
This is the **published version** of the bachelor thesis:

del Rio Toledano, Javier. *Mitigación de Lecturas Espurias en RFID UHF mediante Antenas de Confinamiento de Campo Cercano y Clasificadores de Aprendizaje Automático*. Treball de Final de Grau (Universitat Autònoma de Barcelona), 2026 (Grau en Enginyeria de Sistemes de Telecomunicació)

This version is available at <https://ddd.uab.cat/record/335932>

under the terms of the  license.



TREBALL DE FI DE GRAU

GRAU EN ENGINYERIA DE SISTEMES DE TELECOMUNICACIÓ

MITIGACIÓN DE LECTURAS ESPURIAS EN RFID UHF MEDIANTE ANTENAS DE CONFINAMIENTO DE CAMPO CERCANO Y CLASIFICADORES DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

Javier del Río Toledano

DIRECTOR: Antoni Morell Perez

DEPARTAMENT DE TELECOMUNICACIÓ I ENGINYERIA DE SISTEMES

UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA

Bellaterra, 23 de juny de 2026

Abstract

Smart manufacturing systems require reliable detection of tagged objects on conveyor belts. Although *Radio Frequency Identification* (RFID) is a low-cost technology for industrial traceability, conventional *Commercial Off-the-Shelf* (COTS) reader antennas suffer from electromagnetic field leakage, generating spurious detections outside the intended zone. This work proposes a hybrid RFID sensing layer that combines a custom *Electromagnetic Confinement Device* (ECD) with a data-driven decision stage to discriminate valid conveyor tags from spurious detections. The ECD physically restricts the interrogation region without external shielding, while a segmentation algorithm extracts temporal signatures from tag passages. Laboratory validation shows detection accuracies above 99.9%. Feature analysis indicates that the phase standard deviation allows classification with a single threshold, facilitating implementation in embedded systems with a slightly reduced accuracy.

Resumen

Los sistemas de fabricación inteligente requieren una detección fiable de objetos etiquetados en cintas transportadoras. Aunque la tecnología RFID es una solución de bajo coste para la trazabilidad, las antenas comerciales (COTS) convencionales sufren fugas de campo electromagnético, generando lecturas espurias fuera de la zona de interés. Este trabajo propone una capa de detección RFID híbrida que combina un dispositivo de confinamiento electromagnético (ECD) con una etapa de decisión basada en datos para discriminar las etiquetas válidas de las espurias. El ECD restringe físicamente la zona de interrogación sin apantallamiento externo, mientras que un algoritmo de segmentación extrae las firmas temporales de los pasos de las etiquetas. La validación en laboratorio muestra precisiones superiores al 99,9%. El análisis de características indica que la desviación estándar de la fase permite clasificar los pasos con un único umbral, facilitando su implementación en sistemas empotrados con una ligera reducción de la precisión.

Resum

Els sistemes de fabricació intel·ligent requereixen una detecció fiable d'objectes etiquetats en cintes transportadores. Tot i que la tecnologia RFID és una solució de baix cost per a la traçabilitat, les antenes comercials (COTS) convencionals pateixen fugues de camp electromagnètic, generant lectures espúries fora de la zona d'interès. Aquest treball proposa una capa de detecció RFID híbrida que combina un dispositiu de confinament electromagnètic (ECD) amb una etapa de decisió basada en dades per discriminar les etiquetes vàlides de les espúries. L'ECD restringeix físicament la zona d'interrogació sense blindatge extern, mentre que un algorisme de segmentació extreu les signatures temporals dels passos de les etiquetes. La validació al laboratori mostra precisions superiors al 99,9%. L'anàlisi de característiques indica que la desviació estàndard de la fase permet classificar els passos amb un llindar únic, facilitant la seva implementació en sistemes encastats amb una lleugera reducció de la precisió.

