto del problema, examina el estado actual de la investigación y la práctica industrial, y define los objetivos de este Trabajo de Fin de Máster.

1.1 Problemática

El ecosistema IoT ha experimentado un crecimiento sin precedentes, con miles de millones de dispositivos conectados desplegados en entornos industriales, domésticos, sanitarios y de infraestructuras críticas. A pesar de este despliegue masivo, la seguridad no ha evolucionado al mismo ritmo. Una cantidad alarmante de dispositivos permanece sin actualizar debido a la ausencia de mecanismos efectivos de actualización remota, convirtiéndose en vectores de ataque a gran escala.

Las actualizaciones OTA (Over-The-Air) inseguras, o directamente inexistentes, son uno de los mayores riesgos en el IoT. Datos de la industria [1] dicen que cerca del 20 % de las organizaciones han sufrido ataques que venían de dispositivos IoT comprometidos, y que la mayoría de las empresas tienen un riesgo importante por culpa de aparatos sin parchear.

Este problema se complica por dos retos técnicos básicos:

1. **Recursos limitados:** Los dispositivos IoT son muy variados, desde chips muy simples de 8 bits con poquísimá memoria hasta sistemas más potentes. Esta variedad hace que no se puedan usar las mismas soluciones de seguridad que usamos en ordenadores normales.
2. **La amenaza cuántica:** Los algoritmos usados actualmente para firmar actualizaciones podrían ser vulnerables a los ordenadores cuánticos del futuro. Como los dispositivos IoT suelen durar muchos años, es buena idea pensar en esto desde el principio para los casos donde la seguridad a largo plazo sea clave.

Si a esto se le suma la cantidad de dispositivos que hay, las actualizaciones poco seguras y las amenazas futuras, tenemos un escenario de riesgo importante. Por eso hace falta buscar soluciones nuevas, aprovechando lo que dice la investigación y la experiencia de la industria.

1.2 Motivación

Lo interesante, y lo que motiva este trabajo, es que ambas perspectivas cuentan historias diferentes pero complementarias. Los estudios han demostrado que es posible construir sistemas de actualización seguros, eficientes y adaptados a dispositivos con recursos limitados. La industria, sin embargo, muestra que estas soluciones no se han adoptado de forma generalizada: los frameworks más usados siguen dependiendo de criptografía tradicional, ninguno integra algoritmos ligeros ni esquemas post-cuánticos.

Para abordar esta problemática de forma rigurosa, este trabajo adopta una doble perspectiva. Por un lado, el **estado del arte académico**: qué dice la investigación sobre las vulnerabilidades reales, qué arquitecturas de actualización segura se han propuesto, y qué avances hay en criptografía ligera y post-cuántica. Por otro lado, el **estado de la práctica**: qué soluciones existen realmente en el mercado (SWUpdate, Mender, hawkBit...), qué limitaciones tienen, y por qué las empresas siguen desplegando dispositivos vulnerables a pesar de que técnicamente existen alternativas mejores.

Ese hueco entre lo que se puede hacer técnicamente y lo que se hace en realidad es donde se centra este TFM. El objetivo es demostrar que se pueden juntar herramientas probadas como SWUpdate con criptografía moderna (ligera y post-cuántica) en una plataforma centralizada que permita gestionar grandes flotas de forma segura.

1.3 Antecedentes

Este trabajo surge de una necesidad identificada durante las prácticas laborales realizadas en Ikerlan, donde se trabajó agregando funcionalidades a Lamassu, una Infraestructura de Clave Pública (PKI) especializada en dispositivos IoT. Lamassu proporciona gestión centralizada de dispositivos IoT con gestión de claves asímetricas y autenticación e identificación de dispositivos: desde la provisión inicial de certificados hasta su renovación y revocación de forma segura a escala. Se propuso la idea de añadir la funcionalidad modular de distribución de actualizaciones OTA seguras, aprovechando la infraestructura de Lamassu para gestionar las claves y certificados necesarios para firmar y verificar las actualizaciones.

Este trabajo se centra explícitamente en la distribución de actualizaciones remotas para dispositivos IoT que ejecutan Linux embebido, el entorno mayoritario en dispositivos industriales y comerciales. «Linux embebido» hace referencia a distribuciones y stacks (Buildroot, Yocto, u-boot, etc.) y a imágenes rootfs y toolchains optimizados para entornos con recursos limitados; no debe confundirse con una instalación de Linux de escritorio o servidor con servicios y recursos plenos. Por tanto, las adaptaciones que este entorno exige son tanto de naturaleza operativa como de límite de recursos.

El problema de fondo es que los dispositivos IoT no son ordenadores ni teléfonos. Un sensor industrial, una bombilla inteligente o un monitor de salud tienen restricciones de hardware muy diferentes: procesadores de bajo consumo, memoria limitada y fuentes de energía restringidas. Aplicar los mismos mecanismos de actualización que usamos en un PC simplemente no funciona, y eso ha llevado a prá-

ticas inseguras: fabricantes que envían actualizaciones sin cifrar, dispositivos que aceptan firmware sin verificar su origen, o productos que salen al mercado sin capacidad de actualización. Estos problemas han facilitado la creación de botnets y ataques DDoS a gran escala en el pasado, por ejemplo, Mirai [2]. Estudios académicos han identificado además la presencia de SDKs y flujos de actualización inseguros que amplían la superficie de ataque a millones de dispositivos [3].

Por otra parte, los dispositivos IoT tienen ciclos de vida larguísimos, a veces de décadas, lo que dificulta mucho la gestión de vulnerabilidades y actualizaciones con el tiempo[4]. Durante ese periodo, aparecen nuevas vulnerabilidades, se descubren fallos en algoritmos criptográficos y la amenaza de la computación cuántica pone en evidencia la necesidad de pensar en opciones resistentes a largo plazo. Todo esto subraya la urgencia de adoptar un método centralizado y auditible de gestión de actualizaciones que permita controlar despliegues, gestionar rollbacks y garantizar la ciberresiliencia, requisitos que se vuelven legalmente vinculantes con la inminente entrada en vigor de la Cyber Resilience Act (CRA) de la Unión Europea.

1.4 Estado del arte

Esta sección analiza sistemáticamente la literatura académica y las soluciones tecnológicas existentes para identificar las contribuciones científicas, las limitaciones de las implementaciones actuales, y las brechas que justifican la propuesta de este trabajo. El análisis se estructura en cuatro partes: evidencia empírica sobre vulnerabilidades, plataformas OTA existentes, familias de algoritmos criptográficos emergentes, y análisis crítico de las limitaciones identificadas.

1.4.1 Panorama de vulnerabilidades en dispositivos IoT

Es evidente que la seguridad en IoT es un problema grave, tanto si miramos informes de la industria como estudios académicos. Todos coinciden en que hacen falta soluciones sólidas para actualizar el firmware.

Evidencia desde la industria:

Los informes de la industria pintan un panorama preocupante. Se estima que más de 5.600 millones de dispositivos IoT serán vulnerables en los próximos años, sobre todo con la llegada del 5G y el crecimiento masivo de dispositivos conectados [5].

Reportes de seguridad [1] evidencian que aproximadamente el 20 % de las organizaciones han detectado ataques basados en dispositivos IoT en sus infraestructuras, y que la gran mayoría de entornos corporativos presentan exposición significativa a riesgos derivados de dispositivos comprometidos o sin actualizar. Esta situación refleja una superficie de ataque en constante expansión, donde la falta de procedimientos de mantenimiento y actualización constituye una debilidad estructural.

Los informes de seguridad destacan consistentemente que los *mecanismos de actualización inseguros* y el *firmware/software obsoleto* se encuentran entre las 10 principales vulnerabilidades de IoT [6]. La falta de aplicación de parches y la antigüedad del código base de muchos dispositivos representa un

punto de entrada preferente para los atacantes, siendo a menudo el eslabón más débil de la cadena de seguridad.

Un ejemplo particularmente preocupante de vulnerabilidades en componentes de terceros se reveló en mayo de 2024, cuando se identificaron fallos críticos en la plataforma IoT ThroughTek Kalay (TUTK), afectando a más de cien millones de dispositivos a nivel global, incluyendo cámaras de vigilancia y sistemas de seguridad. La explotación en cadena de estas vulnerabilidades permite comprometer completamente el dispositivo, subrayando cómo un fallo en un componente de terceros puede tener un impacto masivo en todo el ecosistema de productos [7].

Adicionalmente, el firmware desactualizado continúa siendo el principal motor de las botnets IoT, como Mirai, que explotan credenciales por defecto o vulnerabilidades conocidas para reclutar dispositivos y lanzar ataques de denegación de servicio distribuido (DDoS) masivos. Incidentes recientes han documentado ataques DDoS sin precedentes impulsados por routers y dispositivos IoT comprometidos [2], demostrando que el problema no solo persiste, sino que se amplifica con el crecimiento del ecosistema.

Evidencia desde la literatura académica:

Desde una perspectiva más técnica, el estudio «AcT: Attack on Things» de Ibrahim et al. [3] ofrece datos empíricos alarmantes sobre la prevalencia de SDKs vulnerables en el ecosistema de actualizaciones OTA. Los autores analizaron 23 dispositivos IoT comerciales y sus aplicaciones móviles asociadas, identificando seis SDKs de actualización de firmware (DFU, Device Firmware Update) que presentan vulnerabilidades críticas. Mediante un análisis automatizado a gran escala, el estudio reveló que 1,356 aplicaciones disponibles en Google Play Store dependen de estos SDKs vulnerables y que, en conjunto, estas aplicaciones gestionan al menos 61 modelos de dispositivos IoT ampliamente distribuidos. Esta cadena de dependencias inseguras subraya la magnitud del problema: millones de dispositivos en el campo son potencialmente explotables a través de vectores de actualización comprometidos.

Investigaciones recientes sobre IoT industrial [4] confirman estos problemas: firmware que raramente se actualiza tras el despliegue, mecanismos de actualización inseguros, y dispositivos con ciclos de vida de décadas sin mantenimiento adecuado. Todo esto subraya la urgencia de plataformas automatizadas de actualización segura que puedan operar de forma continua a lo largo de toda la vida útil del dispositivo.

La evidencia convergente desde múltiples fuentes establece que las vulnerabilidades en mecanismos de actualización no son casos aislados, sino un problema sistémico que afecta a millones de dispositivos desplegados. Esta constatación motiva el análisis de las soluciones tecnológicas existentes para determinar si abordan adecuadamente estos desafíos.

1.4.2 Plataformas OTA existentes: análisis comparativo

En respuesta a las necesidades documentadas de actualización segura, la comunidad de código abierto y diversos proveedores comerciales han desarrollado plataformas especializadas. Sin embargo, el análisis comparativo revela limitaciones significativas en relación con los requisitos identificados.

