

Implementación de un Sistema de Carga inalámbrica con Autenticación

Deiby Alexander Forero Calderon y Deiver Yair Quiñonez Osorio

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingenieros Electrónicos

Director

Salvador Pacheco

Doctor en Ingeniería Eléctrica

Codirector

Jaime Guillermo Barrero Pérez

Maestría en Ingeniería Electrónica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria Deiby Alexander Forero Calderon

Este trabajo de grado está dedicado, en primer lugar, a mis padres, quienes han sido la base fundamental en este proceso y en la consecución de esta meta. Gracias a su apoyo incondicional, entrega en los momentos difíciles y guía constante desde el inicio de mi formación, hoy este logro es también suyo. Ellos son el pilar más importante en mi vida y en mi crecimiento, y espero que en mí encuentren el reflejo satisfactorio de tantos sacrificios.

Dedico igualmente este trabajo a mis cuatro abuelos, quienes partieron de este mundo hace algunos años. Su sueño era verme alcanzar esta meta, y aunque el destino no les permitió presenciarlo, estoy seguro de que, desde donde se encuentren, se sienten orgullosos de mí y de todo lo logrado. Ellos fueron el origen de mi entorno familiar, y agradezco a Dios por haberme permitido compartir con ellos en vida y aprender de sus consejos, los cuales me acompañaron hasta llegar a este momento.

A mi hermana, le dedico estas páginas con la esperanza de que mi ejemplo le inspire a culminar con éxito esta misma etapa, y con la felicidad de que sea en nuestra misma alma mater donde lo logre.

También a mis amigos de la universidad, con quienes recorrí este camino lleno de altibajos, alegrías y sacrificios, pero también de aprendizajes, risas y momentos inolvidables que al final se transforman en recompensa. Y, por supuesto, a toda mi familia, quienes confiaron siempre en mí y me brindaron su cariño y apoyo incondicional.

Dedicatoria Deiver Yair Quiñonez Osorio

Este trabajo de grado se lo dedico, en primer lugar, a la memoria de mi padre, quien, aunque ya no está en este mundo, siempre ha sido un apoyo fundamental para alcanzar esta meta. Su dedicación en vida, junto con su ejemplo, sus consejos y su amor incondicional, me dieron la fortaleza necesaria para no rendirme en los momentos más difíciles de mi formación como estudiante. Fue y seguirá siendo una inspiración en mi vida.

A mi madre, por su esfuerzo incansable, por su dedicación y por enseñarme el verdadero significado del compromiso y la perseverancia. Gracias, mamá, por recordarme siempre que los sueños se alcanzan con esfuerzo y dedicación.

A mi hermana, por ser compañía, apoyo y aliento en este camino, y por estar siempre presente para darme la fuerza necesaria para continuar.

A mi pareja, por su comprensión, paciencia y motivación, por estar a mi lado en cada etapa de este proceso y brindarme palabras de aliento cuando más las necesitaba.

A mis amigos de la carrera, con quienes compartí momentos de alegría y dificultad, retos y aprendizajes que hicieron de esta experiencia universitaria una etapa inolvidable.

Finalmente, a mis familiares y amigos cercanos, quienes, con su apoyo, respaldo y confianza en mí, me han acompañado en este recorrido académico y personal.

A todos ustedes, les ofrezco con gratitud este logro.

Tabla de Contenido

Introducción	13
1 Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2 Conceptos previos	16
2.1 Estándar Qi.....	16
2.2 NFC (Near Field Communication)	16
2.3 Perfiles de Carga: BPP, EPP y MPP.....	17
2.4 Reguladores lineales y de baja caída (LDO).....	17
2.5 <i>Derating</i>	18
2.6 Tag NTAG216	18
3 Desarrollo de la solución	18
3.1 Definición del problema	18
3.2 Investigación Inicial.....	19
3.2.1 Estructura de un sistema de carga inalámbrica	19
3.2.2 Investigación general de los diferentes chips de Carga Inalámbrica	21
3.3 Selección de Dispositivos y Componentes	23
3.3.1 STWBC86.....	23
3.3.2 Aplicación del chip STWBC86	25
3.3.3 IRLZ44NSTRLPBF	26
3.3.4 ATTINY85-20PU	27

3.3.5	Modulo NFC PN532.....	27
3.4	Desarrollo de Circuitos del sistema	28
3.4.1	Descripción del diagrama de bloques del sistema	29
3.4.2	Alimentación.....	30
3.4.3	Autenticación	31
3.4.4	Cargador.....	32
3.4.5	Protecciones	34
3.5	Implementación del firmware de Autenticación.....	34
3.5.1	Inicialización del Módulo NFC	35
3.5.2	Verificación del UID.....	36
3.5.3	Bucle Principal del Sistema	36
3.6	Prototipo del Dispositivo	37
3.6.1	Verificación experimental del sistema de carga inalámbrica	37
3.6.2	Integración de la protoboard con la placa STEVAL-WBC86TX.....	39
3.6.3	Integración de la placa baquelita universal.....	40
3.6.4	Identificación de errores, ajustes y validación final.....	40
3.7	Desarrollo e implementación final del Dispositivo	41
3.8	Pruebas y validación del sistema	42
3.8.1	Fabricación y ensamble del dispositivo	43
3.8.2	Pruebas iniciales.....	43
3.8.3	Prueba autenticación y encendido del IC STWBC86.....	44
3.8.4	Conexiones y comunicación	44
3.8.5	Programación del dispositivo.....	45

3.8.6	Prueba de funcionamiento sin receptor.....	46
3.8.7	Prueba de funcionamiento con receptor.....	47
3.8.8	Prueba de eficiencia respecto a la STEVAL-WBC86TX.....	48
4	Conclusiones.....	52
5	Recomendaciones	54
	Referencias bibliográficas.....	56
	Apéndices.....	59

Lista de Tablas

Tabla 1. Comparación de soluciones de carga inalámbrica ofrecidas por diferentes fabricantes	22
Tabla 2. Comparación entre los MOSFET IRLZ44NSTRLPBF e IRF540.....	41
Tabla 3. Consumo teórico estimado del sistema en operación activa (modo de carga inalámbrica	49
Tabla 4. Comparativa de eficiencia.....	52

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama metodológico del proyecto.	19
Figura 2. Diagrama de bloques típico de carga inalámbrica.....	20
Figura 3. Diagrama de bloques simplificado.....	25
Figura 4. Características de la placa de evaluación STEVAL-WBC86TX.....	26
Figura 5. Sistema del convertidor FT260Q I2C	29
Figura 6. Diagrama de bloques del sistema implementado.	30
Figura 7. Diagrama de la etapa de alimentación.....	31
Figura 8. Diagrama de Autenticación.....	32
Figura 9. Diagrama de las conexiones del cargador.....	34
Figura 10. Diagrama de flujo – Autenticación sistema NFC.....	35
Figura 11. Diagrama de flujo - Inicialización del sistema NFC	35
Figura 12. Diagrama de flujo – Verificación UIDS.....	36
Figura 13. Diagrama de flujo – Bucle principal	37
Figura 14. Placa STEVAL-WBC86TX en funcionamiento.....	38
Figura 15. Sistema de autenticación en funcionamiento.....	38
Figura 16. Sistema de potencia.....	39
Figura 17. Integración protoboard con STEVAL-WBC86TX.....	39
Figura 18. Sistema en placa de ensamble universal (Baquelita).....	40
Figura 19. PCB final sin ensamblar.....	43
Figura 20. PCB final ensamblada.....	43
Figura 21. Interfaz I ² C entre el sistema final de carga inalámbrica con autenticación y la placa transmisora STEVAL-WBC86TX.....	45

Figura 22. Comportamiento del sistema desarrollado sin carga.....	46
Figura 23. Comportamiento de la placa STEVAL-WBC86TX sin carga conectada	47
Figura 24. Prueba del dispositivo con Rx.....	48
Figura 25. Potencia del Tx y Rx del dispositivo desarrollado.....	50
Figura 26. Temperatura de carga.....	51
Figura 27. Potencia del Tx y Rx de la STEVAL-WBC86TX	51

Lista de Apéndices

Apéndice A	Repositorio GitHub del sistema de carga inalámbrica con autenticación NFC	59
Apéndice B	Esquemático del sistema de carga inalámbrica con autenticación	60
Apéndice C	Resultados experimentales: gráficas de potencia, eficiencia, temperatura entre otros	64
Apéndice D	Diseño de PCB del sistema de carga inalámbrico	74

Resumen

Título: Implementación de un Sistema de Carga Inalámbrica con Autenticación*

Autor: Deiby Alexander Forero Calderon y Deiver Yair Quiñonez Osorio**

Palabras Clave: Carga Inalámbrica, Autenticación, NFC, STEVAL-WBC86TX, PCB, MOSFET.

Descripción: En este proyecto de grado se muestra el desarrollo de la implementación de un sistema de carga inalámbrica con autenticación el cual permite validar el acceso antes de iniciar la carga. En la actualidad los dispositivos permiten la transferencia de energía sin restricciones lo cual puede generar inconvenientes como uso indebido de energía por dispositivos no autorizados. Para dar solución a este problema, se implementó un prototipo funcional de cargador inalámbrico basado en la placa STEVAL-WBC86TX, integrando un sistema de autenticación mediante etiquetas NFC, gestionado por un microcontrolador ATtiny85. El sistema permite habilitar la transferencia de energía según la verificación del tag, mediante una lógica que controla un MOSFET de potencia. La PCB de cuatro capas fue diseñada bajo los criterios dados por el fabricante de la placa de evaluación para asegurar el aislamiento de señales y su correcto funcionamiento. Los resultados obtenidos demostraron un funcionamiento estable, con una entrega de potencia necesaria para cargar un banco de baterías, protecciones ante condiciones que afecten el dispositivo y activación solo mediante etiquetas previamente autorizadas. Esta solución tiene un impacto en aplicaciones industriales, educativas o de consumo, donde se requiera un control seguro y compacto del acceso a la energía inalámbrica.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: Salvador Pacheco, Dr. en ingeniería eléctrica. Codirector: Jaime Guillermo Barrero, Mgtr. en ingeniería electrónica.

Abstract

Title: Implementation of a Wireless Charging System with Authentication *

Author: Deiby Alexander Forero Calderon y Deiver Yair Quiñonez Osorio **

Key Words: wireless charging, authentication, NFC, STEVAL-WBC86TX, PCB, MOSFET

Description: This undergraduate thesis presents the development and implementation of a wireless charging system with authentication, which enables access validation before initiating the charging process. Currently, most devices allow energy transfer without restrictions, which can pose security risks. To address this issue, a functional prototype of a wireless charger was implemented based on the STEVAL-WBC86TX evaluation board, integrating an authentication system using NFC tags managed by an ATtiny85 microcontroller. The system enables power transfer only upon successful tag verification, through a logic that controls a power MOSFET. A four-layer PCB was designed following the guidelines provided by the evaluation board manufacturer, ensuring proper signal isolation and system reliability. The results demonstrated stable operation, with sufficient power delivery to charge a battery bank, protection against abnormal conditions, and activation limited to previously authorized tags. This solution has potential impact in industrial, educational, or consumer applications where secure and compact control of wireless energy access is required.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Salvador Pacheco, PhD in Electrical Engineering. Co-director: Jaime Guillermo Barrero, MSc in Electronic Engineering.

Introducción

Los dispositivos electrónicos se han convertido en herramientas esenciales en la vida cotidiana, lo que ha generado la necesidad de soluciones de carga más eficientes, seguras y cómodas. En este contexto, la carga inalámbrica emerge como una alternativa innovadora que mejora la experiencia del usuario al eliminar cables y conectores, facilitando así el uso diario de dispositivos móviles mediante un proceso de carga más intuitivo (Rahman, Shanto, Rani & Paul, 2024).

No obstante, surge una problemática importante: ¿qué ocurre si cualquier persona puede acceder libremente a un punto de carga? Esto podría derivar en un consumo no autorizado de energía y en un uso ineficiente del recurso eléctrico. Los desarrollos actuales en sistemas de carga inalámbrica se han enfocado principalmente en la eficiencia de transferencia energética, priorizando aspectos como la compatibilidad con el protocolo Qi y la estabilidad de la potencia suministrada (Mou & Sun, 2015). Sin embargo, se ha prestado poca atención a elementos fundamentales como el control de acceso o la personalización del servicio, lo que representa una limitación en aplicaciones donde se requiere condicionar la entrega de energía a la identificación del usuario o del dispositivo receptor (Lu, 2015).

Con el objetivo de ofrecer una solución práctica a esta problemática, el presente proyecto propone el diseño e implementación de un sistema funcional de carga inalámbrica con autenticación, basado en tecnología NFC. Los resultados obtenidos se presentan en el subcapítulo de pruebas y validación del sistema, donde se detallan los ensayos realizados en condiciones reales, utilizando un diseño propio de PCB, cuyo desarrollo se describe en el capítulo “Desarrollo de la solución”. Dichos resultados demuestran la viabilidad de integrar mecanismos de autenticación en sistemas de carga inalámbrica compactos y funcionales.

Este proyecto se plantea como punto de partida para futuras aplicaciones en entornos industriales, educativos y de consumo personalizado, en los que el control del acceso a la energía resulta un factor determinante (Peng, Li & Wang, 2024). El trabajo se distingue por su enfoque práctico, la incorporación de tecnologías accesibles y su aplicabilidad en escenarios donde la seguridad energética y la carga inalámbrica son prioritarias. En función de lo anterior, es indispensable establecer una base conceptual que permita comprender los principios teóricos y tecnológicos que sustentan la solución propuesta. El siguiente capítulo, correspondiente a los conceptos previos, presenta la información más relevante como marco de referencia para el desarrollo e implementación del sistema de carga inalámbrica con autenticación.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Implementar un sistema de carga inalámbrica de baterías con capacidad de autenticación.

1.2 Objetivos Específicos

Evaluar y analizar las tecnologías de carga inalámbrica existentes y los protocolos de autenticación para identificar opciones en cuanto a tecnología y estándares relevantes.

Implementar un sistema de carga inalámbrica que cumpla con los requisitos de potencia mínima para la recarga de baterías.

Definir un mecanismo de autenticación para el dispositivo.

Realizar el software para el sistema de autenticación, asegurando que se cumplan los requisitos de seguridad y que los datos se transfieran de manera segura.

2 Conceptos Previos

Para comenzar con la implementación del sistema de carga inalámbrica con autenticación, es necesario tener en cuenta la siguiente información empleada para el desarrollo del proyecto. En este capítulo se muestran conceptos involucrados, los cuales sirven para comprender tanto el funcionamiento del sistema como las decisiones tomadas. Se abordan temas como el estándar Qi, que regula la transferencia de energía inductiva entre dispositivos; la tecnología NFC, utilizada como medio de autenticación; y diferentes términos mostrados a continuación con el objetivo de contextualizar conceptos del proyecto realizado.

2.1 Estándar Qi

El estándar Qi es el principal estándar global para la transferencia de energía inalámbrica inductiva de baja potencia, desarrollado por el *Wireless Power Consortium* (WPC). Su propósito es permitir la carga sin cables de dispositivos electrónicos como *smartphones* y relojes inteligentes, mediante un acoplamiento magnético cercano entre una bobina transmisora y una receptora. Al colocar un dispositivo compatible con Qi sobre una almohadilla de carga certificada, la energía se transfiere de manera eficiente y segura. Este estándar asegura la interoperabilidad entre productos de diversos fabricantes, simplificando la experiencia del usuario y facilitando la adopción masiva de la carga inalámbrica (Wireless Power Consortium, 2025).

2.2 NFC (Near Field Communication)

La Comunicación de Campo Cercano (NFC) es una tecnología inalámbrica de corto alcance que permite la comunicación bidireccional entre dispositivos a distancias de hasta 4 cm. Opera en 13.56 MHz y se basa en los principios de RFID. A diferencia de *Bluetooth* o *Wi-Fi*, NFC está diseñada para conexiones rápidas de muy corto alcance, ideal para pagos sin contacto, emparejamiento, acceso seguro o lectura de etiquetas inteligentes. Funciona en modo activo

(ambos dispositivos generan campo RF) o pasivo (uno alimenta al otro, como una etiqueta). Su simplicidad y seguridad, derivadas del alcance limitado, la han hecho común en smartphones y otras aplicaciones (Digital Trends, 2025).

2.3 Perfiles de Carga: BPP, EPP y MPP.

El estándar Qi define distintos perfiles de potencia para la carga inalámbrica. El *Basic Power Profile* (BPP), introducido con Qi v1.0, permite transferencias de hasta 5 W mediante comunicación unidireccional tipo ASK (Wireless Power Consortium, 2025; Zens, 2025). El *Extended Power Profile* (EPP) eleva la potencia hasta 15 W, incorpora comunicación bidireccional, y mejora la detección de objetos extraños (FOD), permitiendo negociación entre transmisor y receptor para activar carga rápida si ambos son compatibles (Wireless Power Consortium, 2025). Por último, el *Magnetic Power Profile* (MPP), introducido con Qi v2.0, utiliza alineación magnética inspirada en *MagSafe*, mejorando la eficiencia y usabilidad. Aunque oficialmente soporta 15 W, fabricantes como Samsung ya implementan versiones de hasta 25 W, e incluso 50 W bajo el estándar Qi 2.2 (Belkin, 2025; Samsung Semiconductor, 2025; Zens, 2025).

2.4 Reguladores lineales y de baja caída (LDO)

Los reguladores lineales de baja caída (LDO) se emplean para suministrar tensiones estables y filtradas a los distintos bloques del sistema. En el transmisor basado en el STWBC86, permiten obtener voltajes precisos desde una fuente superior, con mínima caída entre la tensión de entrada (V_{IN}) y salida (V_{OUT}). Al disipar el exceso de energía en forma de calor, son ideales en aplicaciones de baja potencia o con bajo diferencial de tensión. Para un funcionamiento estable, se recomienda usar encapsulados adecuados y ubicar capacitores auxiliares cerca del dispositivo (STMicroelectronics, 2022).