Glosario de Abreviaturas

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
ADN	Ácido Desoxirribonucleico
AoA	<i>Angle of Arrival</i>
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
CNAF	Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias
CORA	<i>Catalan Open Research Area</i>
COTS	<i>Commercial Off-the-Shelf</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CSV	<i>Comma-Separated Values</i>
DE	<i>Differential Evolution</i>
ECD	<i>Electromagnetic Confinement Device</i>
EPC	<i>Electronic Product Code</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
ETD	Asuntos Económicos y Transformación Digital
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
ICNIRP	<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IRT	<i>Interrogation Repetition Time</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
MES	<i>Manufacturing Execution System</i>
ML	<i>Machine Learning</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>

MRE	<i>Mean Relative Error</i>
MSE	<i>Mean Squared Error</i>
MUSIC	<i>MUltiple Signal Classification</i>
NLOS	<i>Non-Line-of-Sight</i>
NTP	<i>Network Time Protocol</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
RBF	<i>Radial Basis Function</i>
RF	<i>Random Forest</i>
RFE	<i>Recursive Feature Elimination</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
ROI	<i>Return on Investment</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SIW	<i>Substrate Integrated Waveguide</i>
SLAM	<i>Simultaneous Localization and Mapping</i>
SMA	<i>SubMiniature version A</i>
SVM	<i>Support Vector Machine</i>
TFG	Trabajo de Fin de Grado
UAB	Universitat Autònoma de Barcelona
UE	Unión Europea
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
WMS	<i>Warehouse Management System</i>
XGBoost	<i>Extreme Gradient Boosting</i>

Índice general

Abstract	I
Resumen	III
Resum	V
Glosario de Abreviaturas	VII
Índice de figuras	XIV
Índice de tablas	XV
1. Introducción	1
1.1. Contexto del Problema y Motivación	1
1.2. Objetivos del Trabajo	2
1.3. Contribuciones del Trabajo	3
1.4. Estructura del Documento	3
2. Planificación y Viabilidad	5
2.1. Viabilidad Temporal y Planificación (Gantt)	5
2.2. Viabilidad Económica	6
2.2.1. Presupuesto Detallado del Proyecto	6
2.2.2. Caso de Estudio y Análisis de Retorno de Inversión (ROI)	7
2.3. Viabilidad Técnica	9

2.4. Viabilidad Legal y Regulatoria	10
2.5. Estudio Ético, Social y Ambiental	11
3. Estado del Arte y Fundamentos Teóricos	13
3.1. Estrategia de Búsqueda Bibliográfica	13
3.2. Sistemas RFID Pasivos en Entornos Industriales	13
3.3. Estrategias para la Mitigación de Lecturas Espurias	15
3.3.1. Apantallamiento electromagnético físico	15
3.3.2. Algoritmos de localización y seguimiento	16
3.3.3. Síntesis comparativa de los métodos de localización	20
3.3.4. Posicionamiento de este trabajo frente al estado del arte	21
3.4. Fundamentos de Dispositivos de Confinamiento de Campo (ECD) y <i>Substrate Integrated Waveguide</i> (SIW)	21
3.4.1. Principio Físico: Acoplamiento de Ondas Evanescentes	21
3.4.2. Diseño físico del ECD utilizando SIW	23
3.4.3. Regiones de Campo y Distancia de Fraunhofer	24
4. Diseño del Sistema y Algoritmo de Segmentación	27
4.1. Definición y Formalización del Problema	27
4.2. Algoritmo de Segmentación de Arcos	30
4.2.1. Fase I: Segmentación temporal aproximada (Coarse-to-Fine)	30
4.2.2. Fase II: Remuestreo, suavizado y detección de picos	30
4.3. Optimización de Parámetros mediante Evolución Diferencial	31
4.3.1. Resultado de la Optimización	31
5. Montaje Experimental y Adquisición de Datos	35
5.1. Componentes del Hardware Electromagnético	35
5.1.1. Elemento radiante: Dispositivo de Confinamiento Electromagnético (ECD)	36
5.1.2. Lector RFID	36

5.1.3. Transpondedores RFID (<i>tags</i>)	36
5.2. Infraestructura de <i>Software</i> y Captura	36
5.3. Campaña de Mediciones y Dataset	37
5.3.1. Simulación de tags válidos	37
5.3.2. Simulación de tags espurios	37
5.3.3. Segmentación del conjunto de datos	37
6. Resultados y Clasificación con Aprendizaje Automático	39
6.1. Modelos de Aprendizaje Automático Evaluados	39
6.2. Clasificación basada en Secuencias Completas	40
6.3. Extracción de Características Estadísticas	40
6.4. Simplificación del Modelo mediante Eliminación Recursiva (<i>Recursive Feature Elimination</i> (RFE))	42
6.5. Clasificador de Umbral Único sobre la Fase	46
7. Conclusiones y Trabajo Futuro	49
7.1. Conclusiones Generales	49
7.2. Limitaciones del Sistema	50
7.3. Líneas de Trabajo Futuro	51
7.3.1. Autoevaluación de Competencias y Aprendizaje	51
Bibliografía	I