SWUpdate [8] es un framework de código abierto para actualizaciones en sistemas Linux embebidos, con soporte para actualizaciones atómicas (esquemas A/B) y firmas RSA/ECDSA, pero sin gestión centralizada de flotas. En resumen, es un software capaz de instalar las actualizaciones de forma segura en el dispositivo, pero no proporciona una solución completa para la gestión de actualizaciones a gran escala. La gran ventaja de SWUpdate es su adaptabilidad gracias a los modulos y su customización.

Eclipse hawkBit [9] ofrece gestión backend de actualizaciones OTA a escala empresarial con rollout progresivo, aunque la seguridad criptográfica depende de la implementación del cliente.

Mender [10] integra cliente y servidor para actualizaciones OTA con gestión de flotas, pero utiliza exclusivamente algoritmos tradicionales (RSA y ECC) sin soporte para criptografía ligera ni post-cuántica.

Balena [11] proporciona gestión de flotas basada en contenedores Docker, introduciendo overhead significativo que lo hace inadecuado para dispositivos muy restringidos.

extbfRAUC [12] es similar a SWUpdate en funcionalidades de actualización atómica, pero tampoco incluye familias de algoritmos criptográficos avanzadas.

La Tabla 1.1 resume las características principales de estas plataformas.

Tabla 1.1: Comparativa de plataformas OTA existentes

Plataforma	Firmas	Cifrado	LWC	PQC	Gestión flota
SWUpdate	Sí	Sí	No	No	Externa
hawkBit	Delegada	Delegado	No	No	Sí
Mender	Sí	Sí	No	No	Sí
Balena	Sí	Sí	No	No	Sí
RAUC	Sí	Sí	No	No	Externa

LWC: Lightweight Cryptography; PQC: Post-Quantum Cryptography

Como se observa, ninguna de las soluciones existentes ofrece soporte simultáneo para criptografía ligera y post-cuántica. Esta carencia representa una limitación significativa dado el crecimiento de dispositivos con recursos extremadamente limitados y la amenaza emergente de la computación cuántica. El presente trabajo se construye sobre SWUpdate como agente de actualización en el dispositivo, aprovechando su madurez y robustez probada, pero extendiéndolo gracias a su personalización y facil agregación de modulos con una capa de gestión centralizada que incorpora las familias de algoritmos criptográficos avanzadas ausentes en las soluciones actuales.

Este análisis revela una brecha clara: mientras existen frameworks robustos para gestión de actualizaciones y organismos de estandarización que han definido familias de algoritmos criptográficos avanzadas, ninguna solución integra ambas. La siguiente subsección examina el estado de estas familias de algoritmos criptográficos emergentes.

1.4.3 Necesidad de algoritmos criptográficos eficientes

La enorme variedad de dispositivos IoT, desde chips minúsculos hasta sistemas potentes, hace que necesitemos diferentes tipos de criptografía. Para las actualizaciones OTA, hay dos familias clave: la criptografía ligera para los dispositivos pequeños, y la post-cuántica para protegernos del futuro.

Criptografía ligera: ASCON y el estándar NIST LWC.

El NIST ha elegido ASCON [13] como el estándar para criptografía ligera. Está hecho a medida para dispositivos con pocos recursos y ofrece cifrado autenticado (AEAD), lo que garantiza que los datos son confidenciales y no han sido modificados.

Para las actualizaciones OTA, ASCON es ideal: es hasta cinco veces más eficiente que AES si no tienes hardware dedicado, consume muy poca memoria y protege tanto el firmware como sus metadatos, evitando ataques de repetición o modificación.

Criptografía post-cuántica: preparación ante amenazas futuras.

Los ordenadores cuánticos son una amenaza real a medio plazo para los algoritmos que usamos hoy (RSA, ECDSA). Como los dispositivos IoT duran muchos años, es de sentido común pensar en esto desde ya.

El NIST ha seleccionado tres esquemas de firma post-cuántica: MLDS (buen equilibrio), Falcon (firmas pequeñas) y SPHINCS+ (muy seguro teóricamente). Las firmas digitales son clave para asegurar que el firmware es auténtico, incluso frente a ataques cuánticos.

Que el NIST haya estandarizado estos algoritmos significa que técnicamente es posible usarlos. Pero integrarlos en plataformas reales va despacio. En este proyecto he elegido MLDS como esquema principal para las firmas digitales, combinándolo con cifrado ligero.

1.5 Objetivos

A partir del análisis de la problemática y lo comentado previamente, se establecen los siguientes objetivos para este Trabajo de Fin de Máster.

1.5.1 Propósito y alcance

Visto el panorama de vulnerabilidades en el ecosistema IoT, las limitaciones de las plataformas OTA existentes y la brecha entre la investigación y la aplicación, este trabajo propone una solución que combina tecnologías consolidadas con algoritmos criptográficos modernos y necesarios.

La estrategia adoptada consiste en utilizar **SWUpdate** como instalador de actualizaciones en el dispositivo, aprovechando su madurez y robustez probada en entornos de producción industrial, pero extendiendo sus capacidades criptográficas para incluir soporte tanto para **algoritmos de criptografía ligera (LWC)** como para **esquemas post-cuánticos**. Esta extensión se integra con una **plataforma de**

gestión centralizada de flotas de dispositivos, diseñada para escalar horizontalmente y proporcionar trazabilidad completa del ciclo de vida de las actualizaciones.

Objetivo general:

Diseñar, implementar y evaluar una plataforma de actualización OTA segura y escalable para dispositivos IoT basada en SWUpdate, extendida con soporte para criptografía ligera (LWC) y post-cuántica, e integrada con una arquitectura de gestión centralizada de flotas, abordando las limitaciones identificadas en soluciones existentes.

Objetivos específicos:

1. **Implementar verificación criptográfica robusta:** Desarrollar mecanismos de firma digital basados en algoritmos tradicionales (RSA/ECDSA) y post-cuánticos (MLDSA) para garantizar la autenticidad e integridad de cada paquete de actualización, mitigando el riesgo de distribución de firmware malicioso documentado en estudios como «AoT: Attack on Things» [3].
2. **Integrar nuevas opciones criptográficas:** Dar soporte a algoritmos ligeros (ASCON) y post-cuánticos (MLDSA), para cubrir tanto dispositivos muy limitados como aquellos que necesitan protegerse del futuro.
3. **Arquitectura escalable en la nube:** Crear una plataforma de gestión que pueda crecer horizontalmente para administrar muchos dispositivos y tener control total sobre las actualizaciones (saber si han fallado, reintentarlas, etc.).
4. **Integrar frameworks maduros de actualización:** Construir la solución sobre SWUpdate como agente de actualización en el dispositivo, aprovechando su robustez probada en entornos de producción industrial mientras se añade la capa de gestión centralizada y las familias de algoritmos criptográficos avanzadas ausentes en su implementación estándar.

1.6 Planificación

Para la consecución de los objetivos de este Trabajo de Fin de Máster, se ha definido un plan de trabajo dividido en tres fases principales, que abarcan desde la investigación inicial hasta el despliegue y validación de la plataforma.

1.6.1 Fase 1: Investigación

El objetivo de esta fase es establecer las bases teóricas y técnicas del proyecto, analizando el estado del arte y seleccionando las tecnologías más adecuadas. En esencia, se busca analizar los estándares actuales, identificar qué algoritmos son usados comúnmente y evaluar las nuevas alternativas disponibles, tal como se ha comentado en la introducción.

1.1 Revisión de estándares actuales. Se realizará un estudio exhaustivo de las normativas y recomendaciones de seguridad vigentes para dispositivos IoT (como las guías de NIST y ETSI), así como de los mecanismos de actualización OTA utilizados actualmente en la industria.

1.2 Evaluación de algoritmos lightweight y post-cuánticos. Se analizarán y compararán diferentes algoritmos criptográficos, poniendo el foco en aquellos de la familia de criptografía ligera (LWC) para dispositivos con recursos limitados y en los esquemas de criptografía post-cuántica (PQC) para garantizar la seguridad a largo plazo.

1.3 Elección de algoritmos para los escenarios planteados. Basándose en la evaluación anterior, se seleccionarán los algoritmos de firma y cifrado más adecuados para los distintos escenarios de uso definidos, equilibrando seguridad y rendimiento.

1.6.2 Fase 2: Diseño e integración de módulos de seguridad para dispositivos IoT

Esta fase constituye el núcleo del desarrollo técnico, donde se diseñan e implementan los componentes de la plataforma. Se incluye el desarrollo del frontend, que es la web que permitirá a los desarrolladores hacer uso de toda la infraestructura.

2.1 Diseño de la arquitectura requerida. Definición de la arquitectura global del sistema, especificando los componentes del backend, la base de datos, la API de comunicación y la estructura del cliente en el dispositivo IoT.

2.2 Integración de algoritmos de cifrado y/o firma. Implementación e integración de las librerías criptográficas seleccionadas en la Fase 1 dentro de los servicios de la plataforma, habilitando las capacidades de firma digital y cifrado de los paquetes de actualización tanto en el backend como en el dispositivo IoT.

2.3 Desarrollo del módulo de distribución segura de actualizaciones. Creación del servicio encargado de gestionar el repositorio de actualizaciones, verificar la autenticidad de las peticiones y distribuir los binarios de forma segura a los dispositivos autorizados.

2.4 Integración de firma y cifrado Backend y Frontend. Desarrollo de la interfaz web (frontend) y su conexión con el backend, permitiendo a los administradores y desarrolladores subir nuevos firmwares, firmarlos criptográficamente y gestionar las campañas de actualización de manera intuitiva.

2.5 Contenerización y despliegue en k8s. Empaque de todos los microservicios de la plataforma en contenedores (Docker) y orquestación de su despliegue en un clúster de Kubernetes (k8s) para garantizar la escalabilidad, disponibilidad y facilidad de gestión.

1.6.3 Fase 3: Automatización de pruebas, despliegue y ciclo de vida

La fase final se centra en la calidad, la automatización y la validación del sistema en entornos realistas.

3.1 Creación o adaptación del pipeline CICD. Implementación de flujos de Integración y Despliegue Continuo (CI/CD) para automatizar la construcción de las imágenes, la ejecución de pruebas y el despliegue de nuevas versiones de la plataforma.

3.2 Definición de tests unitarios y e2e. Desarrollo de una batería de pruebas automatizadas que incluya tests unitarios para validar la lógica de los componentes individuales y tests de extremo a extremo (e2e) para verificar el flujo completo de actualización OTA.

3.3 Monitorización y validación para entornos de desarrollo y producción. Puesta en marcha de herramientas de observabilidad y monitorización para supervisar el rendimiento y la salud del sistema, validando su correcto funcionamiento tanto en entornos de prueba como en producción.