2.5 *Derating*

El *derating* es una técnica comúnmente utilizada en dispositivos electrónicos y de potencia, que consiste en operar los componentes por debajo de su máxima capacidad de disipación de potencia nominal. Esta práctica considera factores como la temperatura ambiente, la temperatura del encapsulado y el tipo de enfriamiento utilizado, con el fin de aumentar el margen de seguridad entre las tensiones reales aplicadas y los límites de diseño del componente. Al aplicar *derating*, se reduce la tasa de degradación del dispositivo, lo que incrementa su confiabilidad y prolonga su vida útil (ReliaSoft, 2025).

2.6 **Tag NTAG216**

El tag NTAG216 es un chip NFC (*Near Field Communication*) desarrollado por NXP Semiconductors, diseñado específicamente para su uso en etiquetas inteligentes. Este chip destaca por ofrecer una memoria de usuario de 888 bytes, una de las mayores capacidades dentro de la familia NTAG. Opera a una frecuencia de 13.56 MHz y cumple con el estándar ISO/IEC 14443 Tipo A, lo que asegura su compatibilidad con la mayoría de los dispositivos NFC, incluidos teléfonos inteligentes (NXP Semiconductors, 2020).

3 **Desarrollo de la solución**

3.1 **Definición del problema**

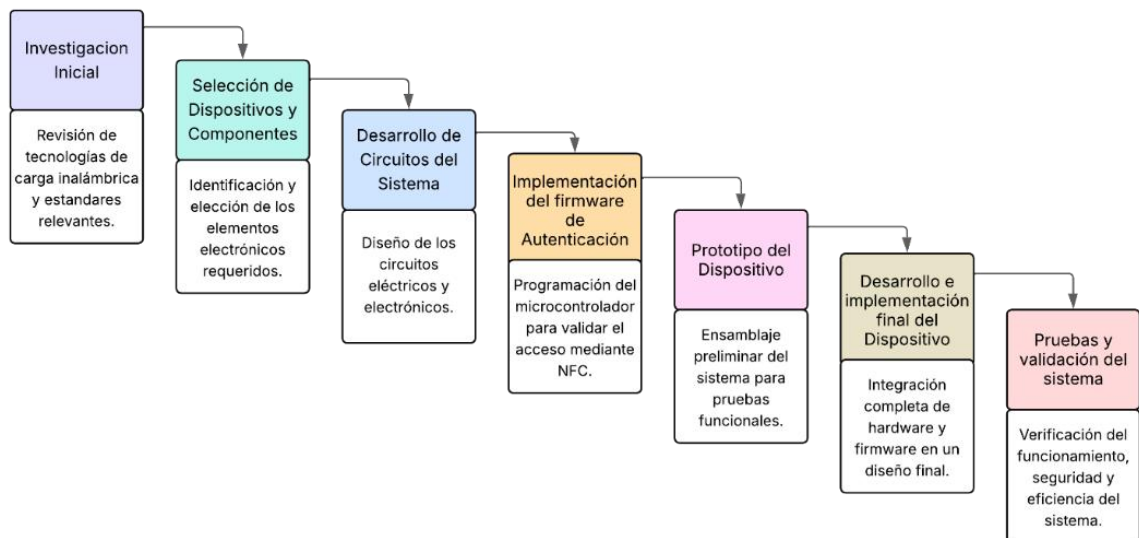
El proyecto plantea el desarrollo de un sistema de carga inalámbrica de baterías con autenticación integrada, orientado a verificar dispositivos autorizados y proteger la integridad de los equipos frente a accesos no autorizados o manipulaciones indebidas. Esta necesidad surge ante la creciente demanda de soluciones seguras, especialmente en contextos críticos como el médico, industrial o institucional. Para su diseño y validación se establecen criterios clave: eficiencia de carga, calidad en la transmisión de datos, facilidad de implementación, relevancia tecnológica, impacto social en la protección de datos y sostenibilidad ambiental. Además, el sistema debe

cumplir con restricciones técnicas como una potencia adecuada, compatibilidad con bobinas comerciales y uso de componentes de montaje superficial para optimizar el tamaño del dispositivo.

La metodología del proyecto se estructura en una serie de etapas secuenciales que permiten una construcción ordenada y lógica de la solución propuesta. Cada fase responde a objetivos específicos, desde la investigación inicial hasta la validación del sistema final. En la Figura 1 se presenta el diagrama que ilustra el desarrollo metodológico del proyecto, evidenciando el proceso iterativo y progresivo seguido para implementar un sistema de carga inalámbrica con autenticación mediante tecnología NFC.

Figura 1.

Diagrama metodológico del proyecto.



3.2 Investigación Inicial

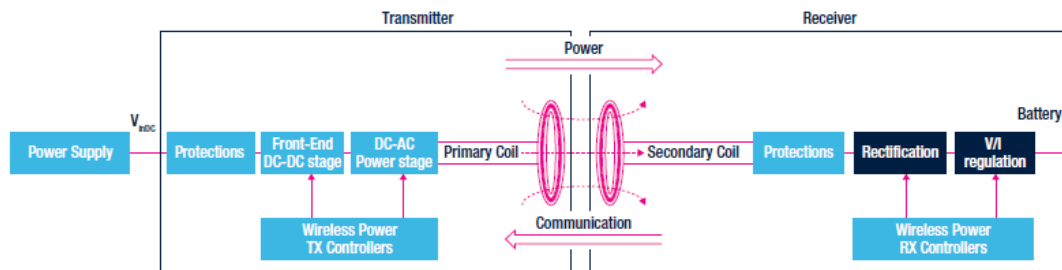
3.2.1 Estructura de un sistema de carga inalámbrica

Este proyecto propone el diseño e implementación de un sistema de carga inalámbrica con autenticación, orientado a reforzar la seguridad y el control de acceso en entornos donde la energía

debe ser gestionada de manera selectiva. Este dispositivo contiene un circuito integrado (IC) el cual se encarga de gestionar la transmisión de energía de manera inalámbrica entre el transmisor TX y un receptor RX (ver Figura 2), este IC es la unidad de control que maneja todo el proceso de la transferencia de energía (Wireless Power Consortium, 2025).

Figura 2.

Diagrama de bloques típico de carga inalámbrica.



Nota. STMicroelectronics 2025

Un sistema de carga inalámbrica inductiva o resonante consta esencialmente de dos bloques principales: el transmisor, que integra una etapa de acondicionamiento de potencia (con conversión de AC a DC y corrección del factor de potencia), un inversor de alta frecuencia (generalmente puente o semipuente) y una bobina emisora acoplada a una red de compensación resonante para maximizar la eficiencia; y el receptor, que consta de una bobina receptora acoplada magnéticamente al transmisor, seguida de una rectificación y filtrado para convertir la señal HF en DC estable, y una regulación de salida (por ejemplo, mediante convertidores *buck* o *boost*) para adaptar el voltaje al dispositivo final. Además, ambos extremos incorporan módulos de control y comunicación —tal como establece el estándar Qi, mediante modulación de carga— para negociar niveles de potencia, garantizar seguridad (como detección de objetos extraños) y optimizar la eficiencia del sistema (Zhang, Pang, Georgiadis & Cecati, 2020).

Se buscó permitir que la carga inalámbrica solo se active cuando se detecta y verifica la identidad de un usuario o dispositivo autorizado. Para lograr esto, se incorpora un mecanismo de autenticación previo al inicio del proceso de carga. De esta manera, se evita el uso no autorizado del cargador, se mejora la gestión energética y se refuerzan las medidas de seguridad frente a posibles usos indebidos. Para iniciar la carga, la batería cuenta con un tag NFC para la autenticación. El cargador cuenta con un circuito integrado de control que es fundamental para regular el flujo de corriente a través de las bobinas, asegurando así una carga segura y eficiente. El cargador se alimenta con 5 V, esto proporciona la energía necesaria para el funcionamiento de todos sus circuitos internos.

3.2.2 Investigación general de los diferentes chips de Carga Inalámbrica

Los circuitos integrados de gestión de energía son componentes fundamentales en los sistemas de carga inalámbrica y son los encargados de gestionar la transferencia de energía, la conversión de corriente, la optimización del rendimiento y la implementación de funciones de seguridad. Para un determinado rango de potencia, los fabricantes ofrecen distintas soluciones integradas que combinan estas funciones en un solo chip, con variaciones en cuanto a capacidad, eficiencia, escalabilidad y soporte de desarrollo. Entre estas opciones, se han evaluado las alternativas más relevantes y representativas en el mercado, las cuales se sintetizan en la Tabla 1.

Tras analizar los parámetros comparativos de la Tabla 1, se optó por el chip STWBC86JR de STMicroelectronics, decisión sustentada en varios factores. En primer lugar, destaca su amplia cobertura de potencia, que lo hace adecuado para aplicaciones versátiles dentro de los sistemas de carga inalámbrica. En segundo lugar, cuenta con un sólido respaldo por parte del fabricante, lo que se refleja en la disponibilidad de documentación técnica detallada, actualizaciones periódicas y un ecosistema confiable de soporte. Finalmente, sobresale la inclusión de herramientas de diseño

intuitivas, como una interfaz gráfica destinada al cliente, que permite una personalización completa y simplificada del sistema. Esta última ventaja constituye un diferenciador clave frente a otros fabricantes evaluados, los cuales no ofrecen un nivel de adaptabilidad equivalente.

Tabla 1.

Comparación de soluciones de carga inalámbrica ofrecidas por diferentes fabricantes

Fabricante	Rango de Potencia	Productos Destacados	Características Clave	Observaciones
NXP Semiconductors	5 W – 50 W	MWCT1x0x, MWCT2xxx, MWPR1516	Soporte MPP/EPP, integración de autenticación, bobina simple o múltiple, sin elementos seguros externos	Alta integración que reduce el costo total del sistema; buena opción para Qi 2.0
STMicroelectronics	5 W – 100 W	STWBC86JR, STWLC38JRM, STWLC99JR	Cumplimiento Qi, carga rápida propietaria, alta eficiencia energética	Amplia cobertura de potencia; buena compatibilidad y soporte con herramientas de desarrollo
Renesas	Hasta 30 W (propietario)	P9415-R, PTX130W	Transceptor dual, opciones de baja potencia para wearables	Ideal para dispositivos compactos o portátiles que requieren carga bidireccional
Infineon Technologies	Hasta 50 W	WLC1115, WLC1150, OPTIGA™Trust Charge	Protección integrada, control térmico, chip de autenticación compatible con Qi 1.3	Ofrece soluciones avanzadas con seguridad robusta integrada, ideal para dispositivos premium

Nota. Elaboración propia con base en información de NXP (2024), STMicroelectronics (2022), Renesas (2024) e Infineon (2023).

3.3 Selección de Dispositivos y Componentes

3.3.1 STWBC86

Para el desarrollo del sistema de carga inalámbrica se seleccionó el circuito integrado STWBC86 de STMicroelectronics, un transmisor compatible con el estándar Qi 1.2.4 (*Power Class 0*, BPP) que permite transferencias de hasta 5 W, ideal para aplicaciones de baja potencia. Este chip destaca por su alto nivel de integración, ya que incorpora un microcontrolador ARM Cortex-M0+ de 32 bits, un inversor configurable (puente completo o medio puente), y múltiples funcionalidades de detección y protección, lo cual reduce significativamente el número de componentes externos requeridos y simplifica el diseño del sistema.

Además, el STWBC86 cuenta con memoria no volátil FTP, interfaz I2C, GPIOs configurables, y comunicación ASK/FSK, lo que permite una configuración flexible y segura del sistema. Su sensor de corriente y ADC de 10 bits facilitan la detección de objetos extraños (FOD), así como protecciones térmicas y de sobrecorriente integradas. Se presenta en un encapsulado compacto tipo Flip Chip BGA (3.26 mm × 3.67 mm), optimizando el espacio en aplicaciones portátiles. Su implementación se ve facilitada por un completo ecosistema de desarrollo, incluyendo la placa STEVAL-WBC86TX y el software de configuración STSW-WPSTUDIO (STMicroelectronics, 2022).

3.3.1.1 Arquitectura del CI STWBC86. Su arquitectura interna se encuentra organizada en diversos bloques funcionales que permiten la generación, regulación y control eficiente de la energía inductiva (ver Figura 3), así como la comunicación con dispositivos receptores compatibles.

El bloque principal es el microcontrolador digital (MCU), el cual integra una memoria ROM con el firmware de operación, una memoria RAM para el almacenamiento temporal de datos y código, y una memoria FTP que permite la configuración del dispositivo como se vio anteriormente en sus características. Este MCU se encarga de la administración general del sistema, procesando las señales de entrada, gestionando la comunicación con el receptor y controlando los procesos de modulación y carga.

La generación de la señal de potencia está a cargo de un inversor que convierte el voltaje de entrada en una señal de corriente alterna de alta frecuencia, la cual es aplicada a una red de resonancia compuesta por una bobina (L_s) y un condensador (C_s). Esta red está diseñada para operar en la frecuencia establecida por el estándar Qi, típicamente entre 110 y 205 kHz. La modulación de esta señal permite la transferencia eficiente de energía al dispositivo receptor.

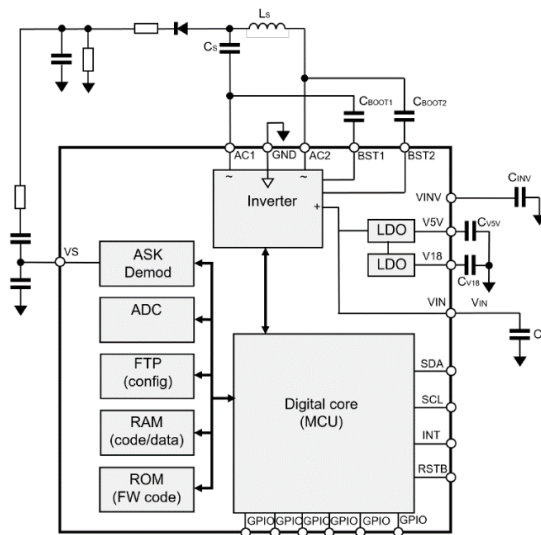
El chip STWBC86 integra reguladores LDO que generan tensiones internas de 5 V y 1.8 V para alimentar sus bloques analógicos y digitales, junto con una red de capacitores externos que estabilizan la alimentación. Además, incluye un demodulador ASK (Amplitude Shift Keying) para recibir señales del receptor y un ADC interno que permite monitorear parámetros en tiempo real, optimizando el proceso de carga (STMicroelectronics, 2022).

Finalmente, el chip presenta diversas interfaces digitales, incluyendo pines **GPIO** de propósito general, un bus **I2C** (a través de las líneas **SDA** y **SCL**) para la comunicación externa, una línea de interrupción (**INT**) y una entrada de reinicio (**RSTB**), lo que permite su integración flexible en sistemas más complejos. A estas prestaciones se suman mecanismos de protección integrados, como la supervisión de temperatura, la detección

de sobrecorriente y la protección contra sobretensión, que aportan un mayor nivel de seguridad y robustez. De esta manera, el STWBC86 se consolida como una solución completa y adaptable para aplicaciones de carga inalámbrica que demandan eficiencia, confiabilidad y escalabilidad.

Figura 3.

Diagrama de bloques simplificado.



Nota. STMicroelectronics (2022, p. 2)

3.3.2 Aplicación del chip STWBC86

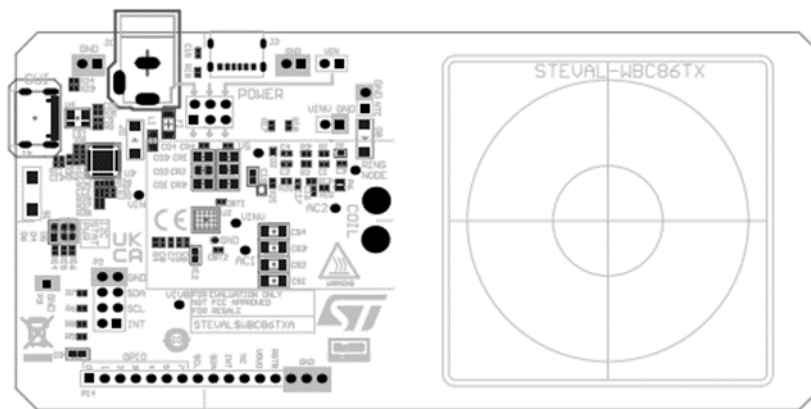
Para la implementación del sistema de carga inalámbrica se empleó la placa de evaluación STEVAL-WBC86TX de STMicroelectronics, una plataforma diseñada para el desarrollo y prueba de transmisores compatibles con el estándar Qi *Basic Power Profile* (BPP), permitiendo potencias de hasta 5 W. Esta placa está basada en el circuito integrado STWBC86 e incluye funcionalidades avanzadas de protección y control, tales como detección de objetos extraños (FOD), protección contra sobrecorriente (OCP), sobretensión (OVP) y sobretemperatura (OTP), garantizando una operación segura.

El diseño admite una entrada de voltaje entre 5 V y 20 V, y requiere pocos componentes externos, lo cual facilita su integración en prototipos funcionales. Además, incorpora un convertidor USB a I2C que, en conjunto con la interfaz gráfica STSW-WPSTUDIO, permite configurar, monitorear y probar el comportamiento del transmisor de manera intuitiva (STMicroelectronics, 2024).

A continuación, se presenta el diseño de la placa de evaluación STEVAL-WBC86TX (ver Figura 4).

Figura 4.

Características de la placa de evaluación STEVAL-WBC86TX.



Nota. STMicroelectronics (2024, p. 1)

3.3.3 *IRLZ44NSTRLPBF*

Para el control de potencia del sistema de carga inalámbrica, se requiere un dispositivo que actúe como interruptor electrónico, capaz de manejar corrientes moderadas con mínima disipación de potencia. En este contexto, se seleccionó el MOSFET canal N modelo IRLZ44N, debido a sus características eléctricas y a su compatibilidad con los niveles lógicos de salida del microcontrolador ATtiny85.