Índice de figuras

1.1. Ilustración conceptual de un escenario de cinta transportadora, con tags en la cinta (zona de lectura), verdes, y tags fuera de ella, rojos.	1
2.1. Diagrama de Gantt con la planificación temporal del proyecto estructurada en cinco fases y cinco hitos de control.	5
3.1. Imagen del tag RFID utilizado. Es un tag Smartrac Belt Monza 5, donde el chip se encuentra en el centro. La parte plateada es la antena que es la encargada de recibir y reflejar la señal recibida.	14
3.2. Esquema conceptual de la comunicación por retrodispersión modulada (<i>backscatter</i>) en un sistema RFID pasivo <i>Ultra High Frequency</i> (UHF), donde el chip de la etiqueta altera dinámicamente su impedancia de entrada para reflejar la onda portadora continua emitida por el lector.	15
3.3. Principio de funcionamiento de una jaula de Faraday. Las cargas inducidas en el conductor redistribuyen el campo eléctrico externo $\vec{E}_{\text{ext}}$ de modo que el campo interior es nulo ($\vec{E}_{\text{int}} = 0$), blindando electromagnéticamente el dispositivo alojado en su interior.	16
3.4. Escenario RFID con elementos etiquetados moviéndose en una cinta transportadora (vista superior). Adaptado de Buffi et al. [Buf15].	17
3.5. Representación gráfica de la formación de una onda evanescente en una reflexión total interna. La energía no se propaga en el medio menos denso, sino que se desplaza tangencialmente a la interfaz mientras su amplitud decae exponencialmente.	23
3.6. Campo eléctrico simulado del ECD a 867 MHz. (a) Plano xy . (b) Plano xz a 10 mm de la superficie. Extraído de [Jim23].	25

3.7. Esquema conceptual de las regiones electromagnéticas y comparación de las curvas de atenuación de potencia en función de la distancia z para una antena de campo lejano convencional ($1/z^2$) y el ECD confinante en campo cercano (decaimiento exponencial).	26
4.1. Diagrama de bloques de la solución propuesta. El hardware captura las lecturas de RFID desde la cinta transportadora, mientras que la capa de <i>software</i> aplica procesamiento de señal y clasificación de <i>Machine Learning</i> (ML) para determinar si cada lectura procede de la zona de interés o si es una lectura espuria.	28
4.2. RSSI y fase normalizados para una secuencia de paso típica de un tag RFID, ilustrando la estructura de arco de potencia producida por el patrón de onda estacionaria del ECD.	29
4.3. Diagrama de flujo del proceso de <i>Differential Evolution</i> (DE). Los bloques de Fase I y Fase II representarían el flujo normal del código.	32
5.1. Montaje experimental desplegado en el laboratorio.	35
5.2. Ejemplo de la salida del algoritmo de segmentación de arcos. Se muestra una detección correcta en azul claro (marcador cuadrado en el pico de RSSI) y un caso de detección incorrecta donde la componente temporal provocó que un solo arco se dividiera en dos segmentos.	38
6.1. Matriz de correlación de Pearson de las 12 características seleccionadas.	43
6.2. Distribuciones de características comparadas entre las clases de etiquetas válidas y espurias mediante diagramas de violín.	44
6.3. Curva de precisión (exactitud) media obtenida en el proceso de eliminación recursiva de características (<i>RFE</i>) para el modelo <i>Extreme Gradient Boosting</i> (XGBoost), ilustrando el rendimiento obtenido en función del número de variables.	45
6.4. Precisión de clasificación como función del umbral de desviación estándar de la fase $\sigma_{\varphi,th}$, con el umbral óptimo de $3,06^\circ$ indicado.	47

Índice de cuadros

2.1. Presupuesto detallado del proyecto de desarrollo de I+D.	7
3.1. Comparación de los métodos de localización y seguimiento RFID revisados. . . .	20
4.1. Parámetros de segmentación de arcos optimizados mediante Evolución Diferencial.	33
6.1. Precisión media de clasificación utilizando secuencias crudas completas ($2 \cdot L_s$ variables) sobre el conjunto balanceado.	40
6.2. Características estadísticas extraídas de las señales retrodispersadas y tiempos de segmento.	41
6.3. Precisión media de clasificación utilizando las 12 características estadísticas sobre el conjunto balanceado.	41
6.4. Precisión media de clasificación de XGBoost tras la eliminación recursiva de variables.	42