La planificación temporal de estas fases y tareas se detalla en el diagrama de Gantt de la Figura 1.1.

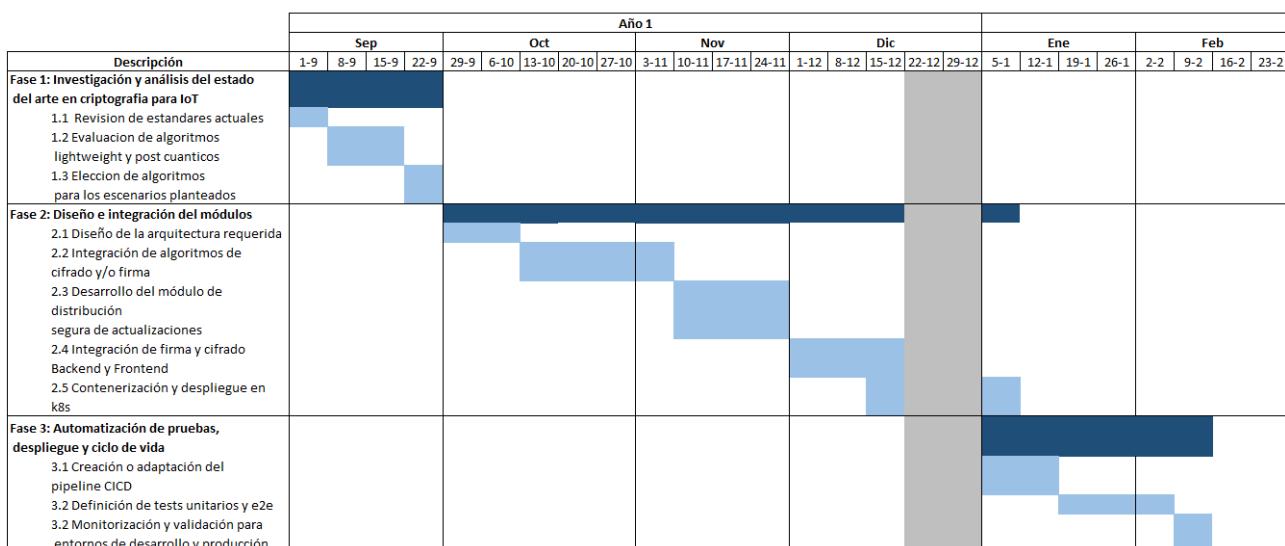


Figura 1.1: Planificación temporal del proyecto (Diagrama de Gantt)

2. Desarrollo

En esta sección se desarrollan los aspectos técnicos y conceptuales que sustentan la plataforma propuesta. En primer lugar se tratarán las bases teóricas de la criptografía simétrica y asimétrica, necesarias para comprender las decisiones de diseño posteriores. A continuación, se explicará la terminología clave y las herramientas empleadas en los flujos de actualización de los dispositivos. Finalmente, se definirá la plataforma de desarrollo propuesta y su modelo de datos.

2.1 Bases teóricas de la criptografía

En el mundo de la seguridad digital, la criptografía desempeña un papel fundamental en el cifrado y descifrado de información. Su objetivo principal es asegurar la confidencialidad e integridad de los datos, protegiéndolos contra accesos no autorizados durante la transmisión o almacenamiento. Esta sección explora los fundamentos de la criptografía, con un énfasis particular en dos formas principales: la criptografía simétrica y asimétrica.

En la criptografía, existen varios términos clave que son fundamentales para entender cómo funciona este campo. A continuación, se definen algunos de los conceptos más básicos:

- **Mensaje:** Es la información original que se desea proteger.
- **Criptograma:** Es el resultado del proceso de cifrado, que oculta el mensaje original utilizando algún algoritmo criptográfico.
- **Criptoanálisis:** Es el estudio de los sistemas criptográficos con el fin de encontrar debilidades que permitan recuperar el mensaje original sin conocer la clave de cifrado.

Por otro lado, existen principios clave que son esenciales para proteger la información y los sistemas informáticos de accesos no autorizados, alteraciones y destrucción. Estos principios son la base de cualquier estrategia de seguridad y son fundamentales para garantizar la protección de los datos. A continuación, se presentan brevemente estos principios:

- **Confidencialidad:** Este principio asegura que la información es accesible solo para aquellas personas autorizadas a tener acceso. Protege los datos de accesos no autorizados y garantiza la privacidad de la información.

- **Integridad:** La integridad se refiere a la exactitud y completitud de la información y los métodos de procesamiento. Este principio asegura que la información no ha sido alterada de manera no autorizada y que se mantiene tal como fue creada, enviada y recibida.
- **No repudio:** Garantiza que una vez realizada una transacción, no se pueda negar su autoría, proporcionando evidencia de la participación de las partes involucradas.
- **Autenticidad:** La autenticidad garantiza que las transacciones, las comunicaciones y los datos son genuinos y que las identidades de las partes involucradas son verificadas. Este principio evita la suplantación de identidad y asegura que los datos provienen de una fuente legítima.

2.1.1 Criptografía simétrica

La criptografía simétrica, también conocida como criptografía de clave secreta, es un método de cifrado donde se utiliza la misma clave tanto para cifrar como para descifrar la información. Esta clave debe ser compartida entre el emisor y el receptor de manera segura antes de iniciar la comunicación.

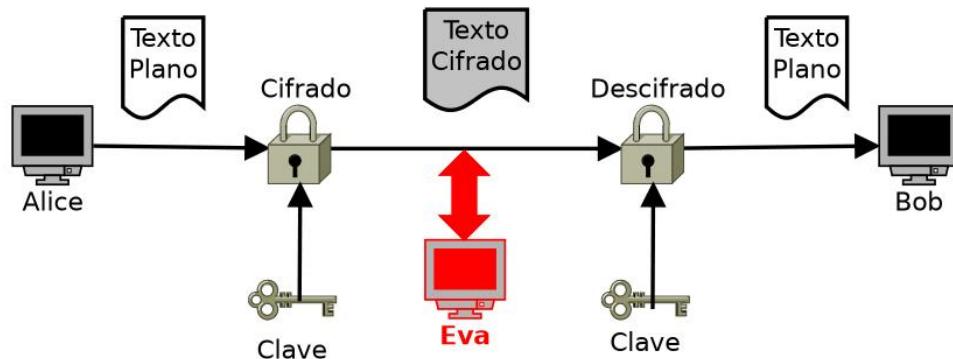


Figura 2.1: Uso de cifrado simétrico

Un ejemplo clásico de cifrado simétrico es el cifrado César, que consiste en desplazar cada letra del mensaje n posiciones en el alfabeto:

$$E(x) = (x + n) \bmod 26$$

Asumiendo que n es 1 y x la posición de la letra en el abecedario, la palabra “Hola” pasaría a ser “Ipmb”. En este caso, la clave sería el número de posiciones a desplazar.

La criptografía simétrica presenta ciertas limitaciones importantes:

- **Distribución de claves:** La clave debe ser transmitida de manera segura entre ambas partes. Si

la clave es interceptada por un tercero, toda la comunicación cifrada con esa clave se vuelve insegura.

- **Escalabilidad:** A medida que el número de participantes aumenta, el manejo de claves se vuelve más complejo, ya que cada par de usuarios necesita una clave única y segura.

Desde la perspectiva de la computación cuántica, el cifrado simétrico goza de una posición relativamente privilegiada. Según el NIST, algoritmos simétricos como AES-256 siguen siendo seguros a largo plazo incluso ante amenazas de computación cuántica [13]. Esto se debe a que el algoritmo de Grover, que es el ataque cuántico más efectivo contra criptografía simétrica, reduce la seguridad efectiva a la mitad del tamaño de clave. Por ejemplo, una clave de 256 bits proporciona una seguridad equivalente a 128 bits ante un ataque cuántico, lo que sigue siendo considerado seguro por el NIST para aplicaciones sensibles.

Sin embargo, en el contexto de dispositivos IoT con recursos limitados, algoritmos como ASCON ofrecen ventajas adicionales. ASCON proporciona una variante de 80 bits de seguridad cuántica (ASCON-80pq) específicamente diseñada para resistir ataques cuánticos mientras mantiene un consumo eficiente de recursos [13]. Esta característica lo hace particularmente atractivo para entornos donde tanto la eficiencia computacional como la resistencia cuántica son requisitos críticos.

2.1.1.1. Autenticación usando cifrado simétrico: AEAD

Para superar algunas de las limitaciones del cifrado simétrico básico y proporcionar mayor seguridad, se utilizan modos de cifrado avanzados como AEAD (Authenticated Encryption with Associated Data). AEAD combina el cifrado con la autenticación en una sola operación, garantizando tanto la confidencialidad como la integridad de los datos.

AEAD opera con tres componentes principales:

- **Clave secreta:** Compartida entre emisor y receptor.
- **Datos a cifrar (plaintext):** El mensaje original.
- **Datos asociados (associated data):** Información adicional que debe autenticarse pero no cifrarse, como encabezados de protocolo.

El proceso de AEAD produce dos salidas:

- **Criptograma:** Los datos cifrados.
- **Tag de autenticación:** Un código que verifica la integridad de los datos y los datos asociados.

Durante el descifrado, el receptor verifica el tag de autenticación. Si coincide, los datos son válidos y no han sido alterados; de lo contrario, se rechaza el mensaje. Esto previene ataques como la manipulación de datos o la repetición de mensajes.

Un ejemplo de algoritmo AEAD ampliamente utilizado es AES-GCM (Advanced Encryption Standard - Galois/Counter Mode), que combina AES para el cifrado con el modo GCM para la autenticación. Este enfoque es fundamental en protocolos seguros como TLS para proteger las comunicaciones en internet.

2.1.2 Criptografía asimétrica

La criptografía asimétrica introduce un enfoque diferente mediante el uso de un par de claves: una pública y una privada. La clave pública, como su nombre indica, se puede compartir abiertamente, mientras que la clave privada se mantiene en secreto por el usuario.

La característica fundamental es que lo que es cifrado utilizando la clave pública solo puede ser descifrado por su correspondiente clave privada, y viceversa. Esta relación matemática permite establecer comunicaciones seguras sin necesidad de compartir una clave secreta previamente.

- **Cifrado:** $C = E_{k_{\text{pública}}}(M)$
- **Descifrado:** $M = D_{k_{\text{privada}}}(C)$

La criptografía de clave pública y privada se puede entender mediante el símil de una caja con dos cerraduras, cada una correspondiente a una llave. Inicialmente, cualquiera de las dos llaves puede cerrar la caja, pero para abrirla se debe utilizar la llave opuesta. Imaginemos el siguiente escenario con Alice y Bob. Para este ejemplo, Bob tiene dos tipos de llaves: una pública y otra privada. La clave pública la hará disponible para todos, haciendo copias de ella y dándoselas a cualquiera que la pida. La clave privada, en cambio, será mantenida en secreto y solo Bob dispondrá de ella (ver [Figura 2.2](#)).