El IRLZ44N es un transistor MOSFET de potencia tipo canal N, con una resistencia interna muy baja ($R_{DS(on)} \approx 0.022 \Omega$), lo cual permite un paso eficiente de corriente con pérdidas mínimas. Este modelo es *logic-level*, lo que significa que puede ser conmutado completamente con tensiones de compuerta tan bajas como 5 V, siendo ideal para ser controlado directamente desde microcontroladores de bajo voltaje como el ATtiny85, sin necesidad de etapas de adaptación (International Rectifier, 2012).

Su función principal en el sistema es activar o bloquear el flujo de corriente dependiendo del resultado del proceso de autenticación NFC.

3.3.4 ATTINY85-20PU

El ATtiny85 fue seleccionado como unidad de control principal para la gestión del proceso de autenticación del sistema. Este microcontrolador de 8 bits, perteneciente a la familia AVR de bajo consumo, ofrece una solución compacta y económica para tareas específicas, lo que lo hace ideal para aplicaciones embebidas donde el espacio y la eficiencia energética son factores determinantes.

Con 8 KB de memoria *flash* y una frecuencia de hasta 20 MHz, el ATtiny85 es capaz de manejar la comunicación con el módulo NFC PN532 a través de la interfaz I2C, verificar los datos de autenticación, y generar una salida lógica que controla el estado del MOSFET. Su arquitectura simple y su facilidad de programación permiten una implementación rápida y confiable, sin requerir recursos de *hardware* excesivos (Atmel, 2012).

3.3.5 Modulo NFC PN532

El módulo PN532 uno de los componentes principales del sistema ya que se encarga de la lectura de etiquetas NFC para validar si el dispositivo autorizado puede acceder al sistema de carga inalámbrica. Este módulo, desarrollado por NXP Semiconductors, es ampliamente utilizado en

aplicaciones de identificación y control de acceso gracias a su alta compatibilidad con protocolos ISO/IEC 14443A/B y soporte para etiquetas como las NTAG216, utilizadas en este proyecto (NXP, 2012).

Se seleccionó este módulo por su interfaz de comunicación I2C, que facilita la integración con microcontroladores de bajo nivel como el ATtiny85, y por la disponibilidad de bibliotecas y documentación que agilizan el desarrollo del *firmware*. El PN532 permite realizar operaciones como lectura de memoria, autenticación con contraseña y validación de datos almacenados en la etiqueta NFC.

3.4 Desarrollo de Circuitos del sistema

Para llevar a cabo el desarrollo de los circuitos, se inició con el estudio de la placa STEVAL-WBC86TX, la cual sirvió como base para la implementación de nuestro proyecto. En esta etapa se analizaron los circuitos y el diseño de la placa con el objetivo de identificar qué componentes podían ser aprovechados y adaptados al dispositivo a desarrollar, y cuáles debían ser descartados o modificados. A partir de este análisis, se realizó una selección y modificación de componentes, eliminando algunos elementos y añadiendo el sistema de autenticación.

En esta etapa del desarrollo se decidió reutilizar una sección de dicha placa: la interfaz USB-I2C, con el fin de reducir costos y aprovechar los recursos disponibles que nos ofrece la placa. Esta interfaz, compuesta por un circuito integrado, permite la comunicación y programación del sistema mediante el protocolo I2C, está basado en el chip FT260Q, donde este facilita la interacción con el dispositivo a través del *software* STSW-WPSTUDIO.

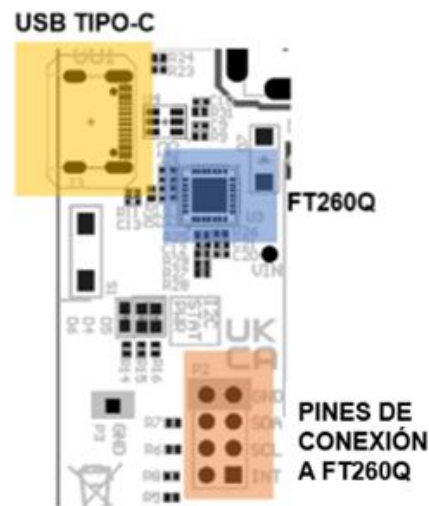
Esta parte actúa como puente entre el entorno de desarrollo y el sistema, permitiendo monitorear y configurar parámetros mediante una conexión USB. Gracias a esta solución, fue posible establecer un proceso de programación confiable y eficiente para el dispositivo propuesto.

Esta parte (ver Figura 5) hace que el dispositivo funcione como esclavo I2C y permite diferentes modos de transferencia de datos estándar como de 100 kbps o 400 kbps y modo rápido más, de hasta 1 Mbps.

Al STWBC86 se le ha asignado una dirección de *hardware* 0x61 de 7 bits, y sus pines soportan hasta 3,3 V (STMicroelectronics, 2022).

Figura 5.

Sistema del convertidor FT260Q I2C



Nota. STMicroelectronics (2024, p. 6)

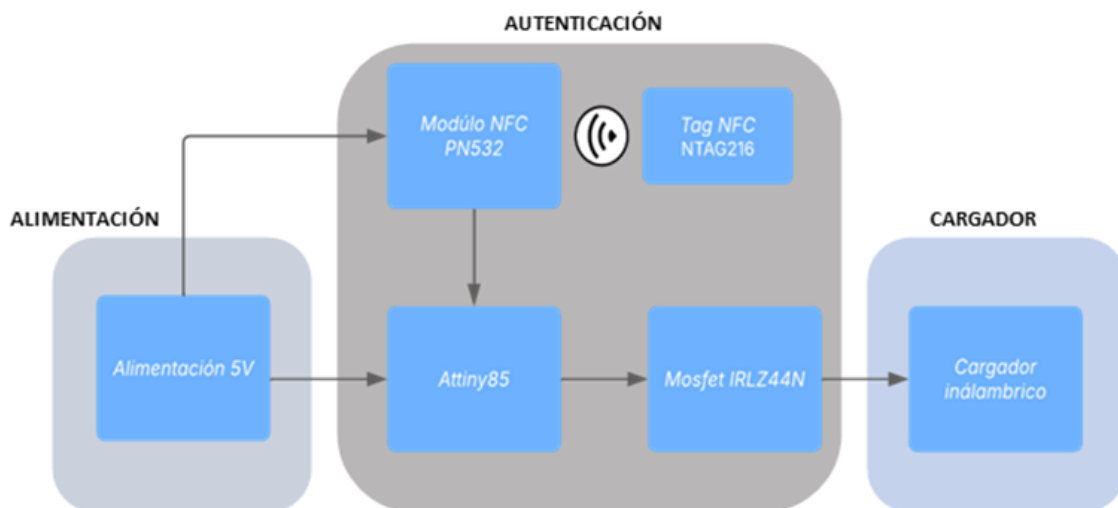
3.4.1 Descripción del diagrama de bloques del sistema

El diagrama de bloques presentado en la Figura 6 describe la arquitectura del sistema de carga inalámbrica con autenticación mediante tecnología NFC propuesto. El sistema se alimenta con una fuente de 5V, la cual suministra energía tanto al microcontrolador ATtiny85 como al módulo NFC PN532. El módulo PN532 se encarga de detectar y leer los tags NFC tipo NTAG216. Una vez leído el identificador único (UID) del tag, este dato es enviado al ATtiny85, que compara el UID con una lista predefinida de identificadores autorizados. Si el tag es válido, el ATtiny85

activa el MOSFET IRLZ44N, permitiendo el paso de corriente hacia el módulo de carga inalámbrica. En caso contrario, el MOSFET permanece desactivado, impidiendo el funcionamiento del cargador. Este esquema permite un control de acceso seguro y sencillo al sistema de carga inalámbrica.

Figura 6.

Diagrama de bloques del sistema implementado.



3.4.2 Alimentación

Para el circuito de alimentación (ver Figura 7), se optó por dos métodos de entrada: a través del puerto USB tipo C o por pines directos (VIN y GND). Como sistema de protección, se mantuvieron las mismas medidas implementadas en la placa STEVAL-WBC86TX, incorporando un diodo supresor de picos (D7) para proteger contra sobretensiones y un fusible (F1) para limitar sobre corrientes. Además, se integró la bobina L1, que actúa como filtro de ruidos y brinda una protección adicional ante transitorios en la línea de alimentación.

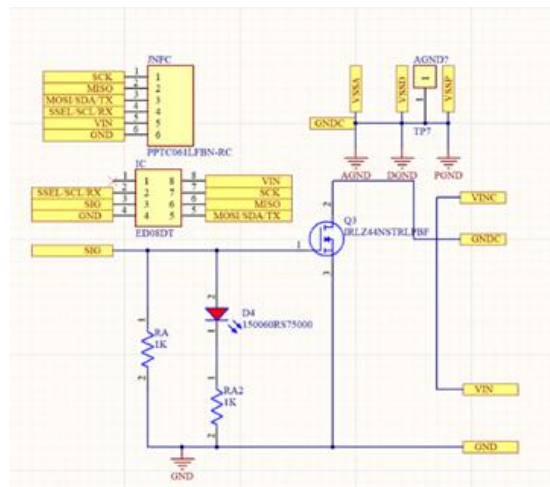
La selección del medio de entrada se realiza mediante jumpers, lo que brinda al usuario la posibilidad de elegir rápidamente la fuente de alimentación más conveniente según la

como indicador visual de la activación, y una resistencia (RA) en paralelo para descargar la capacitancia interna del MOSFET cuando se desactiva.

Además, se implementó una separación de tierras (GND), de forma que el cargador permanece desconectado del sistema hasta que el MOSFET cierra el circuito entre la tierra del cargador y la tierra común. Esto permite que, antes de la autenticación, únicamente el ATtiny y el módulo NFC estén conectados a GND, asegurando así un control preciso del encendido del sistema completo.

Figura 8.

Diagrama de Autenticación.



3.4.4 Cargador

Finalmente, en el cargador (ver Figura 9), se implementó el sistema de circuitos basado en la placa STEVAL-WBC86TX, configurado para operar con una potencia de 5 W. Para la selección de la bobina transmisora se tomó como referencia la misma utilizada por la STEVAL; sin embargo, debido a la no disponibilidad de la referencia, se optó por reemplazarla por una de características equivalentes: la bobina 760308105 la cual cumple con los requisitos necesarios para una configuración de 5 W (Würth Elektronik, 2023).

Para conformar el circuito resonante LC, se incorporaron capacitores resonantes en serie (CS), cuya función es ajustar la frecuencia de resonancia del sistema a 100 kHz como frecuencia base considerando que posteriormente el controlador digital se encargara de entrar en concordancia con el estándar del protocolo Qi. El valor de estos capacitores fue calculado utilizando la fórmula:

$$C = \frac{1}{L(2\pi f)^2}$$

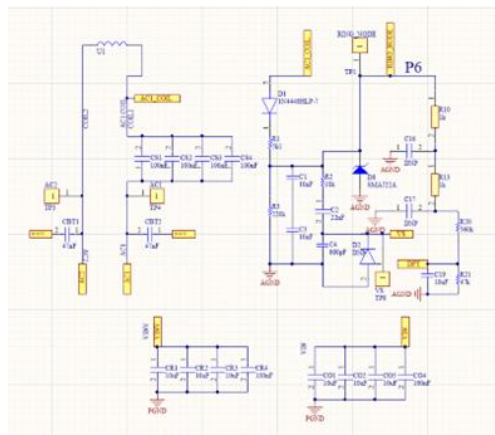
donde L corresponde a la inductancia de la bobina seleccionada y $f = 100 \text{ kHz}$. A partir de este cálculo se obtuvo una capacitancia de aproximadamente 402 nF , por lo que se implementó cuatro capacitores de 100 nF en paralelo. Se seleccionaron capacitores COG con un voltaje mínimo de 50 V , para asegurar una buena estabilidad térmica y minimizar las variaciones de capacitancia bajo condiciones reales de operación.

En los nodos de alimentación VIN y VINV, se implementó una red de capacitores cerámicos en paralelo ($3 \times 10 \mu\text{F} + 1 \times 100 \text{ nF}$), logrando una capacitancia total de aproximadamente $30.1 \mu\text{F}$ por nodo. Esta disposición mejora la respuesta ante cambios rápidos de carga y contribuye al filtrado del ruido presente en la línea de alimentación. Se utilizaron capacitores con dieléctrico X7R, de voltaje superior al máximo de entrada, siguiendo las recomendaciones del fabricante y de la placa STEVAL.

Adicionalmente, se tuvo en cuenta el fenómeno de *derating* por temperatura y polarización DC, por lo que se sobredimensionó ligeramente la capacidad total para mantener un rendimiento estable durante la operación. También se incorporó un diodo TVS (*Transient Voltage Suppression*) para proteger la línea de alimentación de la bobina (D8), así como capacitores de filtrado en los pines de comunicación.

Figura 9.

Diagrama de las conexiones del cargador.

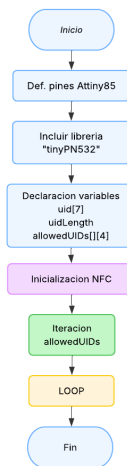


3.4.5 Protecciones

En el diseño final del sistema se implementaron las protecciones de seguridad provistas por la placa STEVAL-WBC86TX, las cuales actúan tanto a nivel de hardware como de software. Estas tienen como objetivo evitar daños en la placa transmisora o en el receptor frente a condiciones inesperadas como sobrecorriente o sobretensión. Las protecciones de hardware están integradas por defecto, incluyendo un fusible de 3 A y un diodo TVS de 22 V. Las protecciones por software pueden habilitarse o ajustarse desde la GUI, permitiendo configurar umbrales según los requerimientos del sistema. Todas estas funciones fueron integradas en el diseño final, garantizando una operación segura y confiable.

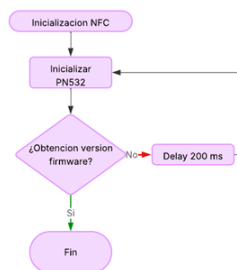
3.5 Implementación del firmware de Autenticación

El sistema de autenticación del cargador inalámbrico fue implementado utilizando un microcontrolador ATtiny85 y un módulo de lectura NFC basado en el chip PN532. El objetivo principal de este sistema es verificar si un dispositivo NFC es autorizado antes de activar el proceso de carga inalámbrica. A continuación, se describe el funcionamiento general del código desarrollado ver Figura 10, así como las funciones principales que componen su estructura.

Figura 10.*Diagrama de flujo – Autenticación sistema NFC*

3.5.1 Inicialización del Módulo NFC

Al iniciar el sistema, se configura el pin de control del cargador inalámbrico (WC) como salida digital, permitiendo así habilitar o deshabilitar el paso de energía según la autenticación. Luego se inicializa el módulo NFC y se consulta la versión del *firmware* del chip PN532 para asegurar su correcto funcionamiento. En caso de no detectarse el *hardware*, el sistema permanece en un estado de espera continua, como se muestra en la Figura 11. Finalmente, el lector NFC se configura para realizar intentos pasivos de lectura de forma indefinida, habilitando la detección de etiquetas compatibles.

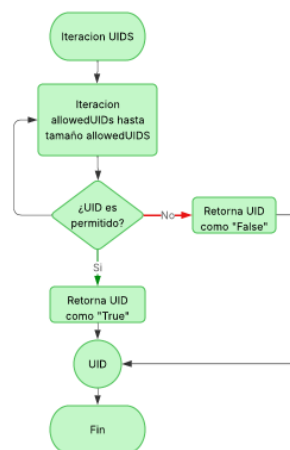
Figura 11.*Diagrama de flujo - Inicialización del sistema NFC*

3.5.2 Verificación del UID

El sistema incorpora un mecanismo de validación que permite determinar si el identificador único (UID) detectado por el lector NFC corresponde a uno previamente autorizado. Para ello, se realiza una comparación entre el UID leído y una lista predefinida de identificadores válidos almacenados en la memoria del microcontrolador. Si se encuentra una coincidencia exacta, el sistema reconoce el dispositivo como autorizado, tal como se representa en la Figura 12.

Figura 12.

Diagrama de flujo – Verificación UIDS



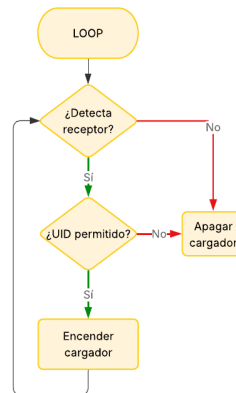
3.5.3 Bucle Principal del Sistema

El comportamiento continuo del sistema se basa en un ciclo de operación en el que se intenta detectar de manera pasiva un UID a través del lector NFC. En caso de lograrse una lectura exitosa, el identificador es evaluado mediante el mecanismo de verificación descrito anteriormente. Si el UID es válido, el sistema habilita el pin de control que permite la activación del cargador inalámbrico. Si el UID no corresponde a uno autorizado, o si no se detecta ningún identificador, el sistema mantiene el cargador desactivado como medida de seguridad.

Además, tras cada intento de lectura, se reinicia la variable que almacena la longitud del UID detectado y se introduce un breve retardo para evitar lecturas repetidas en intervalos muy cortos, como se muestra en la Figura 13.

Figura 13.

Diagrama de flujo – Bucle principal



3.6 Prototipo del Dispositivo

En esta sección se presenta el desarrollo para realizar un prototipo funcional del sistema de carga inalámbrica con autenticación, partiendo desde las pruebas realizadas en *protoboard* para la autenticación hasta una implementación en placa de ensamble universal (Baquelita). Este proceso abarcó la integración del *hardware* con el *software*, así como la validación de la autenticación del dispositivo receptor utilizando la placa STEVAL-WBC86TX como transmisor. Cada fase fue realizada para permitir corregir errores y poder garantizar el funcionamiento del sistema. A continuación, se describen las fases seguidas en el desarrollo del prototipo.