Capítulo 1

Introducción

En la producción industrial y logística, la identificación de objetos en movimiento es necesaria para la automatización de los procesos. La tecnología *Radio Frequency Identification* (RFID) en la banda *Ultra High Frequency* (UHF) se utiliza para la trazabilidad debido a su capacidad para interrogar múltiples etiquetas simultáneamente, su funcionamiento sin línea de visión directa (*Non-Line-of-Sight* (NLOS)) y el bajo coste de los transpondedores (tags). Sin embargo, los sistemas RFID pasivos convencionales basados en dispositivos comerciales (*Commercial Off-the-Shelf* (COTS)) presentan limitaciones causadas por la propagación no confinada de los campos electromagnéticos, lo que genera falsos positivos denominados lecturas espurias o *stray reads*.

1.1. Contexto del Problema y Motivación

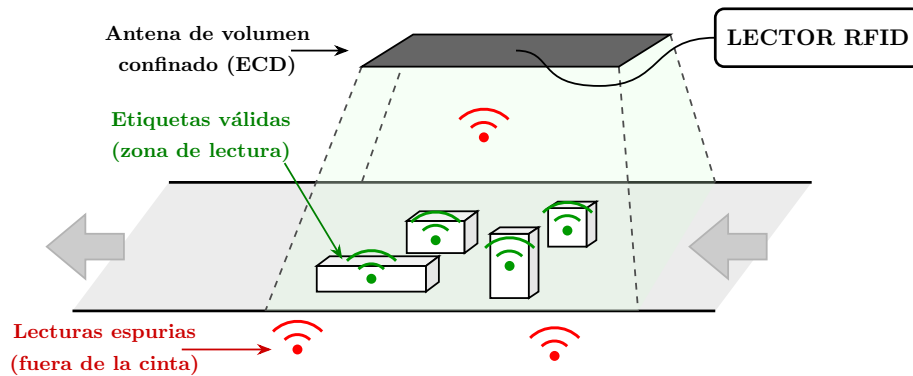


Figura 1.1: Ilustración conceptual de un escenario de cinta transportadora, con tags en la cinta (zona de lectura), verdes, y tags fuera de ella, rojos.

En cintas transportadoras, el objetivo consiste en identificar únicamente los objetos etiquetados que transitan por la cinta (zona de interrogación). Las antenas comerciales irradian lóbulos

secundarios y sufren fugas de campo electromagnético, lo que provoca lecturas accidentales de tags cercanos como pueden ser los de cajas almacenadas, operarios o líneas paralelas.

La automatización de las líneas de producción requiere que los sistemas de trazabilidad entreguen información precisa a los sistemas de gestión (*Manufacturing Execution System* (MES), *Warehouse Management System* (WMS) o *Enterprise Resource Planning* (ERP)). Las lecturas espurias son críticas en este contexto, ya que pueden desincronizar el inventario, provocar decisiones de enrutamiento erróneas o alterar los registros de auditoría [GM20].

Las soluciones habituales para mitigar este problema se dividen en dos estrategias:

1. **Localización física:** Métodos basados en estimación de ángulo de llegada (*Angle of Arrival* (AoA)), análisis de fase o apertura sintética para rastrear la posición tridimensional del tag [Buf15, Tri22, Meg22]. Estos enfoques incrementan la complejidad del sistema o el coste computacional o se ven afectados por las reflexiones electromagnéticas del entorno.
2. **Apantallamiento físico:** Uso de túneles metálicos o jaulas de Faraday para bloquear la radiación. Esta técnica incrementa los costes de despliegue, dificulta la adaptación en líneas preexistentes (*retrofitting*) y obstruye el acceso físico de los operarios para mantenimiento.

Este trabajo propone un enfoque híbrido que combina hardware específico con algoritmos de procesamiento de señal y aprendizaje automático, sin requerir sensores de velocidad ni apantallamientos físicos externos.

1.2. Objetivos del Trabajo

El objetivo general del Trabajo de Fin de Grado (TFG) es desarrollar y validar un sistema de percepción híbrido (hardware-software) de bajo coste para la detección de objetos en cintas transportadoras mediante confinamiento electromagnético y técnicas de aprendizaje automático.