Figura 2.2: Creación de las llaves por parte de Bob

2.1.2.1. Cifrado con clave pública (Confidencialidad)

1. **Cerrando la caja (Encriptación con la clave pública):** Alice quiere enviar un mensaje confidencial a Bob. Para hacerlo, primero coloca el mensaje en la caja, y posteriormente utiliza la llave pública de Bob para cerrarla. Al cerrar la caja con la llave pública de Bob, Alice garantiza que solo Bob podrá abrirla, dado que solo él posee la llave privada correspondiente (ver [Figura 2.3](#)).

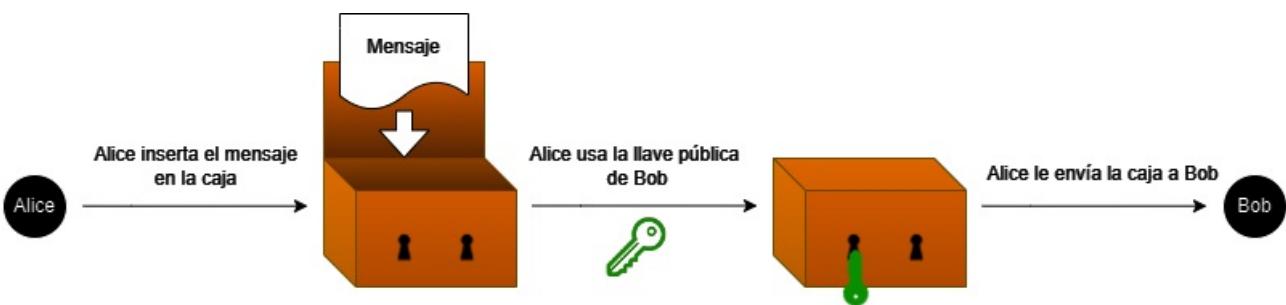


Figura 2.3: Alice introduce el mensaje en la caja y la cierra con la clave pública de Bob.

2. **Abriendo la caja (Descifrado con la clave privada):** Cuando Bob recibe la caja cerrada, utiliza su llave privada para abrirla. Esta llave privada es única y está en su exclusiva posesión. Nadie más puede abrir la caja porque no disponen de la llave privada de Bob (ver [Figura 2.4](#)).



Figura 2.4: Bob abre la caja y obtiene el mensaje.

2.1.2.2. Cifrado con clave privada (Autenticidad)

En el ejemplo anterior se ha demostrado cómo la criptografía asimétrica puede garantizar la confidencialidad. Además, puede garantizar la autenticidad. Para ello, veamos el siguiente ejemplo donde Bob quiere enviarle un mensaje a Alice y demostrar que es Bob realmente el que lo ha escrito.

1. **Cerrando la caja (Encriptación con la llave privada):** Bob coloca el mensaje en la caja y la cierra utilizando su llave privada (ver [Figura 2.5](#)). Esto asegura que cualquier persona con acceso a su llave pública puede abrir la caja y leer el mensaje, pero garantiza que solo Bob pudo haberla cerrado, ya que solo él posee la llave privada.

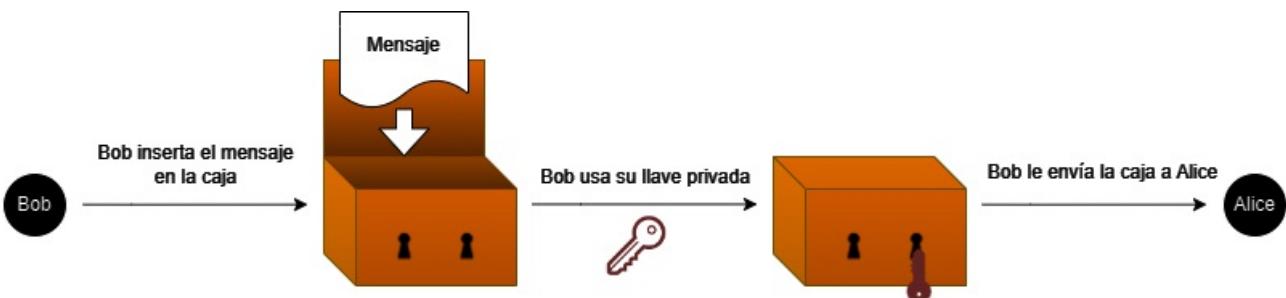


Figura 2.5: Bob inserta el mensaje y usa su llave privada.

2. **Abriendo la caja (Descifrado con la clave pública):** Alice recibe la caja y utiliza la clave pública de Bob para abrirla (ver Figura 2.6). Al hacerlo, Alice puede estar segura de que el mensaje fue realmente enviado por Bob, ya que solo la llave pública de Bob puede abrir la caja que fue cerrada con su llave privada. Esto proporciona autenticidad y no repudio, ya que Bob no puede negar haber enviado el mensaje.



Figura 2.6: Alice utiliza la clave pública de Bob para abrir la caja y verificar la autenticidad del mensaje.

Mediante estos dos mecanismos, la criptografía asimétrica ofrece no solo confidencialidad, sino también no repudio y autenticidad.

2.1.3 Principios de seguridad asegurados con cifrado asimétrico

Con el cifrado asimétrico únicamente se logran los siguientes principios:

- **Confidencialidad:** Se cumple, ya que el cifrado asimétrico permite proteger los datos para que solo sean accesibles por las personas autorizadas con la clave privada correspondiente.
- **Integridad:** No se puede asegurar completamente, ya que no hay un mecanismo inherente en el cifrado asimétrico que garantice que los datos no han sido alterados.
- **No repudio:** No se puede garantizar completamente, ya que el cifrado asimétrico por sí solo no proporciona una manera de evitar que una de las partes niegue haber realizado una acción.
- **Autenticidad:** No se puede asegurar completamente, ya que el cifrado asimétrico por sí solo no proporciona un método para verificar la identidad de manera confiable en una comunicación no física.

Es decir, solo podemos verificar la confidencialidad de los datos. En los siguientes apartados se verán los métodos existentes para cumplir el resto de principios.

2.1.4 Firma digital

Una firma digital es un mecanismo de seguridad electrónica que imita la funcionalidad de una firma manuscrita en el entorno digital. Utiliza la criptografía asimétrica.

Al firmar digitalmente un documento o mensaje, se utiliza la clave privada para generar un código único (la firma) basado en el contenido del mensaje mediante una función hash¹. Este código se adjunta después al mensaje o documento. Cuando el receptor obtiene el mensaje firmado, puede usar la clave pública del remitente para verificar si la firma es válida.

Para crear la firma se siguen los siguientes pasos:

- **Creación del hash:** Primero, el remitente crea un resumen del mensaje original utilizando una función hash criptográfica.
- **Firmado del hash:** A continuación, el remitente cifra el hash del mensaje con su clave privada. La firma digital no es el cifrado completo del mensaje, sino el cifrado del hash del mensaje.
- **Adjuntar al mensaje:** El hash cifrado (la firma) se adjunta al mensaje original. Este mensaje firmado se puede enviar al receptor.

Y para verificar la firma:

- **Separar la firma y el mensaje.**
- **Descifrar la firma:** El receptor utiliza la clave pública del remitente para descifrar la firma, obteniendo así el hash del mensaje que el remitente calculó.
- **Calcular el hash del mensaje:** El receptor calcula el hash del mensaje recibido utilizando la misma función hash que usó el remitente.
- **Comparar los hashes:** El receptor compara el hash que acaba de calcular con el hash descifrado de la firma. Si ambos hashes coinciden, la firma es válida; esto significa que el mensaje no ha sido alterado y que el remitente es quien dice ser.

De esta manera se puede garantizar la autenticidad, la integridad y el no repudio:

- **Integridad:** Si la verificación es exitosa, se puede estar seguro de que el mensaje no ha sido alterado desde que fue firmado.
- **Autenticidad:** Al verificar con éxito la firma digital, se confirma que el mensaje fue realmente enviado por quien posee la clave privada correspondiente.
- **No Repudio:** Una vez enviado un mensaje firmado digitalmente, el remitente no puede negar haberlo enviado, ya que la firma digital creada con su clave privada es única y verificable por cualquier persona que tenga su clave pública.

Al combinar esto con el cifrado asimétrico convencional, también se garantiza la confidencialidad. Sin embargo, la autenticidad completa solo se puede lograr con la introducción de autoridades certificadoras (CA), que se discutirá a continuación.

¹Una función hash convierte datos de cualquier tamaño en una cadena de texto de tamaño fijo, conocida como hash. Cada conjunto único de datos produce un hash único, y cualquier cambio en los datos cambia el hash.

2.1.5 Autoridades Certificadoras y certificados digitales

En las comunicaciones digitales, es crucial garantizar que las partes involucradas sean quienes dicen ser. Aquí es donde entra en juego la Autoridad Certificadora (CA). Una CA es una entidad de confianza que emite certificados digitales, los cuales verifican la identidad de los individuos, servidores u otras entidades. Sin una CA, sería muy difícil establecer una relación de confianza en entornos donde las partes no se conocen previamente.

2.1.5.1. Autoridad Certificadora

Una Autoridad Certificadora (CA) es una organización responsable de emitir y gestionar certificados digitales. La CA actúa como un tercero de confianza en el ecosistema de la infraestructura de clave pública (PKI). Su papel principal incluye:

- Verificar la identidad de las entidades que solicitan un certificado digital.
- Emitir certificados digitales que enlazan una clave pública con la identidad del solicitante.
- Revocar certificados digitales si ya no son válidos o se comprometen.
- Publicar listas de certificados revocados (CRL).

2.1.5.2. Certificado digital

Un certificado digital es un documento electrónico que utiliza una firma digital para enlazar una clave pública con la identidad del propietario del certificado. Esto se consigue firmando la clave pública del propietario del certificado con la clave privada de la autoridad certificadora. Un certificado digital contiene varios campos clave:

- **Nombre del propietario:** Identifica al propietario del certificado.
- **Clave pública del propietario:** La clave pública asociada con el propietario.
- **Nombre de la CA:** La entidad que emitió el certificado.
- **Firma digital de la CA:** La firma digital de la CA que valida el certificado.
- **Período de validez:** Las fechas de inicio y expiración del certificado.
- **Número de serie del certificado:** Un número único para identificar el certificado.

Los certificados digitales siguen el estándar X.509, que establece el formato y las reglas para su emisión y procesamiento en sistemas de infraestructura de clave pública (PKI).