3.6.1 Verificación experimental del sistema de carga inalámbrica

El primer paso en la implementación del sistema consistió en validar el funcionamiento de la placa STEVAL-WBC86TX, enfocándonos en su consumo y su capacidad de carga inalámbrica. Esta validación se realizó en un entorno experimental, como se muestra en las Figuras 14.

Una vez verificado el correcto funcionamiento de la placa, se procedió al montaje inicial del sistema de autenticación en una *proto-board*. Este montaje estuvo compuesto principalmente por el microcontrolador ATtiny85, programado para gestionar el proceso de autenticación mediante un módulo NFC. En la Figura 15 se muestra cómo, al acercar un Tag autorizado al módulo NFC, el ATtiny85 reconoce la autenticación y enciende un LED como señal de autorización.

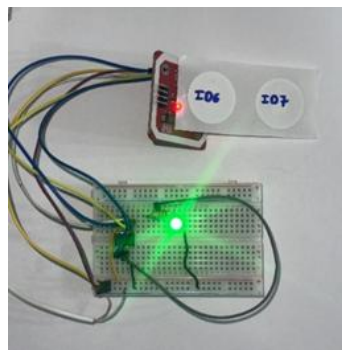
Figura 14.

Placa STEVAL-WBC86TX en funcionamiento.



Figura 15.

Sistema de autenticación en funcionamiento.



Para el control de potencia, se realizó el montaje de una resistencia de 4.7 ohmios con el propósito de simular la carga del dispositivo y para gestionar el paso de corriente hacia dicha carga, se incorporó un MOSFET IRLZ44NSTRLPBF, el cual es activado mediante una señal enviada por el ATtiny85. En la Figura 16 se puede observar el montaje completo junto a la carga, que incluye

el MOSFET, el microcontrolador ATtiny85, el módulo NFC y el tag utilizado para la autenticación.

Figura 16.

Sistema de potencia.

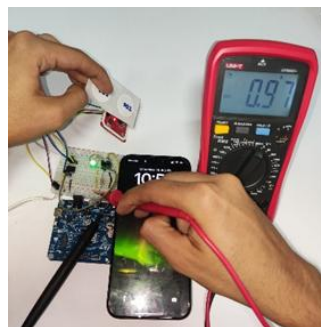


3.6.2 Integración de la protoboard con la placa STEVAL-WBC86TX

En esta fase, se integró el sistema de autenticación montado en *protoboard* con la placa STEVAL-WBC86TX, con el objetivo de verificar que el dispositivo solo permitiera la carga inalámbrica tras una autenticación exitosa. Como se muestra en la Figura 17, esta integración incluyó la placa STEVAL, el montaje en *protoboard* del ATtiny85 y el MOSFET, junto con el módulo NFC. Durante las pruebas, se evidenció que, al autenticar correctamente la tarjeta, el sistema permitía el paso de corriente a la placa STEVAL, habilitando así la carga inalámbrica. El encendido del LED sirvió como indicador visual del estado de autenticación.

Figura 17.

Integración protoboard con STEVAL-WBC86TX.



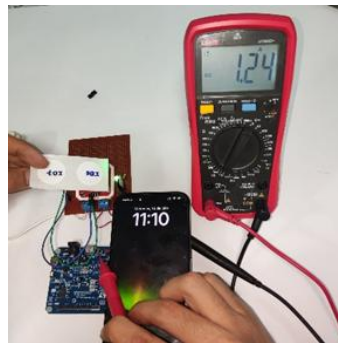
3.6.3 Integración de la placa baquelita universal

Para mejorar la conexión del sistema, se realizó una versión del circuito de autenticación sobre una placa de ensamble universal (Baquelita), para poder reducir las pérdidas por resistencia en los cables mejorando así la eficiencia del sistema y garantizando una conexión más fiable entre los elementos del circuito.

Esta versión integró el ATtiny85, el módulo NFC y el MOSFET, como se observa en la Figura 18.

Figura 18.

Sistema en placa de ensamble universal (Baquelita).



La finalidad de esta etapa fue realizar el circuito en una estructura más compacta, donde se muestra como el sistema, una vez alimentado, permite el paso de corriente hacia la placa de desarrollo STEVAL únicamente cuando se detecta una autenticación válida, cumpliendo así con el objetivo de seguridad en el proceso de carga.

3.6.4 Identificación de errores, ajustes y validación final

Durante el proceso de pruebas, se identificó un problema relacionado con el control del paso de corriente. Inicialmente, se utilizó un MOSFET IRF540N, sin embargo, este componente no alcanzaba su punto de saturación con los niveles de tensión suministrados por el ATtiny85, lo que impedía el paso adecuado de corriente al sistema.

Tabla 2.*Comparación entre los MOSFET IRLZ44NSTRLPBF e IRF540*

Información	MOSFET IRLZ44NSTRLPBF	MOSFET IRF540	Diferencias
Tipo de Canal	Canal N, nivel lógico	Canal N, estándar	El IRLZ44N puede ser controlado directamente por microcontroladores de 5V
$R_{DS(on)}$	$\approx 0.022 \Omega$	$\approx 0.077 \Omega$	El IRLZ44N tiene menor resistencia interna, lo que implica menores pérdidas.
Corriente máxima de drenaje I_D	47 A	33 A	El IRLZ44N soporta mayor corriente continua.
Tensión de compuerta para encendido	2–4 V (logic level)	≥ 10 V	IRLZ44N puede ser activado con bajo voltaje (ideal para MCUs)

Nota. Información técnica tomada de los datasheets de Vishay para IRLZ44NSTRLPBF (2017) e IRF540 (2015).

Ante esta limitación, se sustituyó por el MOSFET IRLZ44NSTRLPBF teniendo en cuenta la información mostrada en la Tabla 2 anterior, esto debido a que presenta una menor tensión de compuerta necesaria para su conmutación. Esta modificación permitió que el ATtiny85 pudiera controlarlo directamente, resolviendo así el problema identificado y permitiendo la validación funcional del sistema.

3.7 Desarrollo e implementación final del Dispositivo

Para el diseño de la PCB del sistema de carga inalámbrica con autenticación, se siguieron las recomendaciones del fabricante de la placa STEVAL-WBC86TX, con el objetivo de optimizar el rendimiento eléctrico y térmico del sistema. Entre las principales estrategias aplicadas se incluyó el uso de pistas de potencia anchas, blindajes mediante planos de tierra, separación adecuada de

trayectorias de retorno de corriente y un enrutado cuidadoso para minimizar interferencias electromagnéticas.

El diseño final implementó una PCB de cuatro capas para permitir una distribución eficiente de señales, planos de tierra y rutas de alta frecuencia. Se emplearon vías THT (*Through-Hole Technology*) para mejorar la interconexión entre capas y facilitar la disipación térmica. Además, se incorporaron dos referencias de tierra separadas (GND y AGND) para aislar el sistema principal del módulo de autenticación. Estas tierras se conectan internamente una vez se verifica una etiqueta NFC válida, lo cual permite el encendido del sistema de carga.

La disposición de los planos de tierra fue cuidadosamente seleccionada para asegurar un aislamiento eficiente, manteniendo el control sobre las trayectorias de corriente y evitando bucles de tierra. Esta organización permitió ubicar el sistema de autenticación sin interferir con los demás componentes del circuito.

El diseño y el prototipado final de la PCB, así como los detalles específicos de enrutado, distribución de componentes, planos de tierra y ensamblaje, se presentan en las imágenes e ilustraciones incluidas en los apéndices (véase apéndice D).

Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas funcionales en condiciones reales, evaluando la eficiencia del sistema, la estabilidad de la autenticación NFC y la respuesta del cargador. Estos resultados validan la viabilidad del diseño y su implementación como una solución funcional e integrada para carga inalámbrica segura.

3.8 Pruebas y validación del sistema

Después de completar las etapas previamente descritas, se avanzó hacia el objetivo principal del proyecto: la obtención de un sistema integrado de carga inalámbrica con autenticación. Para lograrlo, se llevaron a cabo una serie de pruebas y ajustes que permitieron validar su correcto funcionamiento. A continuación, se detalla lo ejecutado en esta etapa.

3.8.1 *Fabricación y ensamble del dispositivo*

Una vez finalizado el diseño de la PCB, se procedió a su fabricación y al montaje de los componentes electrónicos. En la Figura 19 se muestra la placa una vez fabricada, antes del ensamblaje, mientras que en la Figura 20 se presenta el dispositivo completamente ensamblado, evidenciando la integración de todos los módulos diseñados.

Figura 19.

PCB final sin ensamblar.

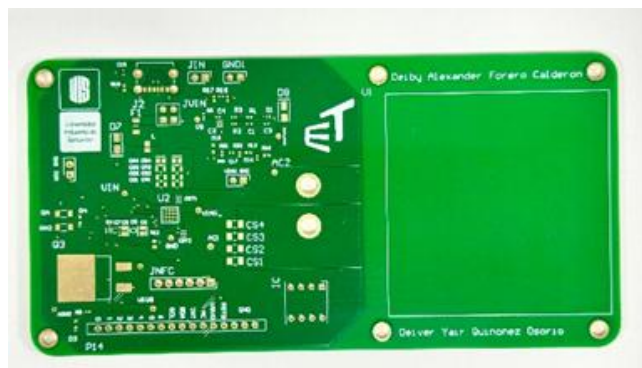
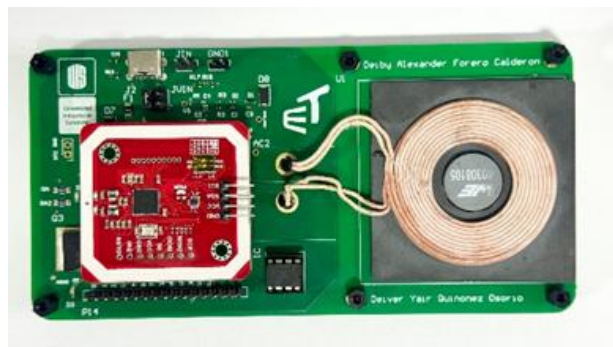


Figura 20.

PCB final ensamblada.



3.8.2 *Pruebas iniciales*

Para comenzar con las pruebas del dispositivo final, se procedió a conectar la alimentación con el fin de verificar las tensiones en los distintos puntos de prueba. Sin embargo, al medir, se detectaron valores de 0.5 V en puntos donde se esperaban 5 V.

Con el fin de identificar la causa de este comportamiento, se realizó un análisis del esquemático. En él se evidenció los diodos supresores de tensión (TVS), los cuales pueden ser unidireccionales o bidireccionales, dependiendo de la referencia del componente utilizado. Al consultar nuevamente el *datasheet* de los diodos ensamblados, se corroboró que se trataba de un modelo unidireccional, y que el montaje de dicho componente había sido ensamblado de forma invertida lo cual generaba la tensión observada en los puntos de prueba.

Para solucionar este problema, se procedió a desoldar y reubicar correctamente el diodo. Luego de realizar este ajuste, se energizó nuevamente el sistema, obteniendo ahora una tensión estable de 5 V en los distintos puntos de prueba de la placa.

3.8.3 Prueba autenticación y encendido del IC STWBC86

Una vez corregido el inconveniente inicial, se procedió a acercar un tag autorizado al sistema, lo cual provocó el encendido completo de la placa. Aunque el circuito integrado STWBC86 aún no había sido programado, esta prueba permitió verificar el funcionamiento de los reguladores LDO integrados.

Se comprobó que tanto el regulador de 5 V como el de 1.8 V operaban correctamente, lo que permitió concluir que el IC se encontraba en condiciones funcionales óptimas para las siguientes etapas del desarrollo.

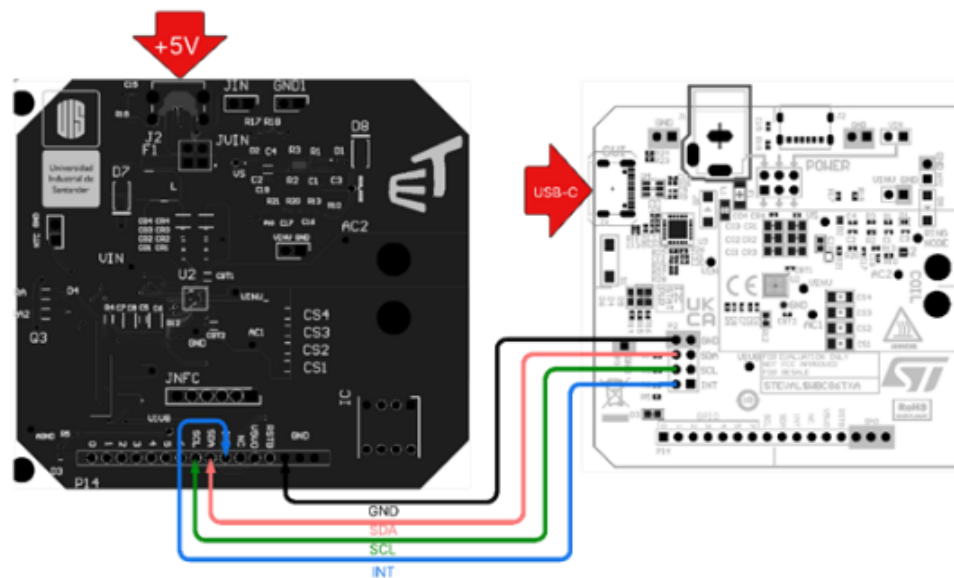
3.8.4 Conexiones y comunicación

Con el dispositivo correctamente energizado, se procedió a establecer la conexión del convertidor FT260Q y del módulo de comunicación I²C incorporado en la placa de evaluación STEVAL-WBC86TX. Esta configuración permitió habilitar la interfaz de comunicación mediante un puerto USB tipo C, facilitando la conexión directa del sistema con el ordenador para su posterior monitoreo y configuración (ver Figura 21). Además, esta interfaz proporcionó acceso a las

herramientas gráficas de STMicroelectronics, permitiendo la supervisión en tiempo real de parámetros críticos como tensión, corriente y potencia transferida. Gracias a esta integración, fue posible realizar ajustes de configuración de manera ágil y precisa, reduciendo tiempos de prueba y optimizando el desempeño general del sistema.

Figura 21.

Interfaz I²C entre el sistema final de carga inalámbrica con autenticación y la placa transmisora STEVAL-WBC86TX.



3.8.5 Programación del dispositivo

Para la programación, se utilizó la información proporcionada por el fabricante. Con la ayuda del *software* STSW-WPSTUDIO, se logró actualizar el *firmware* y configurar el dispositivo de manera adecuada. La actualización del *firmware* se llevó a cabo mediante un archivo de parche con extensión *.memh*. Adicionalmente, se empleó un archivo de configuración, también en formato *.memh*, generado desde la interfaz gráfica (GUI) del *software*, utilizando la configuración base de la placa STEVAL-WBC86TX. Este archivo fue cargado al dispositivo con el fin de modificar los parámetros internos y adaptarlos a las necesidades específicas del sistema desarrollado.

3.8.6 Prueba de funcionamiento sin receptor

Una vez finalizada la programación, se energizó el sistema y se comprobó su correcto funcionamiento gracias a la interfaz gráfica del software STSW-WPSTUDIO, la cual permite el monitoreo en tiempo real de variables internas mediante el uso de los convertidores analógico-digital (ADC) integrados en el IC STWBC86, estableciendo comunicación directa por USB-C a través del protocolo I²C. A partir de este punto, se inició la comparación de los valores leídos en el dispositivo con aquellos obtenidos previamente en la placa de evaluación STEVAL-WBC86TX, con el fin de validar la equivalencia funcional y operativa entre ambos sistemas.

En la placa STEVAL-WBC86TX (ver Figura 23) se identifican picos de corriente de aproximadamente 100 mA, incluso en ausencia de carga. Estos pulsos están relacionados con la funcionalidad de verificación periódica del protocolo Qi, mediante la cual el sistema emite breves ráfagas para detectar posibles dispositivos receptores cercanos. Gracias a esta técnica, la tensión de salida no colapsa completamente, sino que se mantiene en niveles superiores a 1.8 V. En cambio, en el dispositivo desarrollado (ver Figura 22) no se observan pulsos similares, sino únicamente ruido residual, lo cual se atribuye al hecho de que el sistema corta totalmente la transmisión en ausencia de una carga autenticada, como parte del control por NFC implementado.

Figura 22.

Comportamiento del sistema desarrollado sin carga

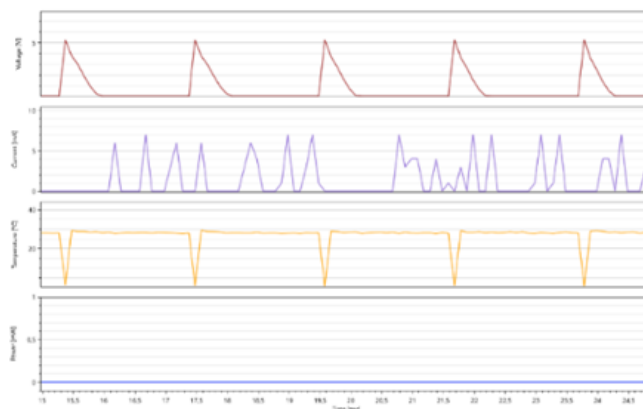


Figura 23.

Comportamiento de la placa STEVAL-WBC86TX sin carga conectada



3.8.7 Prueba de funcionamiento con receptor

Para esta prueba se utilizó como receptor un smartphone con capacidad de carga inalámbrica, el cual es compatible con el estándar Qi y capaz de recibir un mínimo de 5 W, requisito que corresponde con las especificaciones del sistema diseñado. Al iniciar la prueba, se evidenció que el smartphone no lograba cargar correctamente; el transmisor comenzaba a transferir energía, pero, al poco tiempo, interrumpía el proceso y bloqueaba completamente cualquier intento posterior de carga. Esta condición obligaba a reiniciar el sistema para volver a intentarlo.