Para evaluar este objetivo, se establecen los siguientes objetivos específicos técnicos y medibles:

- **Confinamiento físico del campo de lectura:** Restringir la zona de lectura activa a un volumen sobre la cinta que no exceda los 15 cm de altura vertical y los 5 cm de anchura transversal desde la antena. Las lecturas fuera de este volumen o con etiquetas detenidas deben ser rechazadas.
- **Independencia de velocidad de paso:** Diseñar un algoritmo que funcione con velocidades de cinta variables o desconocidas, sin requerir sensores de velocidad ni variables conocidas.

- **Exactitud de clasificación:** Alcanzar una tasa de acierto superior al 99,9% en la discriminación en tiempo real entre etiquetas en tránsito y lecturas espurias (en reposo o portadas por operarios).
- **Procesamiento ligero:** Desarrollar un clasificador ejecutable en microcontroladores de bajos recursos, admitiendo un cierto margen de degradación.

1.3. Contribuciones del Trabajo

Las contribuciones principales de este desarrollo son:

- Un sistema integrado de bajo coste que reduce la zona de interrogación a un rango vertical de 0–15 cm sin blindajes externos.
- Un algoritmo de segmentación de arcos que funciona sin conocer la velocidad de la cinta transportadora, asumiendo velocidad constante durante el paso.
- Una validación experimental sobre un conjunto de datos de 5.091 segmentos, obteniendo precisiones superiores al 99,9% con modelos de *Machine Learning* (ML) y del 98,4% con un único umbral en la desviación estándar de la fase, reduciendo el coste de inferencia.

1.4. Estructura del Documento

Esta memoria se organiza de la siguiente manera. El Capítulo 2 detalla la planificación temporal, el presupuesto de desarrollo y el estudio de viabilidad en sus vertientes económica, técnica, legal y ambiental. El Capítulo 3 presenta el estado del arte y los fundamentos de los sistemas de confinamiento electromagnético. El Capítulo 4 formaliza el problema matemático y describe en detalle el algoritmo de segmentación de arcos propuesto. El Capítulo 5 detalla la caracterización de la antena *Substrate Integrated Waveguide* (SIW), el equipamiento hardware utilizado y la campaña de mediciones llevada a cabo para la obtención del conjunto de datos. El Capítulo 6 presenta los resultados de clasificación de ML, el análisis de extracción de características y el estudio de *Recursive Feature Elimination* (RFE). Por último, en el Capítulo 7 se exponen las conclusiones del trabajo, sus limitaciones actuales y las futuras líneas de investigación.

Capítulo 2

Planificación y Viabilidad

Este capítulo detalla la planificación temporal, el análisis de viabilidad en sus vertientes económica, técnica, legal y regulatoria, y el estudio del impacto ético, social y ambiental del sistema desarrollado.

2.1. Viabilidad Temporal y Planificación (Gantt)

El proyecto se ha planificado para una duración total de un semestre académico (5 meses), acorde con la carga de 300 horas de dedicación. Se organiza en cinco fases representadas en el diagrama de Gantt de la Figura 2.1.