2.1.5.3. Proceso de Verificación de Certificados

1. **Firma del Certificado:** La CA utiliza su clave privada para firmar el certificado digital del propietario.
2. **Verificación del Certificado:** Cualquier entidad que reciba el certificado puede usar la clave pública de la CA (generalmente disponible y conocida) para verificar la firma del certificado. Si la verificación es exitosa, se confía en la identidad del propietario del certificado.

2.1.5.4. Jerarquía de las Autoridades Certificadoras

Las CA se organizan en una jerarquía, donde las CA de nivel superior, la CA raíz (root CA), firman los certificados de las CA subordinadas (CA intermedio), y estas, a su vez, pueden firmar certificados para usuarios finales o servidores. Esto crea una cadena de confianza que puede ser verificada siguiendo el camino desde un certificado de usuario final hasta la raíz CA.

En la [Figura 2.7](#), se presenta un diagrama que ilustra esta jerarquía:

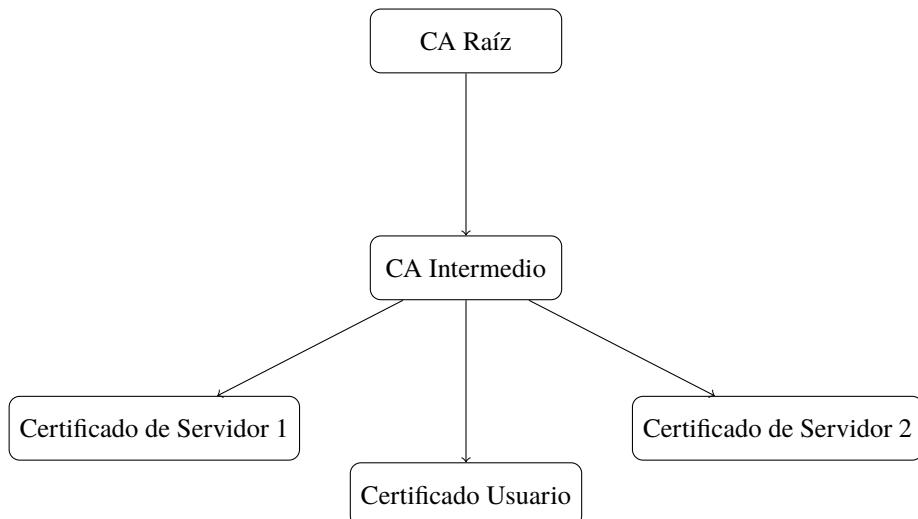


Figura 2.7: Jerarquía de las Autoridades Certificadoras.

2.2 Elección de algoritmos criptográficos

Para este proyecto, la selección de algoritmos criptográficos se ha basado en las necesidades actuales del ecosistema IoT y en la gran diversidad de dispositivos que lo componen. El panorama IoT abarca desde microcontroladores con recursos extremadamente limitados (pocos kilobytes de RAM y MHz de procesamiento) hasta dispositivos más potentes como gateways o sistemas embebidos basados en Linux. Esta heterogeneidad hace inviable la adopción de una única solución criptográfica que se adapte óptimamente a todos los escenarios.

Actualmente, el estándar de facto para el cifrado simétrico es AES (Advanced Encryption Standard).

Este algoritmo es extremadamente robusto y eficiente en plataformas que disponen de recursos suficientes, especialmente aquellas que cuentan con aceleración por hardware (instrucciones AES-NI o similares). Sin embargo, en dispositivos restringidos sin soporte hardware específico, la implementación de AES puede resultar costosa en términos de ciclos de reloj, consumo de energía y uso de memoria, además de ser susceptible a ataques de canal lateral si no se implementa con complejas contramedidas.

En el ámbito de la criptografía asimétrica, y específicamente en lo referente a la firma digital, los estándares actuales más utilizados son RSA y ECDSA. Este último, basado en curvas elípticas, destaca por su eficiencia frente a RSA, permitiendo longitudes de clave mucho menores para un mismo nivel de seguridad. Adicionalmente, en este proyecto se tiene la intención de añadir soporte para MLD-SA (Module-Lattice-Based Digital Signature Standard), un algoritmo de firma post-cuántica que será detallado más adelante.

Por esta razón, se ha decidido ofrecer soporte para múltiples familias de algoritmos, permitiendo que cada despliegue seleccione la opción más adecuada según las capacidades del hardware objetivo.

2.2.1 ASCON: Estándar de criptografía ligera

ASCON ha sido seleccionado por el NIST (National Institute of Standards and Technology) como el estándar oficial de criptografía ligera para dispositivos con recursos limitados, publicado en la especificación NIST SP 800-232 [14]. Esta selección consiste en un proceso de evaluación de varios años en el que ASCON demostró un equilibrio óptimo entre seguridad, eficiencia y versatilidad.

ASCON es una familia de algoritmos que proporciona:

- **Cifrado autenticado (AEAD):** Garantiza confidencialidad e integridad en una sola operación.
- **Funciones hash:** Para verificación de integridad y generación de resúmenes criptográficos.
- **Autenticación de mensajes (MAC):** Para verificar la autenticidad sin cifrado.

Ascon cuenta con 3 variantes principales:

- **Ascon-128:** La variante estándar que ofrece 128 bits de seguridad simétrica. Ideal para la mayoría de las aplicaciones IoT.
- **Ascon-128a:** Versión alternativa de alto rendimiento, que sacrifica ligeramente el tamaño del código por una mayor velocidad de procesamiento.
- **Ascon-80pq:** Variante de seguridad post-cuántica (post-quantum), diseñada con una clave de 160 bits para abordar desafíos de seguridad futuros.

2.2.1.1. Ventajas de rendimiento frente a AES

Según los benchmarks realizados por los autores de ASCON en el documento *Status Update on Ascon v1.2* [15], el algoritmo presenta ventajas significativas en dispositivos sin aceleración hardware para AES:

- **Velocidad:** ASCON es entre 2 y 5 veces más rápido que AES-GCM en implementaciones software sobre microcontroladores de 8, 16 y 32 bits sin instrucciones AES dedicadas.
- **Tamaño de código:** La implementación de ASCON requiere significativamente menos memoria de programa que AES, lo cual es crítico en dispositivos con flash limitada.
- **Uso de RAM:** El estado interno de ASCON (320 bits) es compacto, reduciendo el consumo de memoria durante las operaciones criptográficas.
- **Tamaño de clave:** ASCON opera con claves de 128 bits, ofreciendo un nivel de seguridad adecuado teniendo en cuenta el objetivo de este, la criptografía ligera.

2.2.1.2. Validación experimental

Para validar la elección de ASCON, se decidió realizar pruebas experimentales en dos dispositivos representativos de entornos IoT con recursos limitados y sin aceleración por hardware para criptografía: una Raspberry Pi 3 [16] y un Arduino UNO R4 [17].

La implementación utilizada para las pruebas es la oficial de ASCON (versión 1.3.0) disponible en GitHub [18], la cual es la recomendada por el NIST [19].

Las pruebas en la Raspberry Pi 3 han consistido en el cifrado y descifrado de un fichero de 100 MB. Para asegurar la fiabilidad de los datos y reducir la variabilidad, se ejecutaron 100 iteraciones de cada prueba.

En el caso del Arduino, debido a las limitaciones inherentes de un microcontrolador, las pruebas fueron más restringidas. Se procedió probando con tamaños de texto plano (*plaintext*) incrementales, desde pocos bytes hasta el límite permitido por la memoria del dispositivo.

Los resultados obtenidos para la Raspberry Pi 3 se muestran en la Figura 2.8.

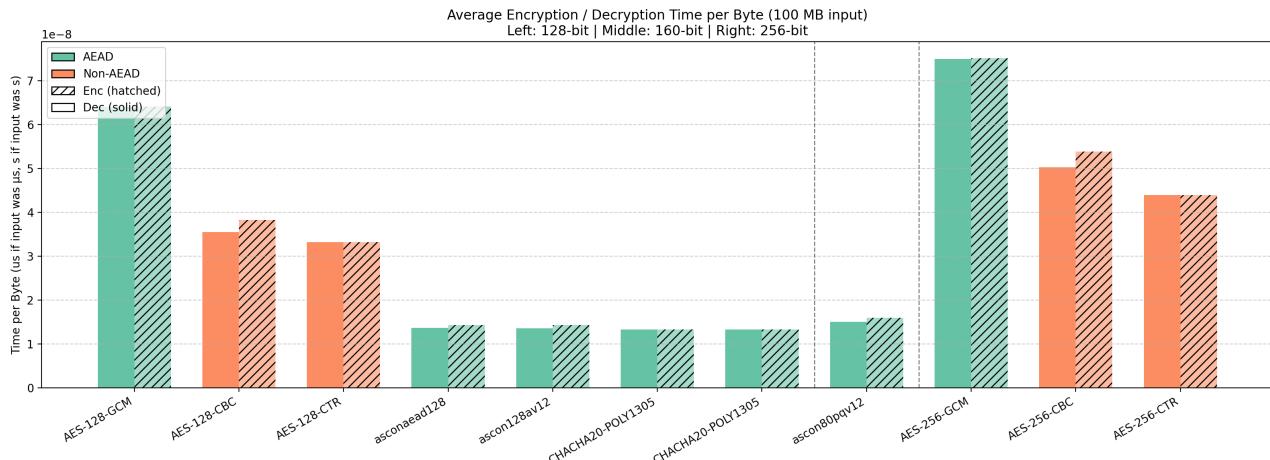


Figura 2.8: Resultados de rendimiento en Raspberry Pi 3

Como se puede observar, ASCON confirma su superioridad frente a las variantes de AES, siendo entre 2 y 5 veces más rápido en este entorno sin aceleración hardware. Además, su rendimiento es equiparable al de ChaCha20-Poly1305, otro algoritmo conocido por su eficiencia en software.

Por otro lado, en el entorno más restringido del Arduino, los resultados son mucho más favorables para ASCON en todos los sentidos, como se aprecia en la Figura 2.9.