Al analizar el comportamiento del sistema, se identificó que la interrupción era generada por el sistema de *Foreign Object Detection* (FOD). Esta función tiene como propósito detener el proceso de carga si detecta un margen de pérdida energética mayor al permitido, o si se presentan otras condiciones que puedan implicar riesgo. En este caso, mediante la interfaz del software STSW-WPSTUDIO, se detectó que se estaban generando falsos positivos, lo cual activaba la protección FOD de manera incorrecta.

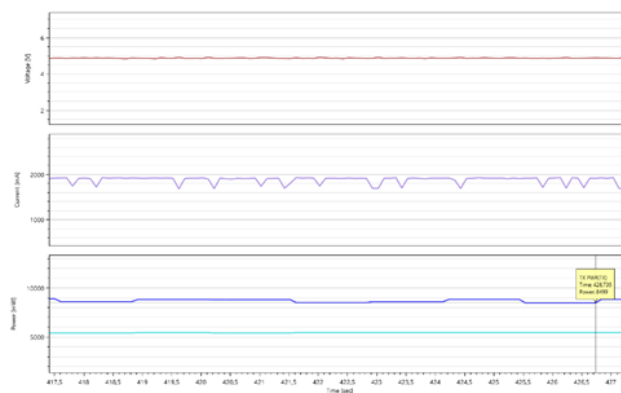
Con el fin de comprobar esta hipótesis, se decidió desactivar temporalmente la función de FOD para permitir el desarrollo de la prueba. Una vez desactivada esta protección, el smartphone inició la carga de forma estable (ver Figura 24), confirmando que el problema estaba asociado a una detección errónea de pérdidas.

Finalmente, se concluyó que estos falsos positivos fueron causados por un margen de pérdida de energía superior al umbral configurado, provocado posiblemente por el consumo adicional de los componentes integrados al sistema. Dichos consumos, aunque individuales pueden parecer pequeños, al acumularse generan una desviación significativa respecto a los valores nominales de potencia previstos en el diseño original del transmisor.

Al no estar contemplada esta demanda extra dentro de los parámetros esperados por el chip, el sistema interpretaba erróneamente la situación como una condición anómala de funcionamiento. Como medida de seguridad, el controlador detenía de manera preventiva la transferencia de energía, evitando posibles riesgos de sobrecarga o malfuncionamiento. Este comportamiento evidencia la sensibilidad del sistema frente a variaciones no previstas en el balance energético y resalta la importancia de considerar de forma detallada el consumo total de los periféricos adicionales en el diseño final.

Figura 24.

Prueba del dispositivo con Rx.



3.8.8 Prueba de eficiencia respecto a la STEVAL-WBC86TX

En este apartado se presenta una prueba comparativa con el objetivo de evaluar la eficiencia del sistema desarrollado frente a la placa de evaluación STEVAL-WBC86TX. Debido a que el sistema implementado incorpora una mayor cantidad de componentes adicionales —tales como el

microcontrolador ATtiny85, el módulo NFC PN532, el MOSFET IRLZ44N, indicadores LED, entre otros—, fue necesario calcular un consumo teórico aproximado para establecer una base de comparación. Este cálculo se resume en la Tabla 3, donde se estima que el sistema presenta un consumo total durante el proceso de carga del orden de ~7330 mW.

Tabla 3. Consumo teórico estimado del sistema en operación activa (modo de carga inalámbrica)

Componente	Tensión de operación (V)	Corriente estimada (mA)	Potencia estimada (mW)	Observaciones
STWBC86 (Tx inalámbrico)	5 – 20	~400	~2000	Consumo estimado en operación Qi BPP (5 W transmitidos), incluye control, modulación y FOD
ATtiny85	5	~6	~30	En modo activo, ejecutando autenticación
PN532 (módulo NFC)	5	~50	~250	En operación constante para lectura NFC
IRLZ44NSTRLPBF (MOSFET)	5 (Gate) / hasta 5 (Drain)	~0.02 (gate); disipación < 50	< 50 (pérdidas)	Disipa según la corriente de carga (~1.5 A), $R_{DS(on)} \approx 0.022 \Omega$
LED indicador (D4)	5	~10	~50	Encendido solo durante carga activa
Carga (batería)	—	—	5000	Hasta 5 W entregados al receptor vía inductiva (Qi)
Total, sistema (sin carga)	—	~466	~2330	
Total, sistema + carga	—	—	~7330	Incluye la potencia entregada a la batería

Nota. Esta tabla presenta valores teóricos aproximados obtenidos a partir de hojas de datos y condiciones típicas de operación. No se incluye el consumo del chip FT260Q al no formar parte del sistema final en operación. La potencia de la carga representa la energía transferida al dispositivo receptor a través del protocolo Qi BPP (5 W).

Si se observa la Figura 25, la potencia transmitida (PWTX) medida en el sistema fue de 8499 mW, mientras que la potencia recibida (PWRX) alcanzó los 5468 mW. Con base en estos datos, se calcula una eficiencia de transmisión inalámbrica del 64.34 %, lo cual es coherente con los valores típicos de eficiencia para sistemas de carga inductiva en configuración básica.

Comparando este valor con la estimación teórica inicial de potencia (7330 mW), se observa un incremento del 15.94 % en el consumo real, lo cual puede atribuirse a pérdidas por conmutación, calentamiento, o diferencias entre las condiciones ideales de cálculo y las reales de operación. A pesar de esta diferencia, el sistema se mantiene dentro de un rango aceptable de eficiencia energética.

Eficiencia de transmisión inalámbrica (real)

$$Eficiencia_{Inalámbrica} = \frac{P_{Rx}}{P_{Tx-Real}} * 100 = \frac{5468}{8499} * 100 \approx 64.34\%$$

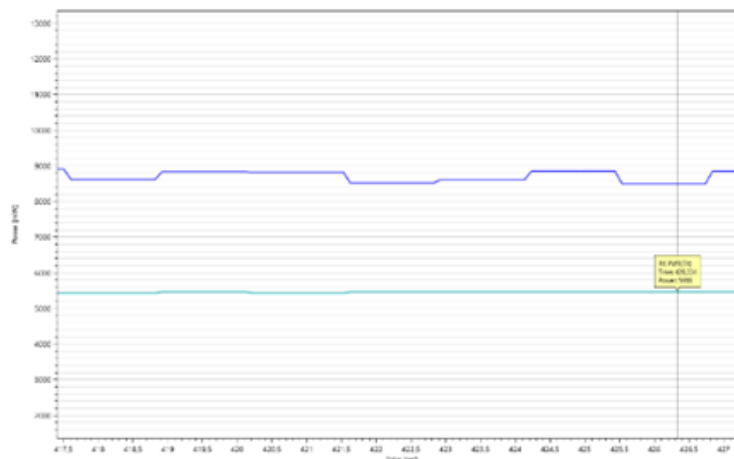
Desviación frente a la potencia teórica

$$Sobreconsumo = P_{Tx-Real} - P_{Tx-Teórica} = 8499 - 7330 \approx 1169 \text{ mW}$$

$$Incremento\ porcentual = \frac{1169}{7330} * 100 \approx 15.94\%$$

Figura 25.

Potencia del Tx y Rx del dispositivo desarrollado



Durante el desarrollo de la prueba, el sistema mantuvo una temperatura constante de 46.1 °C (ver Figura 26), lo que corrobora un funcionamiento estable y dentro de los márgenes de seguridad térmica establecidos para los componentes utilizados.

Figura 26.

Temperatura de carga



En las pruebas realizadas con la placa de evaluación STEVAL-WBC86TX (ver Figura 27), se obtuvo una potencia de transmisión (PWTX) de 5493 mW y una potencia recibida (PWRX) de 5273 mW. Esto representa una eficiencia de transferencia energética del 95.99 %, valor notablemente alto que refleja el nivel de optimización y ajuste que ofrece el firmware nativo del fabricante, especialmente bajo condiciones ideales sin carga resistiva significativa.

Figura 27.

Potencia del Tx y Rx de la STEVAL-WBC86TX



Al comparar ambos sistemas, se observa que la placa STEVAL-WBC86TX alcanza una eficiencia de transmisión energética del 95.99 %, mientras que el sistema desarrollado presenta una eficiencia del 64.34 %. Esto representa una diferencia de 31.65 puntos porcentuales, lo que indica que el prototipo alcanza aproximadamente un 67.01 % de la eficiencia lograda por la solución del fabricante.

Esta diferencia puede atribuirse a factores como el diseño del circuito impreso, la sintonización de bobinas, la calidad de los componentes pasivos, la gestión térmica y las pérdidas adicionales introducidas por el sistema de autenticación y conmutación por NFC. Sin embargo, el rendimiento alcanzado por el dispositivo desarrollado resulta aceptable dentro del contexto de un sistema funcional implementado desde cero y con integración personalizada.

Tabla 4. Comparativa de eficiencia.

Sistema	PW _{TX} (mW)	PW _{RX} (mW)	Eficiencia (%)
STEVAL-WBC86TX	5493	5273	95.99 %
Sistema desarrollado	8499	5468	64.34 %

Diferencia de eficiencia absoluta

$$95.99\% - 64.34\% = 31.65\%$$

Porcentaje de eficiencia relativa del sistema desarrollado frente a la STEVAL-WBC86TX

$$\frac{64,34}{95,99} * 100 \approx 67.01\%$$

4 Conclusiones

El presente proyecto logró cumplir con el objetivo general propuesto: implementar un sistema de carga inalámbrica de baterías con capacidad de autenticación. A través del desarrollo de un prototipo funcional, se integraron exitosamente tecnologías de transmisión de energía

inductiva y mecanismos de verificación mediante etiquetas NFC, garantizando un control de acceso eficaz al proceso de carga.

Desde el punto de vista técnico, los resultados alcanzados permiten concluir que el sistema propuesto es viable y funcional, al combinar adecuadamente los módulos electrónicos seleccionados. La autenticación mediante el microcontrolador ATtiny85 y el módulo PN532 se comportó de forma estable, permitiendo o bloqueando el paso de energía según la verificación de los UID autorizados. Esta integración no solo cumplió con el objetivo específico de establecer un mecanismo de autenticación, sino que también demostró ser una solución adaptable para contextos donde se requiera control de acceso energético.

En cuanto al sistema de carga inalámbrica, basado en el chip STWBC86 y la placa STEVAL-WBC86TX, se logró configurar y adaptar con éxito para operar bajo las condiciones del prototipo diseñado. La actualización del *firmware* y la personalización de parámetros a través del *software* STSW-WPSTUDIO evidencian la flexibilidad del ecosistema de desarrollo proporcionado por STMicroelectronics. Durante las pruebas, se identificaron comportamientos relevantes como los falsos positivos en la detección de objetos extraños (FOD), lo cual llevó a ajustar y desactivar temporalmente esta función para permitir una carga estable en dispositivos móviles. Este hallazgo pone de manifiesto la necesidad de considerar las pérdidas energéticas adicionales generadas por los componentes externos incorporados al diseño, aspecto que deberá ser optimizado en futuras versiones.

Desde el punto de vista del campo de la ingeniería electrónica este proyecto contribuye con una solución funcional y replicable para el desarrollo de sistemas de carga inalámbrica con control de acceso, integrando tecnologías comerciales existentes y estrategias de diseño accesibles. Además, sienta las bases para investigaciones futuras centradas en la implementación de chips más

avanzados, como los NTAG424 para autenticación segura, y el uso de microcontroladores con capacidades criptográficas como soporte para cifrado AES128.

En términos de rendimiento energético, el sistema desarrollado alcanzó una eficiencia de transmisión inalámbrica del 64.34 %, mientras que la placa STEVAL-WBC86TX operó con una eficiencia del 95.99 %, evidenciando un comportamiento altamente optimizado del sistema de referencia, y un desempeño funcionalmente aceptable en el sistema diseñado.

Finalmente, es importante mencionar que, aunque el sistema logró funcionar de forma adecuada, se identificaron restricciones vinculadas al alcance limitado de los componentes disponibles y a las capacidades de programación del microcontrolador utilizado. Estas limitaciones, sin embargo, no impidieron cumplir con los objetivos, pero sí abren nuevas oportunidades de mejora, como se propone en el capítulo de Recomendaciones.

5 Recomendaciones

A partir de la experiencia obtenida durante el desarrollo del sistema de carga inalámbrica con autenticación, se identificaron diversas oportunidades de mejora y líneas de trabajo que pueden ser abordadas en futuros proyectos. Estas recomendaciones buscan no solo complementar la solución implementada, sino también explorar nuevos enfoques técnicos que potencien la seguridad, la eficiencia y la aplicabilidad del sistema en distintos contextos. En primer lugar, una de las limitaciones del sistema desarrollado fue el nivel básico de seguridad ofrecido por las etiquetas NFC NTAG216, las cuales carecen de mecanismos criptográficos avanzados. Por tanto, se recomienda considerar la implementación de tags más seguros, como los NTAG424, los cuales incluyen autenticación mediante AES-128, protección contra clonación y generación de tokens

dinámicos. Esto permitiría reforzar el nivel de protección frente a accesos no autorizados, haciéndolo adecuado para aplicaciones en sectores más sensibles como el industrial o el médico.

En relación con lo anterior, también sería necesario evaluar el reemplazo del microcontrolador ATtiny85 por uno más potente, con la capacidad suficiente para ejecutar algoritmos criptográficos como AES-128 sin comprometer el rendimiento del sistema. Microcontroladores con mayor capacidad de procesamiento y soporte nativo de criptografía, como algunos de la familia STM32 o incluso versiones avanzadas de la línea AVR, serían opciones viables.

Otra línea de mejora relevante consiste en el aumento de la potencia de transmisión, superando el perfil BPP actual (5 W) para alcanzar configuraciones basadas en el *Magnetic Power Profile* (MPP) que soportan potencias mayores, entre 15 y 50 W. Esto permitiría extender la aplicabilidad del sistema a dispositivos con mayores requerimientos energéticos, como *tablets*, periféricos industriales o incluso herramientas médicas portátiles.

Desde el punto de vista del diseño de hardware, se sugiere integrar el módulo NFC dentro de la misma PCB, con el objetivo de reducir el tamaño total del sistema, minimizar interferencias electromagnéticas y facilitar la producción en serie. Este rediseño también permitiría optimizar el enrutamiento de señales y mejorar la eficiencia energética global del circuito.

Adicionalmente, sería útil explorar otras soluciones ofrecidas por la familia de chips STMicroelectronics, evaluando características adicionales como perfiles de carga avanzados, interoperabilidad con nuevos receptores Qi 2.0 o módulos con capacidad de carga bidireccional (*reverse charging*). Estas exploraciones podrían abrir la puerta a aplicaciones más innovadoras, como cargadores inteligentes adaptativos o estaciones de carga multipunto.

Referencias Bibliográficas

- Belkin. (2025). *The complete guide to wireless charging*.
<https://www.belkin.com/products/product-resources/wireless-charging-complete-guide/>
- Digital Trends. (2025). *What is NFC?* <https://www.digitaltrends.com/mobile/what-is-nfc/>
- Infineon Technologies. (2025). *Wireless charging: A guide to the Qi standard* [Whitepaper]. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Infineon_Whitepaper_OPTIGA_Trust_Charge-Whitepaper-v01_00-EN.pdf?da=t&fileId=8ac78c8c8929aa4d0189966608227abe
- International Rectifier. (2013). *IRLZ44NSTRLPBF: HEXFET® Power MOSFET* [Datasheet]. <https://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/597523/IRF/IRLZ44NSTRLPBF.html>
- Lu, X. (2015). *Wireless charging technologies: Fundamentals, standards, and network applications*. *Academia.edu*.
https://www.academia.edu/12029555/Wireless_Charging_Technologies_Fundamentals_Standards_and_Network_Applications
- Mou, X., & Sun, H. (2015). *Wireless power transfer: Survey and roadmap*. *arXiv*.
<https://arxiv.org/abs/1502.04727>
- Mouser Electronics. (2025). *Infineon Technologies wireless charging ICs*.
<https://eu.mouser.com/new/infineon/infineon-wlc1-wireless-charging-ics/>
- Mouser Electronics. (2025). *STMicroelectronics wireless charging ICs*.
<https://www.mouser.com/c/semiconductors/power-management-ics/wireless-charging-ics/?m=STMicroelectronics>

NXP Semiconductors. (2012). *PN532: NFC controller* [Datasheet].

<https://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/595327/NXP/PN532.html>

NXP Semiconductors. (2020). *NTAG213, NTAG215, NTAG216 – NFC Forum Type 2 Tag compliant ICs* [Datasheet]. https://www.nxp.com/docs/en/datasheet/NTAG213_215_216.pdf

NXP Semiconductors. (2025). *Wireless power*. https://www.nxp.com/products/power-management/wireless-power:WIRCHA_IC5

Peng, C., Li, X., & Wang, Y. (2024). Research on NFC wireless charging authentication based on magnetic coupling resonance. *ICT Express*. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2024.05.003>

Rahman, M. M., Shanto, M. S. I., Rani, T., & Paul, L. (2024). A comprehensive review of wireless power transfer methods, applications, and challenges. *Engineering Reports*, 6(6), e12951. <https://doi.org/10.1002/eng2.12951>

ReliaSoft. (2025). *The basics of derating and how it works*.

<https://help.reliasoft.com/articles/content/hotwire/issue92/relbasics92.html>

Renesas. (2025). *P9415-R - 15W wireless power receiver with WattShare™ mode*.

<https://www.renesas.com/en/general-parts/p9415-r-15w-wireless-power-receiver-wattshare-mode>

Samsung Semiconductor. (2025). *Samsung's upcoming PMIC, S2MIW06, is redefining the future of wireless charging*. <https://semiconductor.samsung.com/news-events/tech-blog/redefining-the-future-of-wireless-charging/>

STMicroelectronics. (2022). *STWBC86: Qi-based wireless power transmitter controller* [Datasheet]. https://github.com/Dexaca/Trabajo_de_grado_Deiby_Forero_Deiver_Quionez/blob/8b25eb6cb2415c66383c6755b1995de069e0e2b7/Datasheets/stwbc86.pdf

STMicroelectronics. (2024). *STEVAL-WBC86TX user manual* [User manual].

https://github.com/Dexaca/Trabajo_de_grado_Deiby_Forero_Deiver_Quionez/blob/8b25eb6cb2415c66383c6755b1995de069e0e2b7/Datasheets/UM-STEVAL-WBC86TX-UM3161.pdf

STMicroelectronics. (2025). *Qi compatible wireless charging (up to 100W)*.