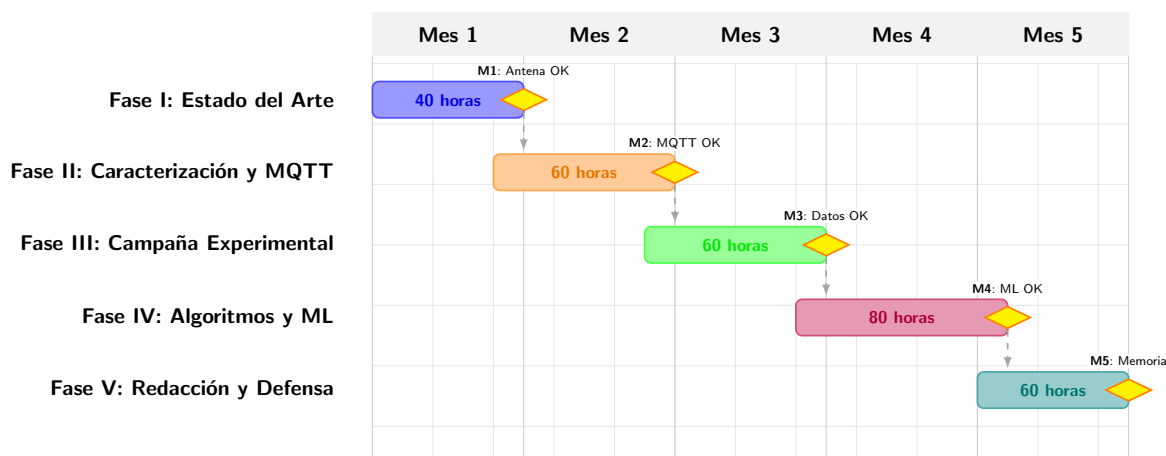


Figura 2.1: Diagrama de Gantt con la planificación temporal del proyecto estructurada en cinco fases y cinco hitos de control.

Para asegurar el seguimiento del cronograma, se definen los siguientes hitos de control (*milestones*) al término de cada fase crítica:

- **Hito 1 (M1) - Validación del canal de radio y antena:** Finalización del estudio de estado del arte y verificación preliminar de la antena *Substrate Integrated Waveguide* (SIW) en el laboratorio (Mes 1).
- **Hito 2 (M2) - Entorno *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) e infraestructura listos:** Experimentación y caracterización de la antena. Evaluación de su comportamiento y características. Configuración del entorno de captura de datos (Mes 2).
- **Hito 3 (M3) - Base de datos experimental consolidada:** Finalización de la campaña de mediciones y obtención del conjunto de datos (Mes 3).
- **Hito 4 (M4) - Pipeline y clasificadores validados:** Implementación en Python del algoritmo de segmentación por *Differential Evolution* (DE) y entrenamiento de los modelos de *Machine Learning* (ML) (Mes 4).
- **Hito 5 (M5) - Memoria del Trabajo de Fin de Grado (TFG) completada:** Redacción final de la memoria del proyecto y revisión para su defensa pública (Mes 5).

2.2. Viabilidad Económica

La viabilidad económica se evalúa mediante dos vertientes: el presupuesto de desarrollo de I+D (costes del proyecto) y el análisis de retorno de inversión (*Return on Investment* (ROI)) para una empresa cliente en un escenario hipotético de implantación.

2.2.1. Presupuesto Detallado del Proyecto

El presupuesto de desarrollo de I+D se calcula en base a los costes de ingeniería de diseño, fabricación de prototipos y amortización de equipos durante el periodo del proyecto. Las partidas se justifican a continuación:

- **Costes de Personal:** La dedicación de 300 h para el Ingeniero Junior se deriva de la carga oficial asignada en el plan de estudios de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB) para un TFG (25 h por crédito). La tarifa de 10 €/h responde a la retribución de convenios de prácticas de la universidad. Las 15 h del Ingeniero Consultor estiman la supervisión del proyecto (3 horas mensuales durante los 5 meses), valorada en un precio por horas de 50 €/h para dirigir el desarrollo.
- **Equipamiento y Materiales:** El coste del lector *Radio Frequency Identification* (RFID) Zebra FX7500 (1,200 €) corresponde a la tarifa de mercado en España. El prototipo de la antena SIW *Electromagnetic Confinement Device* (ECD) tiene un coste de fabricación

de 150 €, incluyendo conectores *SubMiniature version A* (SMA) y envíos. El computador Raspberry Pi 4 (120 €) refleja el precio de un kit de inicio con fuente de alimentación, carcasa y tarjeta microSD. El lote de accesorios (130 €) incluye cables coaxiales *Random Forest* (RF) y soportes mecánicos.

- **Gastos Indirectos:** Los consumos de laboratorio estiman una tarifa mensual de 30 € para el uso de energía y red en el laboratorio durante los 5 meses (150 €).

El desglose presupuestario se detalla en la Tabla 2.1.

Cuadro 2.1: Presupuesto detallado del proyecto de desarrollo de I+D.