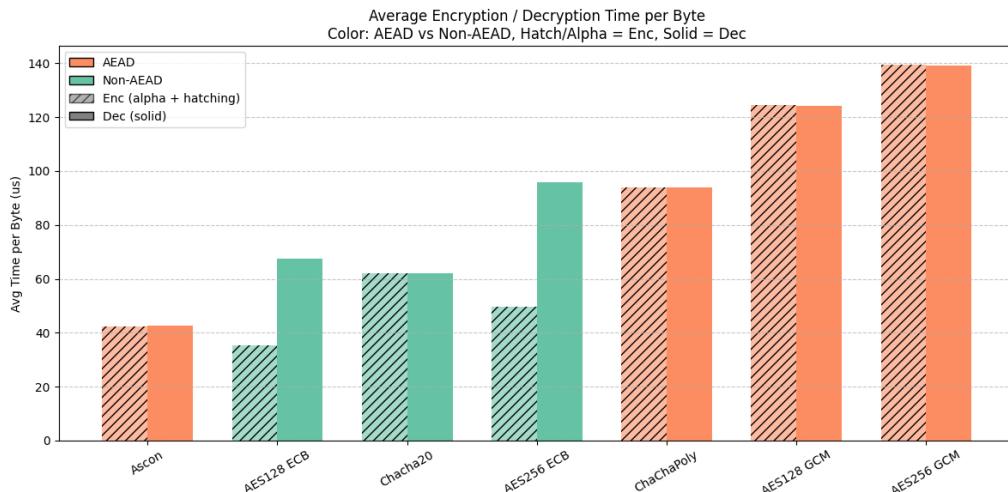


Figura 2.9: Resultados de rendimiento en Arduino UNO R4

ASCON resulta ser el claro ganador. Además, es importante destacar la eficiencia en el uso de memoria. En la Figura 2.10 se muestra cómo ASCON permite cifrar y descifrar bloques de texto plano más grandes que el resto de algoritmos antes de agotar los recursos del microcontrolador, lo cual se atribuye a su menor consumo de memoria RAM.

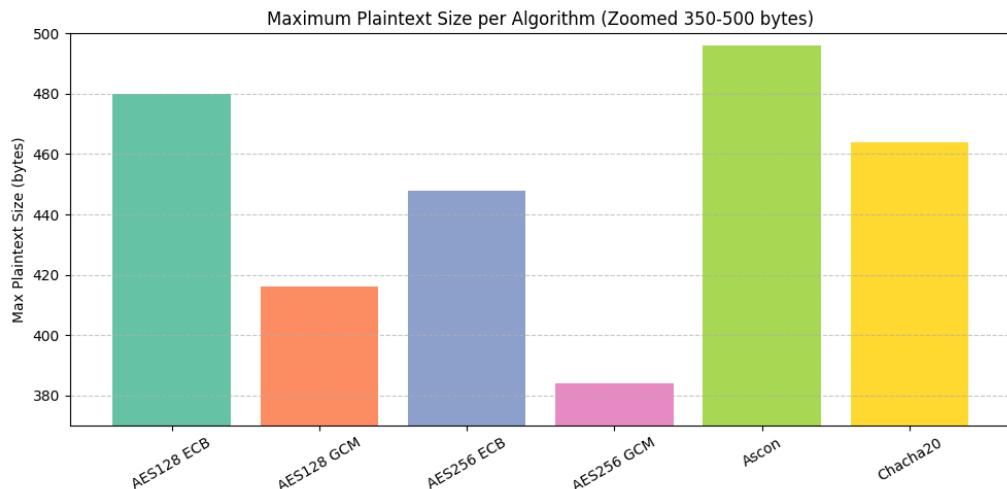


Figura 2.10: Tamaño máximo de texto plano admitido en Arduino

Adicionalmente, al considerar el uso de ASCON como algoritmo AEAD, el tamaño del tag y los bytes adicionales que se añaden al texto plano son aspectos cruciales a evaluar. En la [Figura 2.11](#) se ilustra la cantidad de bytes extra requeridos por cada algoritmo en comparación con el texto plano original. ASCON ocupa la mejor posición con solo 16 bytes adicionales, junto con AES-CTR y ChaCha20 sin autenticación.

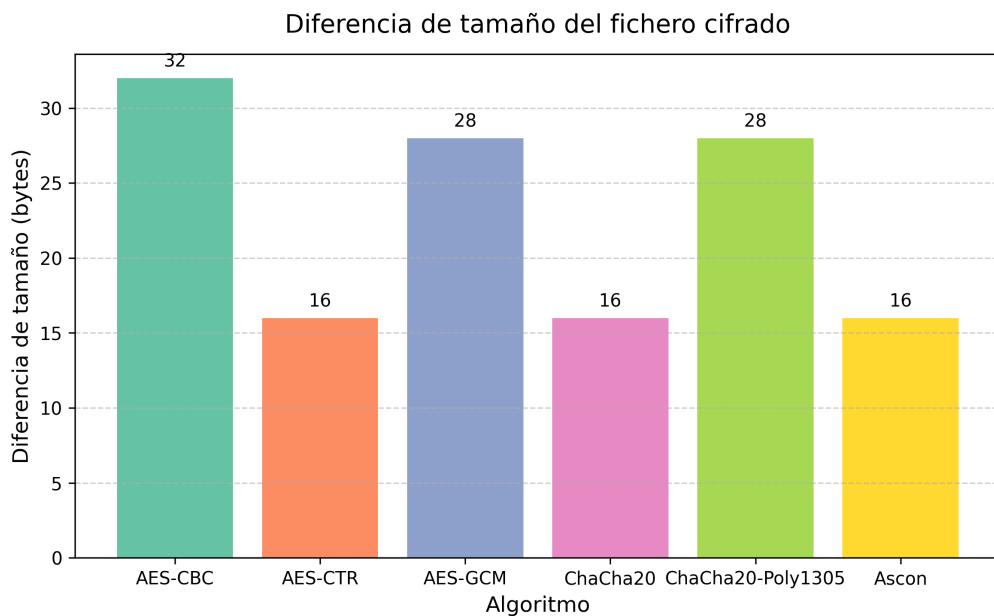


Figura 2.11: Bytes adicionales requeridos por algoritmos AEAD

2.2.1.3. Consideraciones de seguridad post-cuántica

Más allá de las ventajas de rendimiento, ASCON ofrece también protección contra amenazas futuras derivadas del desarrollo de computadores cuánticos. Según el NIST, algoritmos simétricos como AES-256 siguen siendo seguros a largo plazo incluso ante amenazas de computación cuántica [13].

Esto se debe a que el algoritmo de Grover, que es el ataque cuántico más efectivo contra criptografía simétrica, reduce la seguridad efectiva a la mitad del tamaño de clave. Por ejemplo, una clave de 256 bits proporciona una seguridad equivalente a 128 bits ante un ataque cuántico, lo que sigue siendo considerado seguro por el NIST para aplicaciones sensibles.

Sin embargo, ASCON-80pq proporciona una protección algo más robusta. Esta variante está específicamente diseñada con una clave de 160 bits para garantizar 80 bits de seguridad efectiva incluso ante ataques cuánticos basados en el algoritmo de Grover [13]. Si bien no es la variante más recomendada para entornos con recursos abundantes, donde AES-256 ofrecería una mayor seguridad a largo plazo, no está mal considerada, especialmente en dispositivos con recursos limitados o en entornos IoT donde la eficiencia computacional es un factor crítico. Esta característica lo hace particularmente atractivo para entornos IoT donde tanto la eficiencia computacional como la resistencia cuántica a largo plazo son requisitos críticos.

2.2.1.4. Seguridad post cuantica en la firma digital: MLDSA

El panorama es significativamente diferente en el caso de la criptografía asimétrica. El algoritmo de Shor [20], propuesto en 1997, demostró teóricamente que los sistemas criptográficos asimétricos actuales, como RSA y ECDSA, son completamente vulnerables a un computador cuántico suficientemente potente. Este algoritmo puede factorizar números grandes y resolver logaritmos discretos en tiempo polinómico, haciendo que los métodos de clave pública actuales sean obsoletos ante una amenaza cuántica.

En respuesta a esta amenaza, el NIST ha recomendado la transición hacia algoritmos basados en retículos (lattice-based cryptography). Para firmas digitales, el estándar recomendado es MLDSA (Module-Lattice-Based Digital Signature Algorithm), estandarizado en el FIPS 204 [21]. MLDSA ofrece seguridad matemáticamente resistente a ataques cuánticos mientras mantiene una eficiencia computacional aceptable para la mayoría de aplicaciones, incluyendo dispositivos con recursos limitados.

Si bien la transición no es urgente, dado que actualmente no existen computadores cuánticos capaces de ejecutar el algoritmo de Shor a escala práctica y todas las firmas verificadas hoy en día permanecen seguras, realizar el salto hacia algoritmos post-cuánticos es altamente recomendado para garantizar la seguridad a largo plazo.

La combinación de cifrado simétrico resistente a la computación cuántica (ASCON-80pq para confidencialidad) con firmas digitales basadas en retículos (MLDSA para autenticidad) constituye un enfoque integral para garantizar la seguridad criptográfica a largo plazo, tanto ante amenazas actuales como futuras.

2.3 Actualizaciones de software en sistemas embebidos

La capacidad de actualizar el software de manera remota y segura (OTA - Over-The-Air) nos permiten, no solo corregir errores y vulnerabilidades de seguridad, sino también desplegar nuevas funcionalida-

des durante la vida útil del dispositivo.

Para comprender el diseño del sistema de actualizaciones propuesto, es necesario definir primero algunos conceptos clave del ecosistema Linux embebido.

2.3.1 Conceptos fundamentales

2.3.1.1. Yocto Project

El Proyecto Yocto es un proyecto de colaboración de código abierto que ayuda a los desarrolladores a crear sistemas personalizados basados en Linux para productos embebidos, independientemente de la arquitectura del hardware. Proporciona un conjunto flexible de herramientas y un espacio en el que los desarrolladores de sistemas embebidos de todo el mundo pueden compartir tecnologías, pilas de software, configuraciones y mejores prácticas que se pueden utilizar para crear imágenes de Linux personalizadas para dispositivos embebidos.

En la terminología de Yocto, se definen conceptos clave como *recipes* (recetas), que son archivos que describen cómo obtener, configurar, compilar e instalar un paquete de software, y *layers* (capas), que agrupan recetas relacionadas. Este sistema permite generar imágenes de sistema completas, incluyendo el bootloader, el kernel y el rootfs, de manera reproducible y controlada.

2.3.1.2. Bootloader

El *bootloader* o gestor de arranque es el primer programa que se ejecuta cuando se enciende el dispositivo. Su responsabilidad principal es inicializar el hardware esencial (CPU, memoria RAM, relojes) y cargar el sistema operativo (kernel de Linux) en la memoria para su ejecución.

En el contexto de las actualizaciones OTA, el bootloader juega un papel crítico: es el componente encargado de decidir qué partición del sistema operativo se debe arrancar. Esto permite, por ejemplo, arrancar desde una nueva versión del software tras una actualización exitosa o volver a la versión anterior si la nueva falla. U-Boot (Universal Boot Loader) es el estándar de facto en sistemas Linux embebidos debido a su flexibilidad y soporte para múltiples arquitecturas.