<https://www.st.com/en/applications/power-supplies-and-converters/qi-compatible-wireless-charging-up-to-100w.html>

Wireless Power Consortium. (2025). *Home*. <https://www.wirelesspowerconsortium.com/>

Wireless Power Consortium. (2025). *Qi wireless charging*.

<https://www.wirelesspowerconsortium.com/standards/qi-wireless-charging/>

Würth Elektronik. (2023). *760308105: Wireless power transfer coil* [Datasheet].

<https://www.we-online.com/components/products/datasheet/760308105.pdf>

Zens. (2025). *How many watts wireless charger?* <https://zens.tech/wireless-charging/fast-charging/watt/>

Zhang, Z., Pang, H., Georgiadis, A., & Cecati, C. (2020). Wireless power transfer – An overview. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 14(2), 22–35.

<https://doi.org/10.1109/MIE.2019.2962227>

Atmel. (2011). *ATtiny85: 8-bit AVR microcontroller with 8K bytes In-System Programmable Flash* [Datasheet]. <https://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/174761/ATMEL/ATTINY85.html>

Apéndices

Apéndice A

Repositorio GitHub del sistema de carga inalámbrica con autenticación NFC

Este anexo contiene el enlace al repositorio público en GitHub que almacena todos los archivos asociados al desarrollo del proyecto. Entre los elementos disponibles se encuentran: el código fuente del microcontrolador ATtiny85, archivos de programación (.memh), documentos técnicos y datasheets de los componentes utilizados, archivos Gerber para la fabricación de la PCB, y los archivos de configuración y parches de firmware utilizados con la placa de evaluación STEVAL-WBC86TX.

Enlace

al

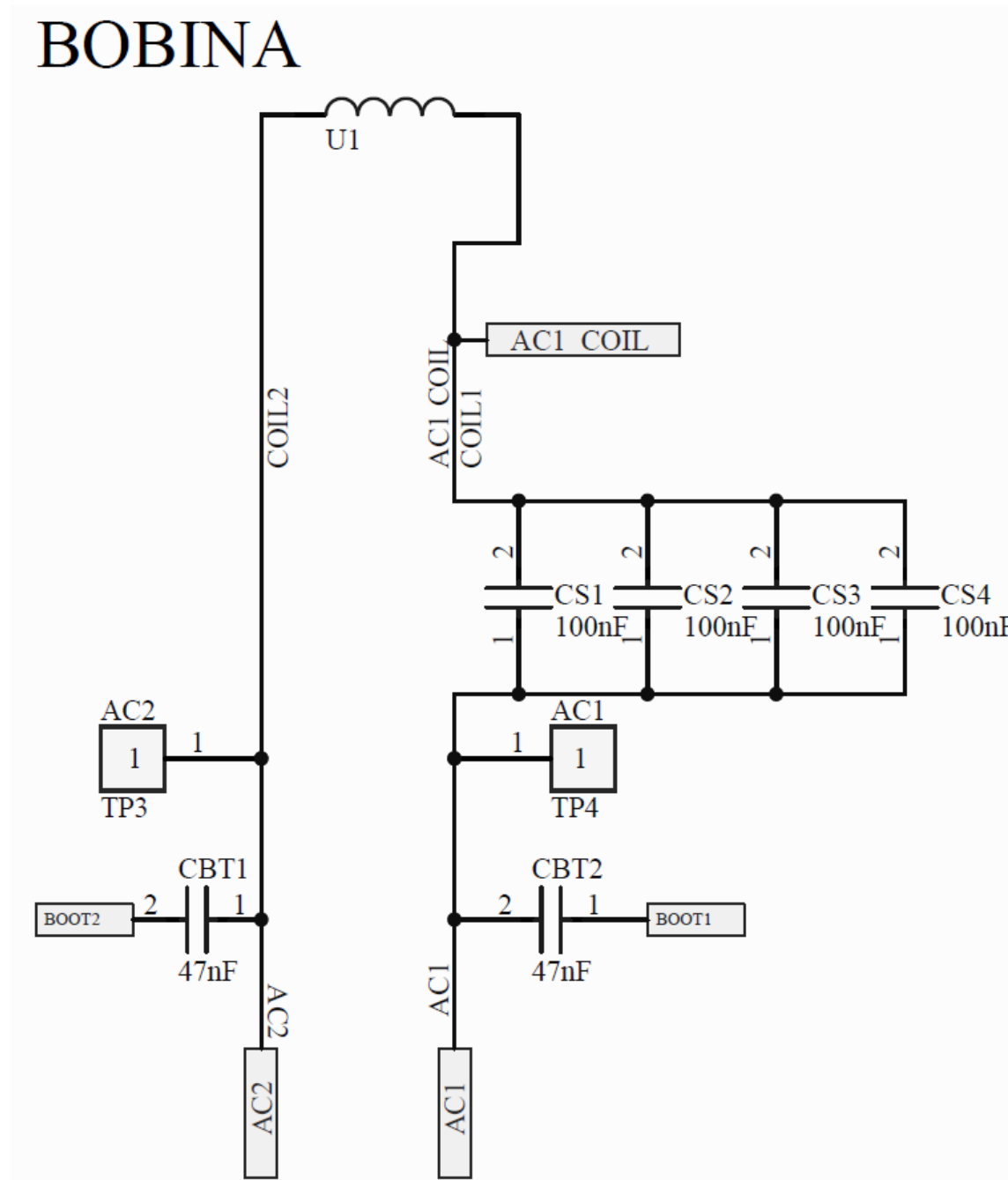
repositorio:

[https://github.com/Dexaca/Trabajo de grado Deiby Forero Deiver Qui-onez](https://github.com/Dexaca/Trabajo_de_grado_Deiby_Forero_Deiver_Qui-onez)

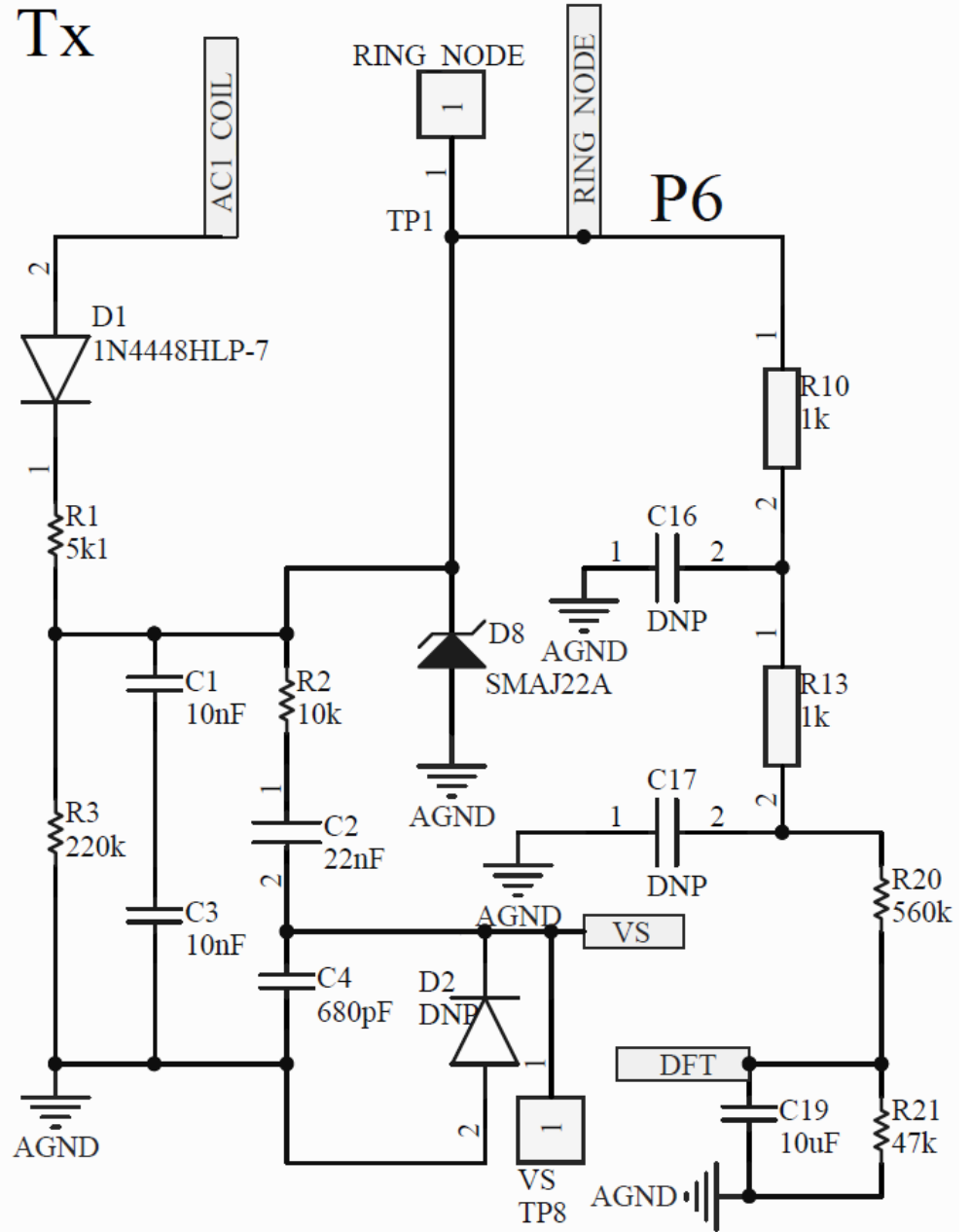
Apéndice B

Esquemático del sistema de carga inalámbrica con autenticación

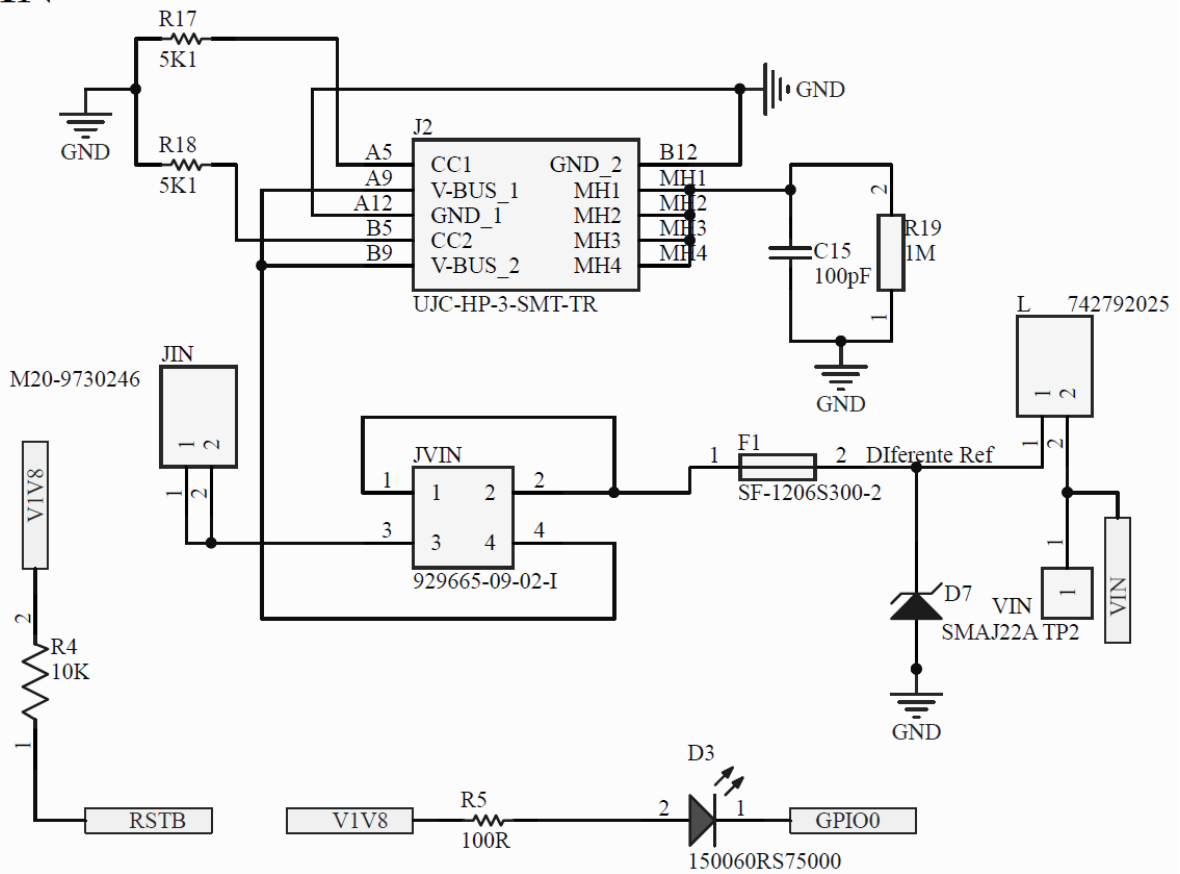
BOBINA



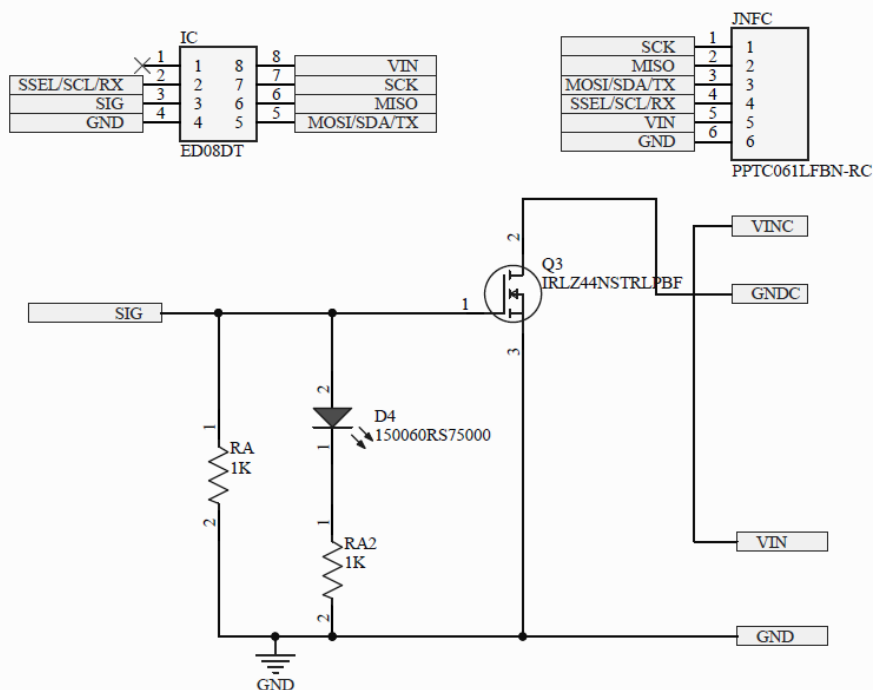
FILTRO Tx



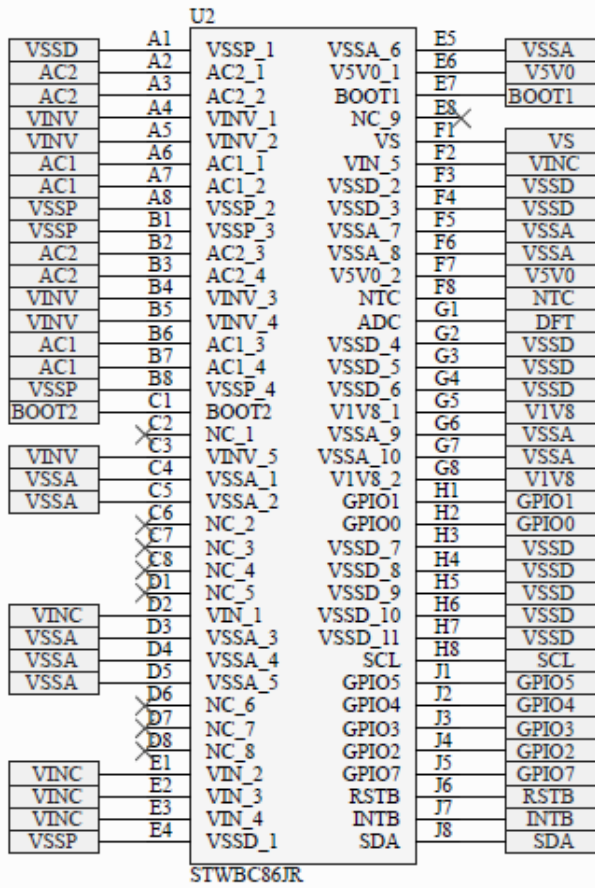
VIN



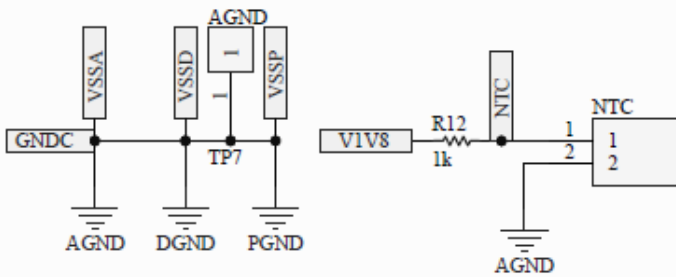
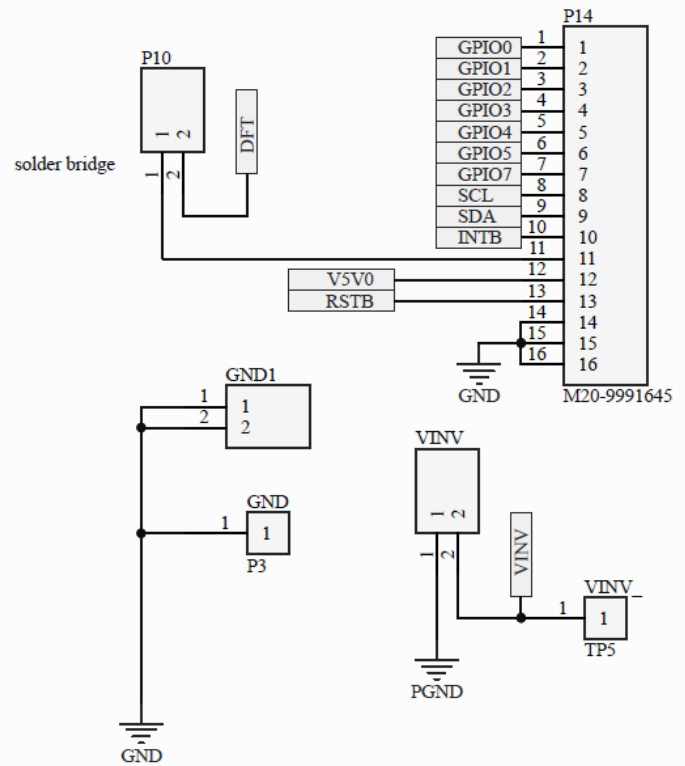
AUTENTICACIÓN



STWBC86JR



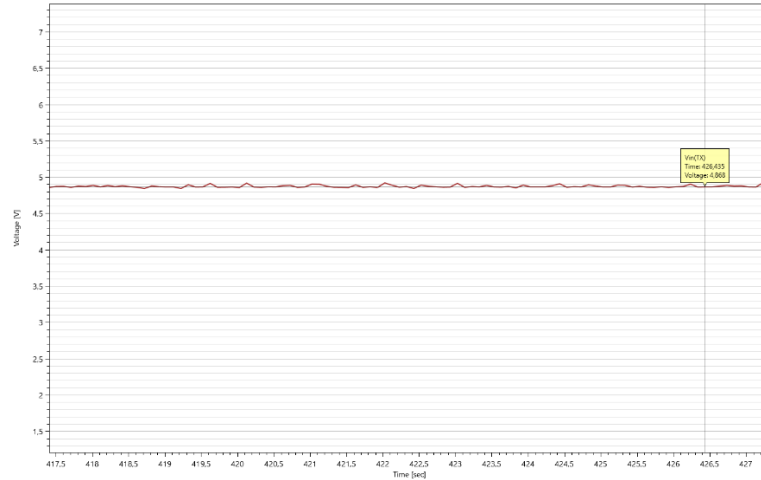
CONECTORES



Apéndice C

Resultados experimentales: gráficas de potencia, eficiencia, temperatura entre otros

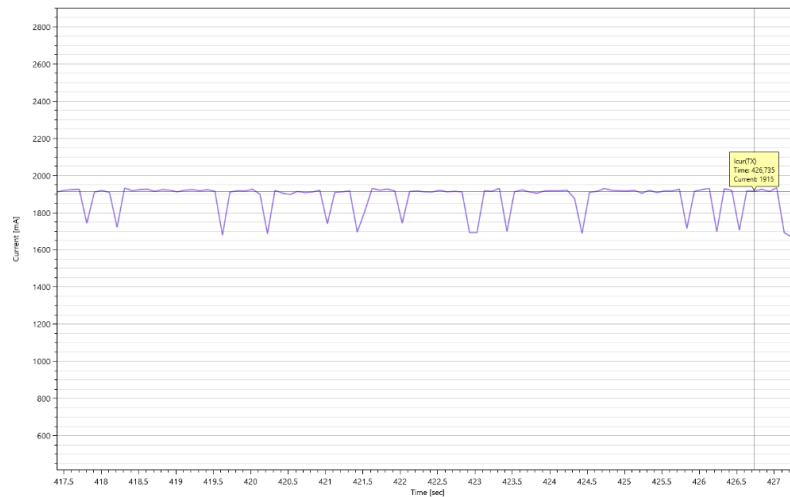
Figura C-1. *Gráfica de tensión en el transmisor con autenticación.*



Gráfica de tensión medida por el transmisor durante la prueba de carga con autenticación.

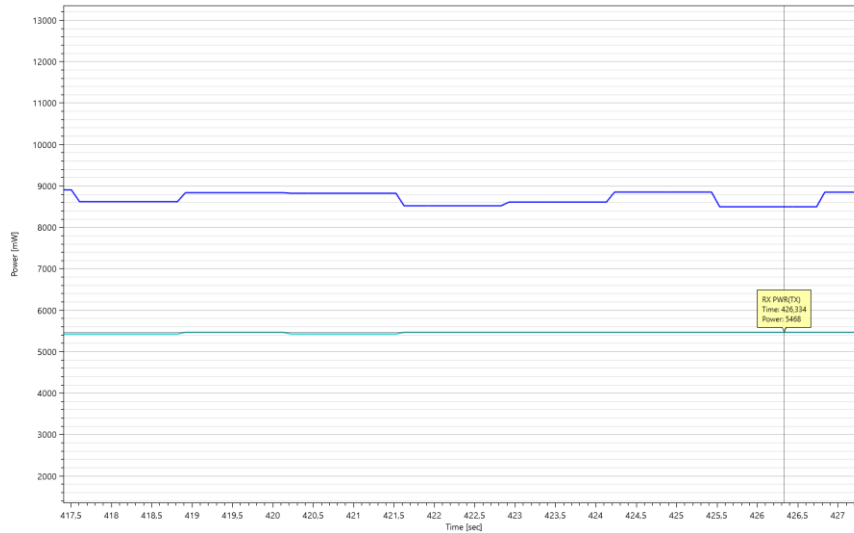
Se observa un comportamiento relativamente estable con un valor promedio de 4.868 V

Figura C-2. *Gráfica de corriente en el transmisor con autenticación.*

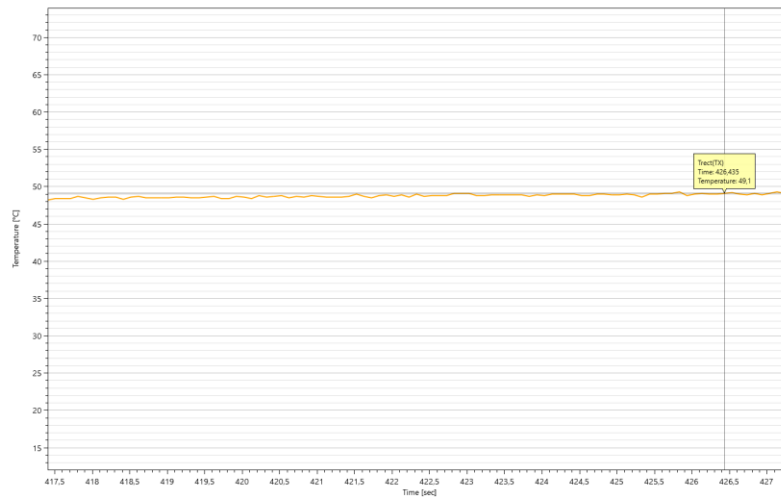


Gráfica de corriente medida por el transmisor durante la prueba de carga con autenticación.

Se observa una ligera oscilación con valores entre 1750 mA y 1915 mA, manteniendo un comportamiento estable.

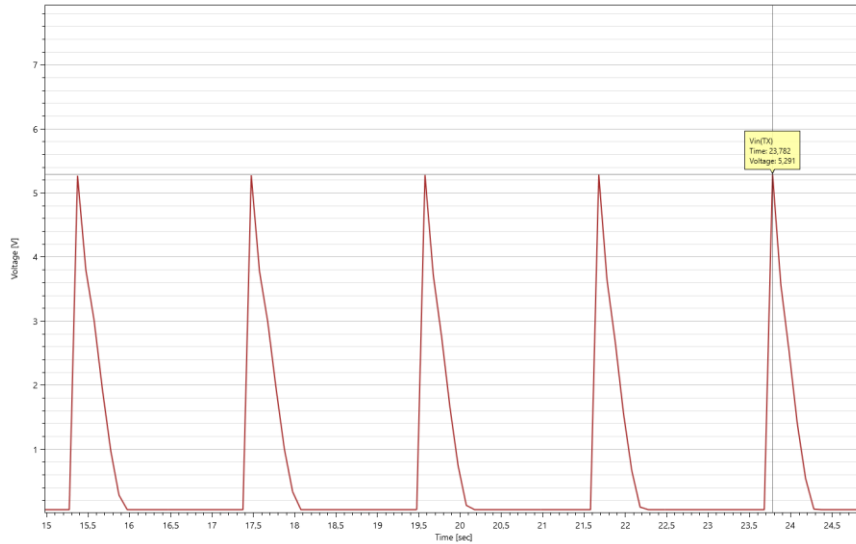
Figura C-3. *Gráfica de potencia en la prueba de carga con autenticación.*

Gráfica de potencia durante la prueba de carga con autenticación. La potencia suministrada por el transmisor oscila entre 8600 mW y 8700 mW, mientras que el receptor recibe un valor estable de 5468 mW.

Figura C-4. *Gráfica de temperatura en la prueba de carga con autenticación.*

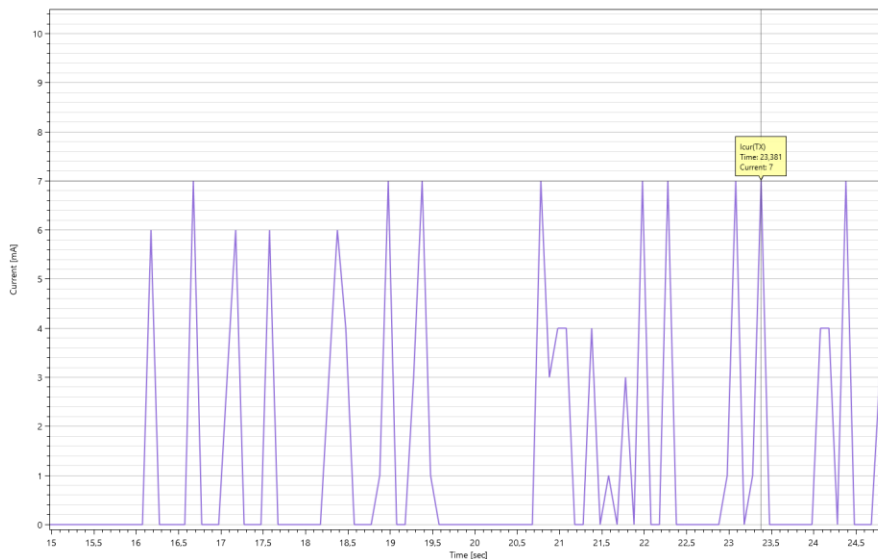
Gráfica de temperatura registrada durante la prueba de carga con autenticación. Se observa un valor constante de 49.1 °C, lo que indica un comportamiento térmico estable del sistema.

Figura C-5. *Gráfica de tensión del transmisor sin carga.*

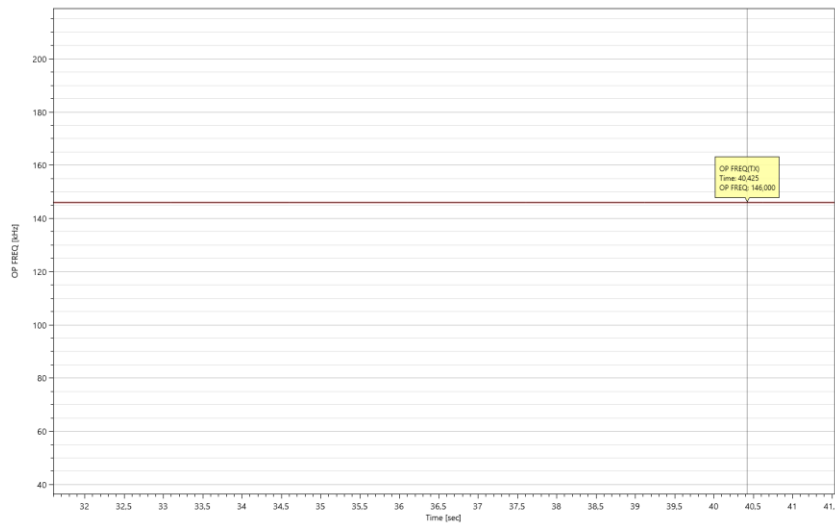


Gráfica de tensión medida por el transmisor sin presencia de carga. Se evidencian picos de tensión entre aproximadamente 5.29 V y 0.22 V, generados por el transmisor como parte del proceso de detección activa de un receptor inalámbrico cercano.

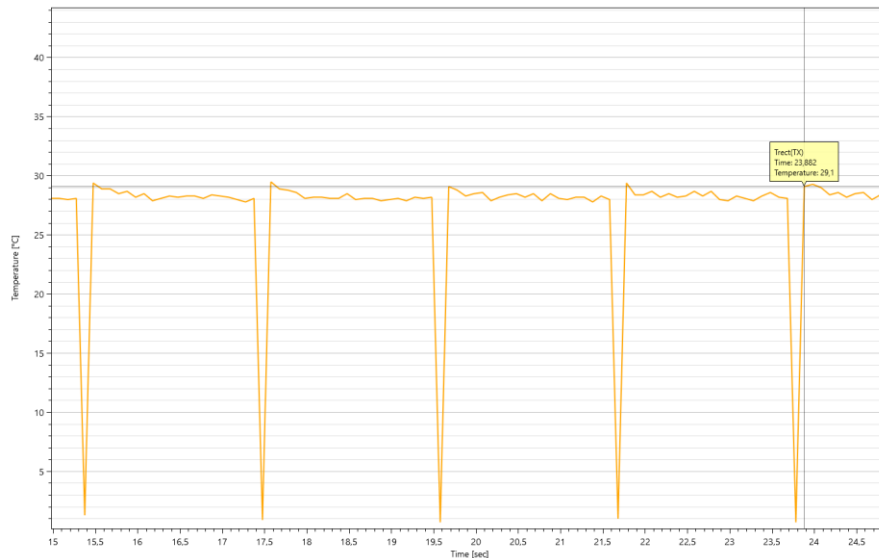
Figura C-6. Gráfica de corriente sin carga conectada.



Gráfica de corriente medida sin carga conectada al sistema. Se observan picos entre aproximadamente 7 mA y 0 mA, atribuidos a ruido eléctrico y variaciones propias del entorno, sin actividad real de carga.

Figura C-7. Frecuencia de operación del sistema de carga inalámbrica.

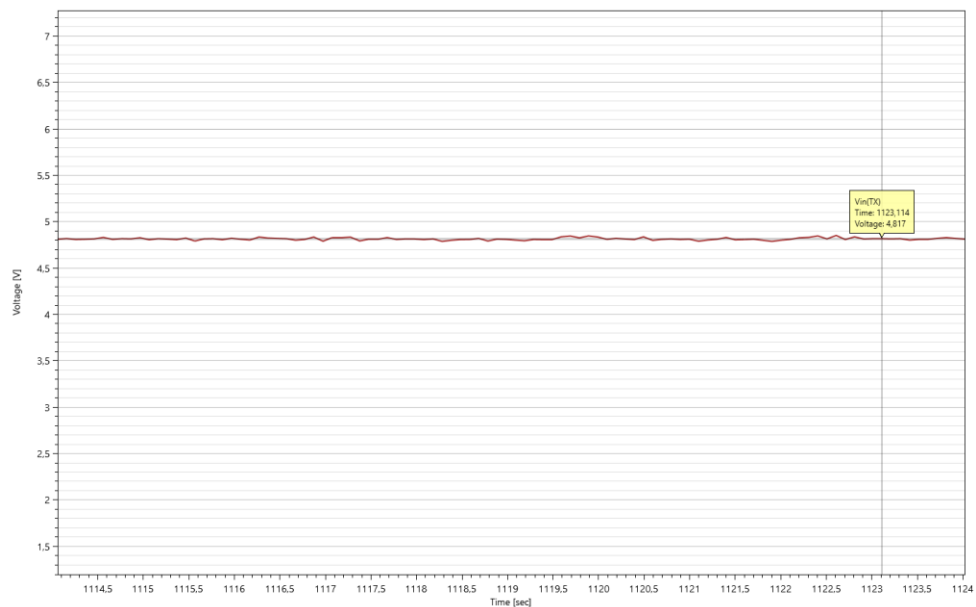
Gráfica de frecuencia de operación del sistema de carga inalámbrica. Se evidencia una frecuencia constante de 146 kHz durante toda la prueba, correspondiente al valor gestionado por el transmisor.

Figura C-8. Temperatura del transmisor sin carga.

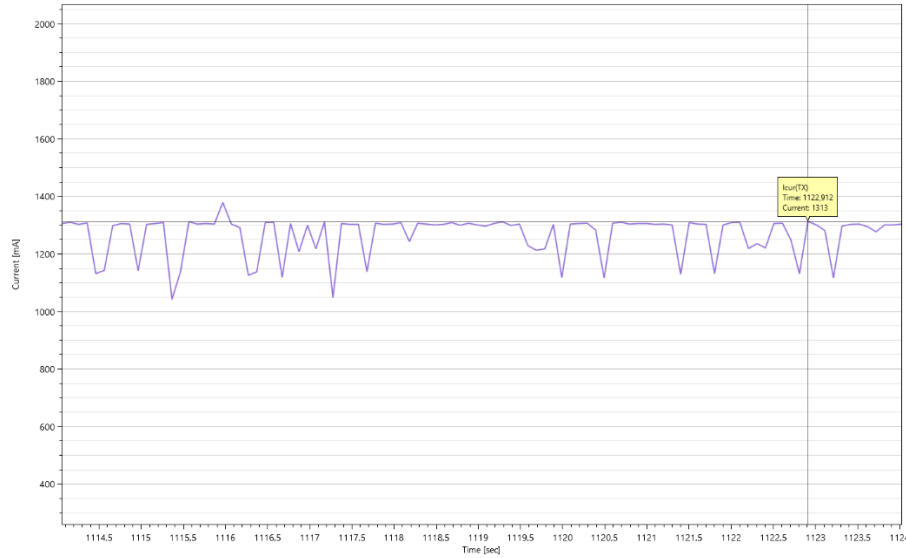
Gráfica de temperatura del transmisor sin carga. Se mantiene un valor promedio de 29.1 °C, con ligeras variaciones de hasta 1 °C atribuibles al ruido de medición.