2.3.1.3. Rootfs (Sistema de archivos raíz)

El *rootfs* o sistema de archivos raíz es la estructura de directorios que contiene todos los archivos necesarios para que el sistema operativo funcione, incluyendo bibliotecas, binarios, archivos de configuración y las aplicaciones del usuario. En sistemas embebidos robustos, es común que el rootfs se monte en modo de solo lectura (*read-only*) durante la operación normal. Esto protege la integridad del sistema frente a cortes de energía repentinos o corrupción de datos, asegurando que el dispositivo siempre arranque en un estado conocido.

2.3.1.4. Estrategia de actualización A/B

La estrategia de actualización A/B, también conocida como de doble partición o *dual-copy*, es el mecanismo más robusto para garantizar actualizaciones seguras y atómicas. El almacenamiento del dispositivo se divide en dos conjuntos idénticos de particiones (Slot A y Slot B) para el sistema operativo (kernel y rootfs).

El funcionamiento es el siguiente:

- El dispositivo arranca y opera desde una de las particiones (por ejemplo, Slot A), que se considera la partición “activa”.
- Cuando se recibe una actualización, esta se instala en la partición inactiva (Slot B), sin interrumpir el funcionamiento del sistema.
- Una vez completada la instalación, se instruye al bootloader para que intente arrancar desde el Slot B en el próximo reinicio.
- Si el arranque del Slot B es exitoso, se marca como la nueva partición activa. Si falla (por ejemplo, el sistema se cuelga o no pasa los tests de arranque), el bootloader revierte automáticamente al Slot A, garantizando que el dispositivo siga operativo.

Este mecanismo proporciona redundancia y asegura que el dispositivo nunca quede inutilizado por una actualización fallida o corrupta, como se ilustra en la Figura 2.12.

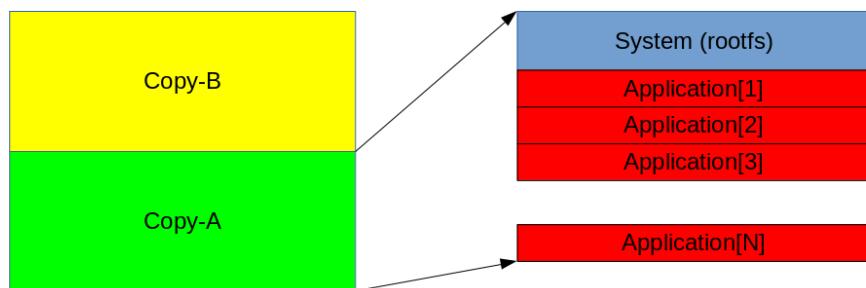


Figura 2.12: Proceso de instalación de actualización A/B.

2.3.2 SWUpdate: Gestor de actualizaciones

SWUpdate es un framework de actualización de software de código abierto diseñado específicamente para sistemas Linux embebidos. A diferencia de gestores de paquetes tradicionales como *apt* o *dnf*, que

actualizan archivos individuales, SWUpdate está orientado a la actualización de imágenes completas del sistema o particiones, lo cual es ideal para garantizar la consistencia en dispositivos IoT. Cabe destacar que SWUpdate es una de las soluciones recomendadas por el Proyecto Yocto para realizar actualizaciones de sistema completas y seguras [22].

SWUpdate actúa como un agente que se ejecuta en el dispositivo y gestiona todo el proceso de actualización. Sus principales características y cualidades incluyen:

- **Soporte para actualizaciones A/B:** Se integra nativamente con el bootloader (como U-Boot) para gestionar el cambio de particiones y el mecanismo de *fallback* en caso de fallo.
- **Actualizaciones atómicas:** Garantiza que el sistema se actualice completamente o no se actualice en absoluto, evitando estados inconsistentes.
- **Streaming:** Permite instalar la actualización mientras se descarga, sin necesidad de almacenar el archivo completo en el almacenamiento local. Esto es crucial en dispositivos con memoria flash limitada.
- **Seguridad:** Soporta la verificación de imágenes firmadas digitalmente (utilizando RSA, CMS o claves simétricas) y el descifrado de imágenes, asegurando que solo software auténtico y autorizado pueda ser instalado.
- **Flexibilidad:** Es altamente configurable y soporta múltiples fuentes de actualización (USB, red, OTA) y formatos de imagen (raw, comprimidos con zstd/gzip, etc.).

En este proyecto, SWUpdate se utiliza como el componente central en el lado del dispositivo para orquestar la descarga, verificación e instalación de las nuevas versiones de firmware.

2.3.2.1. Arquitectura modular

Una de las características más destacadas de SWUpdate es su arquitectura altamente modular. El sistema dispone de gran cantidad de módulos o "handlers" que permiten gestionar diferentes tipos de artefactos (imágenes de disco, archivos, scripts, bootloaders) y comunicarse con diversos backends de gestión (SurBit, Hawkbit, servidores web genéricos, etc.).

En este proyecto en específico, se ha hecho uso del módulo **WFX** [23]. Este módulo actúa como unión con el gestor de actualizaciones central c, encargándose de la comunicación con la plataforma de gestión en la nube donde WFX está ejecutado. A través del módulo WFX, el dispositivo puede consultar la disponibilidad de nuevas versiones, descargar los paquetes de actualización y reportar el estado final del proceso. El módulo WFX tiene soporte para dos tipos de actualizaciones: directo y por fases, donde el segundo requiere actividad del desarrollador. De todos modos, esto se detallará más en profundidad en la siguiente sección en conjunto con la herramienta WFX.

2.3.2.2. Formato de paquete .swu y descriptor

El paquete de actualización que maneja SWUpdate es un archivo con extensión .swu. Técnicamente, un archivo .swu es un contenedor en formato CPIO (*Copy In, Copy Out*) que agrupa todos los elementos necesarios para la actualización. Dentro de este contenedor se encuentran:

- **Imágenes de software:** Los binarios, sistemas de archivos o archivos individuales que se van a instalar (por ejemplo, imágenes raw o archivos de firmware).
- **Scripts:** Scripts de pre-instalación o post-instalación si son necesarios.
- **Descriptor (sw-description):** El archivo más importante, que describe el contenido del paquete y las reglas de instalación.

El archivo sw-description utiliza una sintaxis basada en *libconfig* y define metadatos como la versión, compatibilidad de hardware y la lista de archivos a instalar. A continuación se muestra un ejemplo de un descriptor básico:

```
software =
{
    version = "1.2";
    reboot = false;
    description = "Update vnull - OTA patch";
    hardware-compatibility: [ "1.0", "1.2", "1.3" ];

    ecs = {
        files: (
            {
                filename = "fichero";
                path = "/ruta/fichero";
                type = "rawfile";
            }
        );
    }
}
```

En este ejemplo, se define una actualización versión «1.2» compatible con varias revisiones de hardware. La sección ecs (que podría ser cualquier nombre de agrupación) contiene una lista de archivos, en este caso un único archivo de tipo rawfile que se copiará a la ruta especificada.

2.3.2.3. Flujo de actualización (Pulling)

El proceso de actualización en este proyecto sigue un modelo de "pulling"(sondeo), donde la iniciativa parte del dispositivo. El funcionamiento típico con el gestor de actualizaciones es el siguiente:

1. **Comprobación (Polling):** El servicio SWUpdate en el dispositivo consulta periódicamente al servidor central (a través del módulo WFX) si existe una nueva actualización disponible para su versión de hardware y software actual.
2. **Descarga:** Si el servidor responde afirmativamente con una actualización pendiente, el dispositivo comienza la descarga del archivo .swu.
3. **Instalación:** SWUpdate procesa el archivo .swu, lee el descriptor sw-description y procede a instalar los artefactos según las reglas definidas.
4. **Confirmación:** Una vez finalizada la instalación, el dispositivo reporta el éxito o fracaso de la operación al servidor.

2.3.3 WFX: Workflow Executioner

WFX (*Workflow Executioner*) es una herramienta desarrollada por Siemens y escrita en el lenguaje de programación Go, diseñada para gestionar la ejecución de flujos de trabajo (*workflows*) en entornos distribuidos. En el contexto de este proyecto, WFX actúa como el gestor del sistema de actualizaciones OTA, orquestando el ciclo de vida de las actualizaciones desde que se definen hasta que se instalan en los dispositivos.

El funcionamiento de WFX se basa en máquinas de estados cliente-servidor. Un flujo de trabajo define una serie de estados por los que debe pasar una tarea (en este caso, una actualización) y las transiciones permitidas entre ellos. Estas transiciones pueden ser desencadenadas por el dispositivo (el cliente, a través de SWUpdate) o por el operador del sistema (el desarrollador o administrador).

Para facilitar esta interacción, WFX expone dos APIs diferenciadas:

- **API Norte (North API):** Destinada al desarrollador o a los sistemas de gestión. Permite crear trabajos, monitorizar su estado y ejecutar transiciones administrativas (como aprobar una actualización).
- **API Sur (South API):** Destinada a los dispositivos. Es utilizada por el agente SWUpdate (a través del módulo WFX) para consultar tareas pendientes, reportar progreso y actualizar el estado de la instalación.

2.3.3.1. Tipos de Workflows

WFX integra flujos de trabajo específicos para la actualización de artefactos en dispositivos, conocidos como DAU (*Device Artifact Update*). El sistema soporta dos modalidades principales: *Direct* (Directo) y *Phased* (Por fases).

Workflow Directo El **Workflow Directo** es un proceso automatizado diseñado para despliegues rápidos donde no se requiere intervención manual. Una vez creado el trabajo, el dispositivo procede a la descarga e instalación sin pausas intermedias, como se muestra en la Figura 2.13.

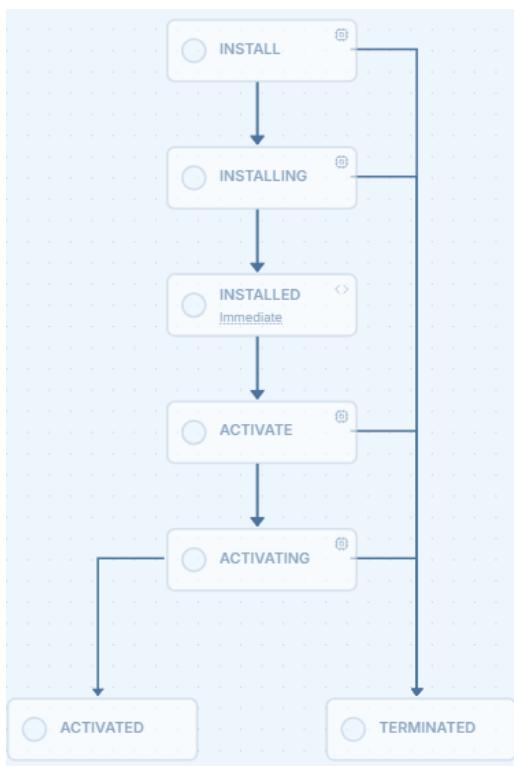


Figura 2.13: Diagrama de estados del Workflow Directo.