Figura C-9. *Ciclo de trabajo del transmisor durante la operación.*

Gráfica del ciclo de trabajo del transmisor durante la operación. Se observa un valor constante del 50 %, correspondiente al equilibrio en la modulación de potencia.

Figura C-10. *Tensión suministrada por la placa STEVAL durante la operación.*

Gráfica de tensión suministrada por la placa STEVAL durante la operación. Se aprecia un valor promedio de 4.81 V, indicando una entrega estable de energía al sistema.

Figura C-11. Corriente suministrada por la placa STEVAL durante la operación.

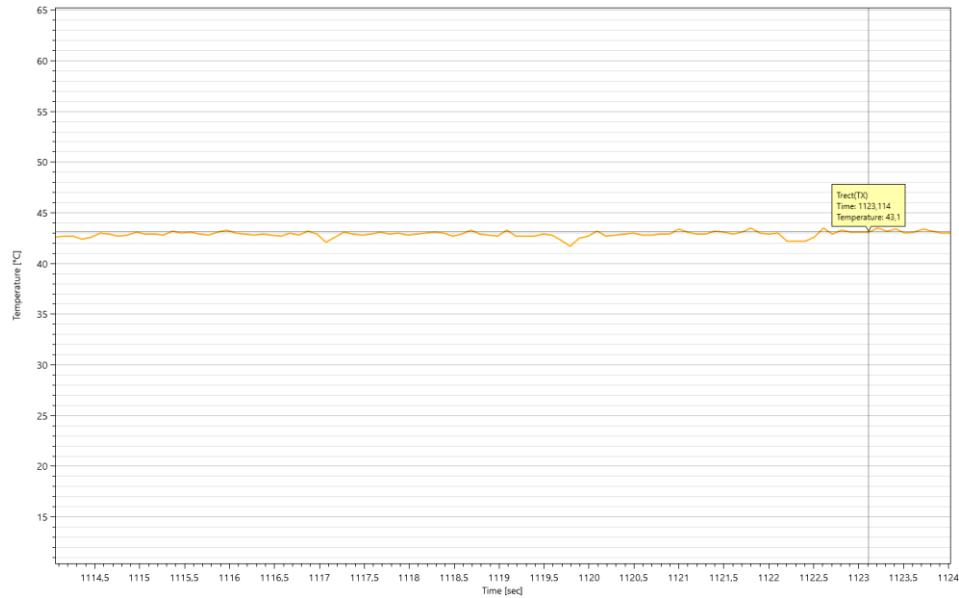
Gráfica de corriente suministrada por la placa STEVAL. Se observa un comportamiento relativamente estable con un valor promedio que oscila entre 1050 mA y 1313 mA, lo cual refleja la demanda energética del sistema durante la operación con carga.

Figura C-12. Potencia del sistema medida en la placa STEVAL.

Gráfica de potencia del sistema medida en la placa STEVAL. Se observa una potencia de transmisión (PWTX) de aproximadamente 5500 mW y una potencia de recepción (PWRX) de

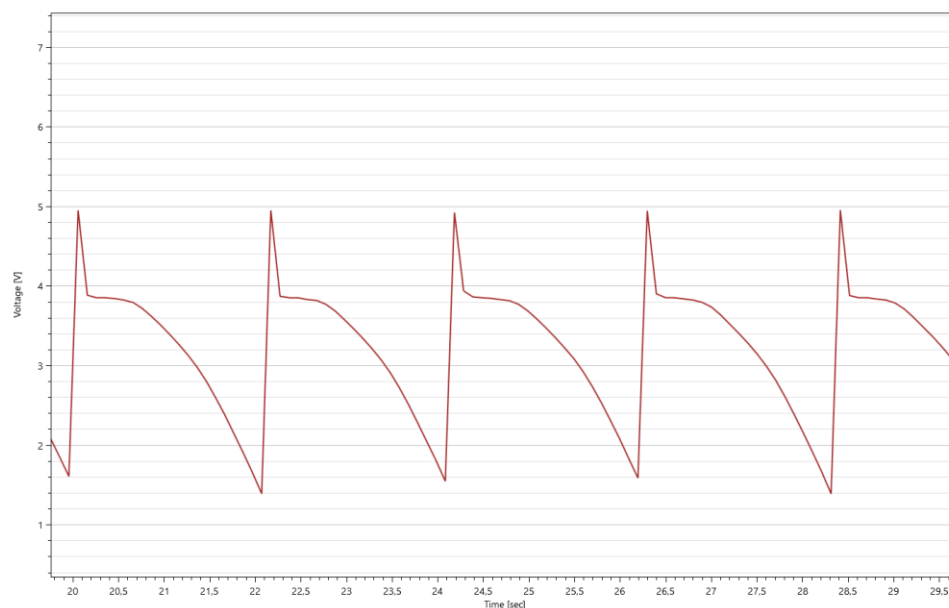
5273 mW, lo que indica una eficiencia de transferencia inalámbrica cercana al 95.87 % bajo condiciones estables de funcionamiento.

Figura C-13.



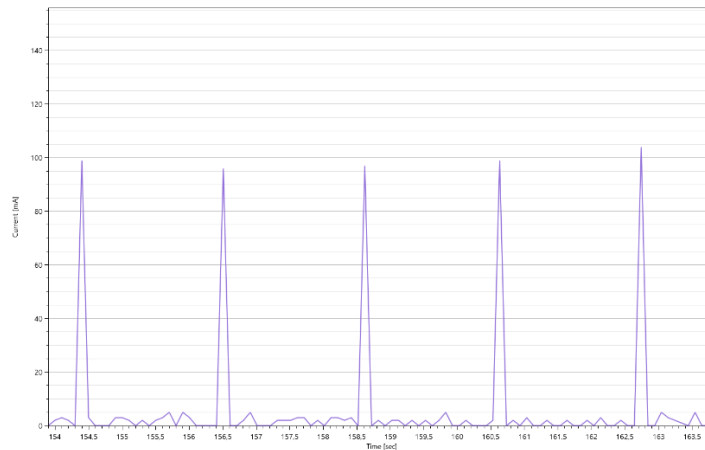
Gráfica de temperatura del sistema medida en la placa STEVAL. Se muestra un valor promedio estable de 43.1 °C, correspondiente a la temperatura alcanzada durante el funcionamiento continuo del sistema de transmisión inalámbrica.

Figura C-14. Voltaje de la STEVAL sin carga conectada.



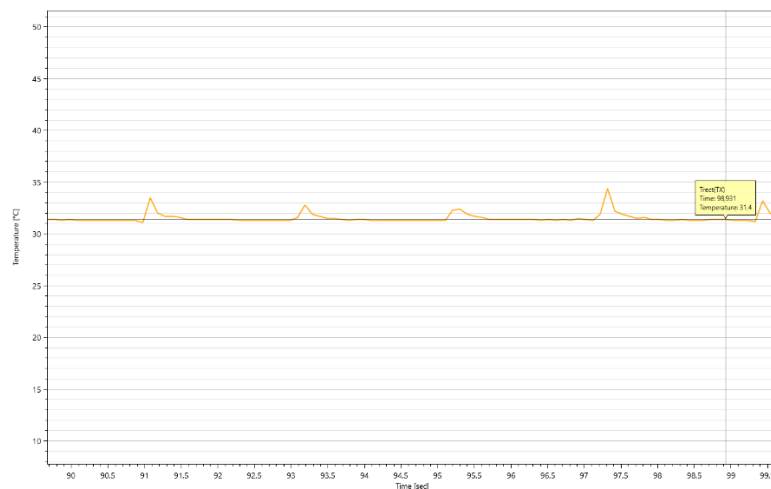
Gráfica de voltaje de la STEVAL sin carga. Se observan variaciones con picos que oscilan entre 4.9 V y 1.5 V, producto del comportamiento de detección activa del transmisor en ausencia de un receptor. Estos picos son característicos del protocolo de búsqueda que ejecuta la placa transmisora al intentar identificar un dispositivo compatible.

Figura C-15. Corriente de la STEVAL sin carga conectada.



Gráfica de corriente de la STEVAL sin carga. Se evidencian picos periódicos de aproximadamente 100 mA, correspondientes al consumo generado durante los ciclos de escaneo activo que realiza el transmisor para detectar la presencia de un receptor. Entre estos picos, el consumo es prácticamente nulo, lo que indica que el sistema entra en un estado de reposo hasta el siguiente intento de detección.

Figura C-16. Temperatura de la STEVAL sin carga.



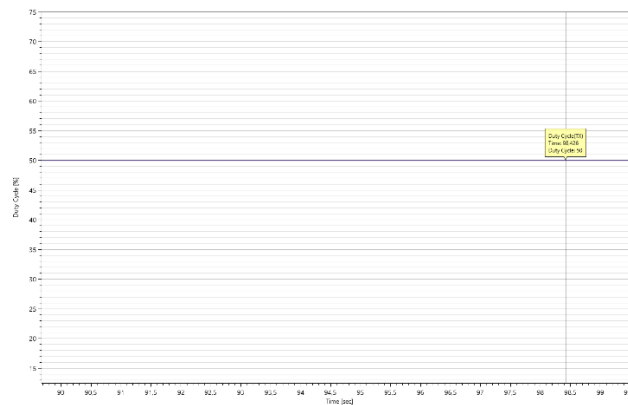
Gráfica de temperatura de la STEVAL sin carga. El sistema mantiene una temperatura promedio estable de 31.4 °C, lo que indica un comportamiento térmico eficiente en estado de reposo. Esta temperatura refleja la disipación mínima generada únicamente por los componentes activos durante el monitoreo sin transferencia de energía.

Figura C-17. *Frecuencia de operación de la STEVAL sin carga.*



Gráfica de frecuencia de operación de la STEVAL sin carga. El sistema mantiene una frecuencia constante de 146 kHz, incluso en ausencia de carga. Esta estabilidad indica que el transmisor permanece activo y en modo de espera, preparado para iniciar la transferencia de energía de forma inmediata al detectar un receptor válido.

Figura C-18. *Ciclo útil de la STEVAL sin carga.*



Gráfica del ciclo útil de la STEVAL sin carga. La señal PWM del transmisor presenta un ciclo útil del 50 %, lo que indica un comportamiento estable en modo de espera. Este valor es característico de muchos sistemas de transmisión inalámbrica que mantienen el circuito activo con un ciclo medio cuando no hay carga conectada, permitiendo una respuesta rápida ante la presencia de un receptor.

Apéndice D

Diseño de PCB del sistema de carga inalámbrico

Para el diseño de la PCB se siguieron las recomendaciones propuestas por el fabricante de la placa STEVAL-WBC86TX, con el objetivo de garantizar un rendimiento óptimo tanto eléctrico como térmico del sistema. Las principales directrices aplicadas fueron las siguientes:

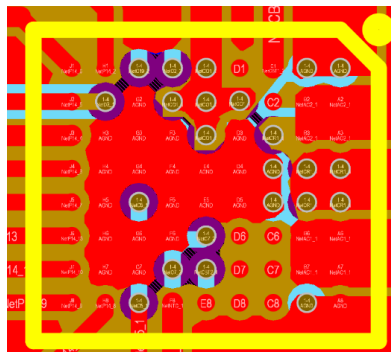
- Las pistas de potencia (AC1, AC2, VINV y VIN) y las pistas de tierra asociadas deben tener un ancho suficiente para soportar corrientes elevadas. Se recomienda duplicar estas pistas en capas internas y añadir vías de interconexión siempre que sea posible, con el fin de reducir la impedancia al mínimo.
- Las señales AC1, AC2, BOOT1 y BOOT2 son fuentes importantes de ruido, por lo que se sugiere implementar blindaje mediante planos de tierra ubicados justo debajo de estas pistas.
- La tierra de potencia transporta tanto la corriente de rizado como la corriente continua del inversor. Por ello, las trayectorias de retorno de corriente desde los capacitores asociados a los reguladores LDO deben ser enrutadas de manera separada para evitar interferencias con estas trayectorias de alta corriente.
- Las pistas AC1 y AC2 deben ser enrutadas lo más próximas posible entre sí para minimizar el área del lazo resultante y, por tanto, reducir la emisión de interferencias electromagnéticas (EMI).
- Las señales de comunicación (I2C) y sensado deben alejarse de redes ruidosas como AC1, AC2, BOOT1 y BOOT2, para minimizar los efectos de interferencia causados por variaciones rápidas de corriente.
- Los capacitores de BOOT1 y BOOT2 deben colocarse lo más cerca posible del dispositivo para garantizar una conmutación estable.

- Los capacitores de desacoplo tanto de entrada como del inversor también deben ubicarse lo más próximos al dispositivo, con el fin de reducir la inductancia de la trayectoria y mejorar la eficiencia del filtrado.
- Los capacitores auxiliares del LDO deben estar físicamente cercanos al dispositivo para asegurar una regulación estable.
- Finalmente, para mejorar el rendimiento térmico y la conexión a tierra, se recomienda destinar una capa completa del PCB como plano de tierra, evitando el trazado de señales o pistas de potencia sobre dicha capa, con el objetivo de mantener la integridad del plano. Una vez se tuvo en cuenta esto se procedió a realizar el enrutado.

Se implementó una PCB de 4 capas con el fin de abarcar de manera completa las conexiones del chip con encapsulado BGA STWBC86JR y de los demás componentes del sistema, tal como se muestra en la Figura D-1. Este tipo de diseño multicapa permitió una mejor distribución de las señales, así como una adecuada separación entre planos de potencia, tierra y señales de alta frecuencia. Adicionalmente, se utilizaron vías THT (*Through-Hole Technology*) para mejorar la conexión eléctrica entre capas, incrementando la robustez del enrutado y facilitando la disipación de calor en las zonas críticas del circuito

Figura D-1.

Enrutado del chip STWBC86JR de encapsulado BGA



Para lograr una correcta distribución de referencias de tierra, se implementaron planos dedicados en las cuatro capas del PCB, intercalando las referencias según su función. El plano de tierra analógica (AGND) se asignó a la capa superior (TOP, véase Figura D-3) y a la capa interna 2 (*Layer 2*, Figura D-4), ambas destinadas principalmente a señales de control y potencia. Por otro lado, el plano de tierra digital (GND) se ubicó en la capa interna 1 (*Layer 1*, Figura D-5) y en la capa inferior (BOTTOM, Figura D-6), orientadas principalmente al sistema de autenticación. Esta distribución facilita un mejor aislamiento eléctrico y permite que, una vez autenticado el acceso, ambas referencias de tierra se unan para activar el sistema de carga inalámbrica.

Figura D-3.

Top Layer. Plano de tierra AGND

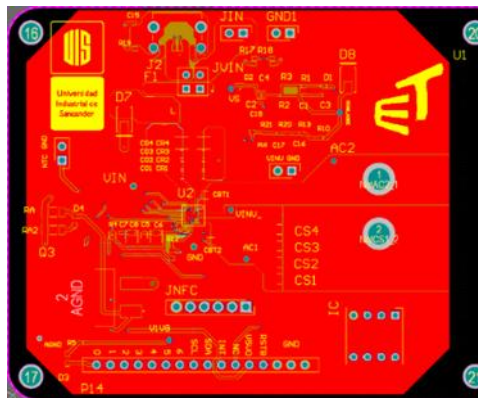


Figura D-4.

Layer 2, Plano de tierra AGND

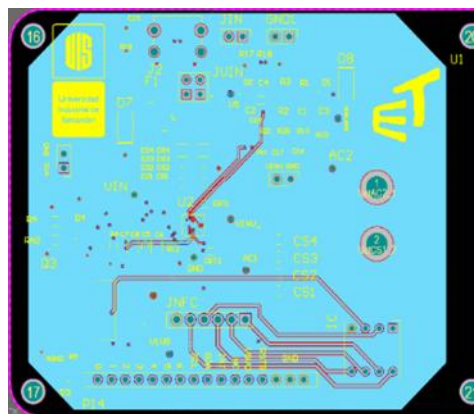
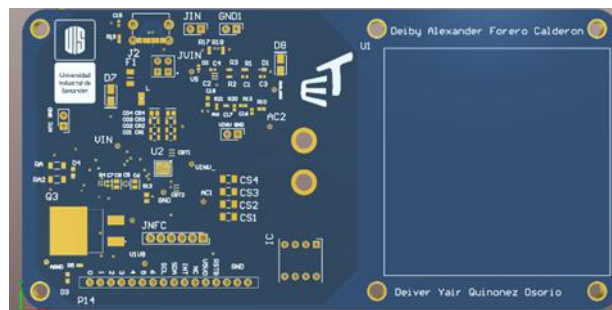
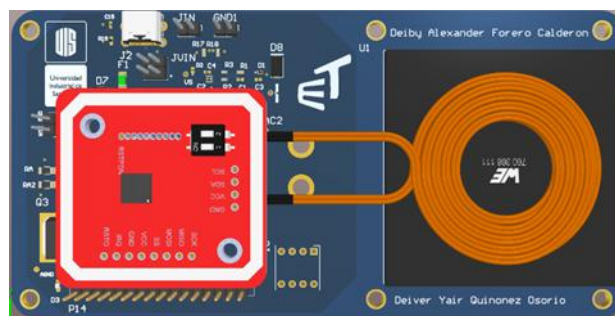


Figura D-7.*PCB final.***Figura D-8.***PCB final sin componentes.*

Para más información y acceso a los archivos correspondientes al diseño de la PCB, se puede consultar el siguiente repositorio:

Repositorio: https://github.com/Dexaca/Trabajo_de_grado_Deiby_Forero_Deiver_Quinonez/tree/f696ecf936514072aaaa4124d2c44e071ab7b705/Gerbers