Workflow Por Fases El **Workflow Por Fases** introduce puntos de control manual para una gestión más controlada del despliegue. Es fundamental notar los estados marcados con los símbolos <> en el diagrama de la Figura 2.14. Estos estados indican que la transición no es automática, sino que requiere una acción explícita por parte del desarrollador a través de la API Norte. Específicamente, estas intervenciones son necesarias para dar inicio a la actualización y para activarla una vez instalada, permitiendo un control granular sobre el despliegue (por ejemplo, para coordinar reinicios en ventanas de mantenimiento).

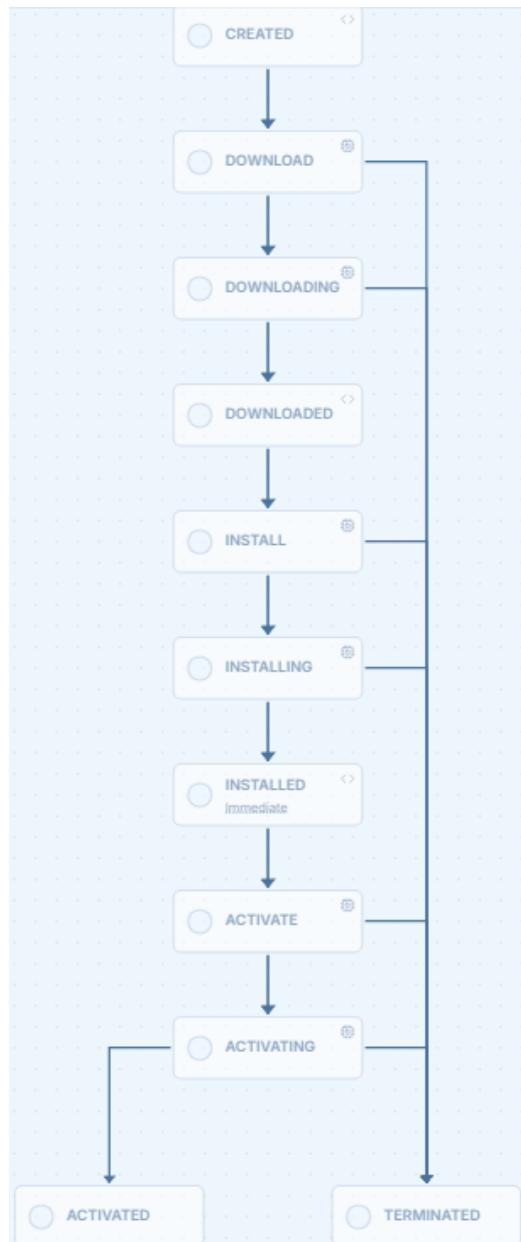


Figura 2.14: Diagrama de estados del Workflow Por Fases.

2.3.3.2. La Entidad Job

En la arquitectura de WFX, cuando se asigna una actualización a un dispositivo, se crea una entidad denominada **Job** (Trabajo). El agente SWUpdate en el dispositivo sondea constantemente la API Sur de WFX buscando si existe algún *Job* activo asignado a su *DeviceID*.

Un *Job* encapsula toda la información necesaria para realizar la actualización, tal y como se ilustra en la Figura 2.15. Sus componentes principales son:

- **ID:** Identificador único del trabajo.
- **DeviceID:** Identificador del dispositivo al que está asignado el trabajo.

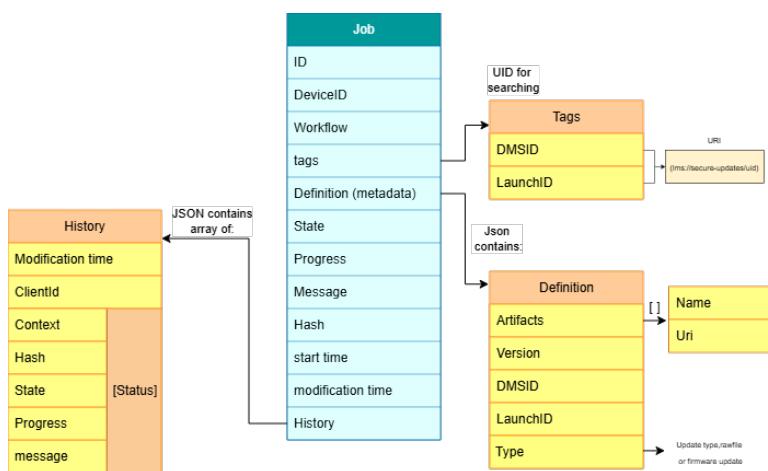


Figura 2.15: Estructura de la entidad Job en WFX.

- **Workflow:** Nombre del flujo de trabajo que rige este trabajo (ej. wfx.workflow.dau.direct).
- **Tags:** Etiquetas para categorización y búsquedas.
- **State:** Estado actual del trabajo dentro del flujo (ej. CREATED, DOWNLOADING, INSTALLED).
- **Progress:** Indicador numérico del progreso de la tarea.
- **Message:** Mensajes de log o errores reportados por el dispositivo.
- **Hash:** Valor hash para identificar y verificar la integridad del trabajo.
- **Fechas:** *Start time* (inicio) y *Modification time* (última actualización).
- **History:** Un registro histórico en formato JSON que almacena la evolución del trabajo, incluyendo cambios de estado, tiempos de modificación y mensajes.

Un componente crítico del *Job* es el campo **Definition** (metadatos). Este campo se almacena como un objeto JSON y contiene los detalles técnicos de la actualización que el dispositivo necesita procesar. En este proyecto, el campo *Definition* se ha utilizado para inyectar identificadores y configuraciones específicas:

- **Artifacts:** Lista de objetos a instalar. Cada artefacto incluye un **Name** y una **Uri** (ruta de descarga).
- **Version:** Versión del paquete de software.
- **Type:** Tipo de actualización.
- **DMSID y LaunchID:** Etiquetas utilizadas como identificadores únicos para búsquedas y trazabilidad dentro del sistema de gestión.

Bibliografía

- [1] Gartner. IoT security surveys and reports. Technical report, Gartner, 2023. Consultado en 2023.
- [2] Kaspersky Security. Mirai Botnet and IoT-Based DDoS Attacks: Evolution and Current Threats. <https://www.kaspersky.com/resource-center/threats/mirai-botnet>, 2025. Análisis de botnets IoT y ataques DDoS masivos impulsados por dispositivos comprometidos.
- [3] Muhammad Ibrahim, Andrea Continella, and Antonio Bianchi. AoT - Attack on Things: A security analysis of IoT firmware updates. In *2023 IEEE 8th European Symposium on Security and Privacy (EuroS&P)*, pages 1047–1064, 2023.
- [4] Yewande Goodness Hassan, Anuoluwapo Collins, Gideon Opeyemi Babatunde, Abidemi Adeleye Alabi, and Sikirat Damilola Mustapha. Security Challenges in Industrial IoT: Update Mechanisms and Firmware Vulnerabilities. *International Journal/Conference Name*, 04(01):697–703, January–February 2023. Received: 12-12-2022; Accepted: 19-01-2023.
- [5] Cisco Systems. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) and IoT Forecast. Technical report, Cisco Systems, 2025. Proyección de más de 29 mil millones de dispositivos IoT conectados para 2025.
- [6] Fortinet. Top 10 IoT Vulnerabilities and Security Threats. <https://www.fortinet.com/resources/cyberglossary/iot-security>, 2024. Informe sobre las principales vulnerabilidades en dispositivos IoT, incluyendo mecanismos de actualización inseguros y firmware obsoleto.
- [7] Bitdefender Labs. Critical Vulnerabilities in ThroughTek Kalay Platform Affect Over 100 Million IoT Devices. Technical report, Bitdefender, May 2024. Vulnerabilidades críticas en la plataforma TUTK que afectan a más de 100 millones de dispositivos IoT globalmente.
- [8] SWUpdate Project. SWUpdate - Software Update for Embedded Linux Devices, 2024. Framework de código abierto para actualizaciones de firmware en sistemas Linux embebidos con soporte para actualizaciones atómicas A/B y firmas RSA/ECDSA.
- [9] Eclipse Foundation. Eclipse hawkBit - IoT Update Management, 2024. Plataforma backend de código abierto para gestión de actualizaciones OTA a escala empresarial con rollout progresivo y gestión de campañas.

- [10] Northern.tech. Mender - Over-the-Air Software Updates for IoT, 2024. Plataforma OTA que integra cliente y servidor para actualizaciones con gestión de flotas, rollback automático e interfaz gráfica.
- [11] Balena Inc. Balena - IoT Fleet Management Platform, 2024. Plataforma de gestión de flotas IoT basada en contenedores Docker para despliegue y actualización de aplicaciones.
- [12] RAUC Project. RAUC - Robust Auto-Update Controller, 2024. Framework de código abierto para actualizaciones seguras de sistemas Linux embebidos con soporte para múltiples esquemas de particionado.
- [13] National Institute of Standards and Technology (NIST). Lightweight Cryptography: Program Document. Special Publication (SP) 800-232, U.S. Department of Commerce, 2023.
- [14] National Institute of Standards and Technology (NIST). Ascon-Based Lightweight Cryptography Standards for Constrained Devices. Special Publication (SP) 800-232, U.S. Department of Commerce, 2025. Estándar oficial de criptografía ligera del NIST basado en ASCON para dispositivos con recursos limitados.
- [15] Christoph Dobraunig, Maria Eichlseder, Florian Mendel, and Martin Schläffer. Status Update on Ascon v1.2. Status update, NIST Lightweight Cryptography Standardization Process, September 2022. Finalist Round Status Update con benchmarks de rendimiento en dispositivos con recursos limitados.
- [16] Raspberry Pi Foundation. Raspberry Pi, 2025. Sitio web oficial de Raspberry Pi.
- [17] Arduino. Arduino IDE, 2025. Entorno de desarrollo integrado oficial para Arduino.
- [18] Christoph Dobraunig and others. ASCON C Implementation, 2023. Implementación oficial de ASCON recomendada por NIST.
- [19] U.S. Department of Commerce. National Institute of Standards and Technology (NIST), 2025. Sitio web oficial del NIST.
- [20] Peter W. Shor. Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM Journal on Computing*, 26(5):1484–1509, 1997.
- [21] National Institute of Standards and Technology (NIST). Module-Lattice-Based Digital Signature Standard, 2024.
- [22] Yocto Project. System Update. https://wiki.yoctoproject.org/wiki/System_Update, 2024. Accessed: 2025-12-11.
- [23] Wfx. <https://siemens.github.io/wfx/>. Accessed: 2025-12-11.