Concepto / Recurso	Cantidad	Coste Unitario	Coste Total
<i>Personal</i>			
Ingeniero Junior (Estudiante)	300 h	10,00 €/h	3,000,00 €
Ingeniero Consultor (Director TFG)	15 h	50,00 €/h	750,00 €
<i>Equipamiento y Materiales</i>			
Lector RFID Zebra FX7500	1 ud.	1,200,00 €	1,200,00 €
Prototipo Antena SIW ECD (FR4)	1 ud.	150,00 €	150,00 €
Ordenador (Raspberry Pi 4)	1 ud.	120,00 €	120,00 €
Cables coaxiales y soportes	Lote	130,00 €	130,00 €
<i>Costes Indirectos</i>			
Consumos de laboratorio	Lote	150,00 €	150,00 €
PRESUPUESTO TOTAL (I+D)			5.500,00 €

Los costes de licencias de software son nulos al emplearse exclusivamente herramientas de código abierto (Python, L^AT_EX y MQTT Mosquitto). El coste total de desarrollo del prototipo asciende a 5,500 €.

El presupuesto refleja una inversión en horas que, de ser un estudio y resultado provechoso, podría ser asumible por los beneficios o ahorros esperados en las empresas de implantación. Todo el material es reutilizable para otras investigaciones con lo que no supone un gasto sino más bien una inversión para futuros proyectos.

2.2.2. Caso de Estudio y Análisis de Retorno de Inversión (ROI)

Para evaluar el valor comercial de la solución frente a los sistemas estándar, se plantea un escenario industrial en un centro de distribución logística que procesa 10,000 paquetes/día (apro-

ximadamente 1,250 bultos/hora durante una jornada de 8 horas). En esta empresa suponemos que sucede lo siguiente: debido a la ausencia de confinamiento electromagnético, las antenas comerciales de campo lejano sufren de fugas y reflexiones que provocan una tasa media del 1 % de lecturas espurias (100 paquetes/día situados fuera de la cinta).

Cada lectura espuria provoca un descuadre en el sistema de gestión (*Warehouse Management System* (WMS)) que requiere intervención humana para su inspección y reintroducción en la línea, tomando un promedio de, supongamos, 5 minutos de un operario (tiempo para localizar el paquete, verificar la etiqueta, corregir la entrada en el *Enterprise Resource Planning* (ERP) y reintroducirlo). El coste del operario se estima en 18,00 €/h, calculado según el Convenio Colectivo Estatal de Empresas de Mensajería y Logística de España, sumando el salario base bruto de un auxiliar de almacén y la cotización a la Seguridad Social a cargo de la empresa (aproximadamente un 33 % adicional):

$$\text{Pérdida de tiempo diaria} = 100 \text{ errores/día} \times 5 \text{ min} = 500 \text{ min/día} = 8,33 \text{ h/día}$$

$$\text{Pérdida económica diaria} = 8,33 \text{ h/día} \times 18 \text{ €/h} = 150 \text{ €/día}$$

Operando 250 días laborales al año, el coste de la ineficiencia operacional para la empresa cliente asciende a:

$$\text{Coste Operacional por Ineficiencia} = 150 \text{ €/día} \times 250 \text{ días/año} = 37,500 \text{ €/año} \quad (2.1)$$

Frente a esto, la implantación del sistema de percepción híbrido requiere los siguientes costes para la empresa cliente:

- **Inversión Inicial (CapEx):** 10,000 € (desglosado en: 2,000 € para hardware, 7,000 € por el coste de ingeniería de software para integración y calibración, y 1,000 € para la instalación física).
- **Gasto Operativo (OpEx):** 1,000,00 €/año (mantenimiento preventivo, soporte técnico y consumo eléctrico de los equipos que operan a menos de 15 W).

Imaginemos que nuestro sistema logra una reducción de los errores al 0,01 %, si volvemos a calcular las pérdidas por incidencias manuales:

$$\text{Pérdida de tiempo diaria} = 10 \text{ errores/día} \times 5 \text{ min} = 50 \text{ min/día} = 0,83 \text{ h/día}$$

$$\text{Pérdida económica diaria} = 0,83 \text{ h/día} \times 18 \text{ €/h} = 15 \text{ €/día}$$

El ahorro anual tiene en cuenta el coste de mantenimiento y que se ha mejorado la eficiencia de la línea de producción, pero no eliminado totalmente los errores. También se debería añadir el

coste de tener la línea de producción parada durante el periodo de instalación y mantenimiento anual. Supongamos dicho coste en 5,000 €, teniendo en cuenta salarios y producción perdida.

$$\begin{aligned} \text{Ahorro Neto Anual} &= 37,500,00 \text{ €/año} - 1,000,00 \text{ €/año} - 3,750,00 \text{ €/año} - 5,000 \text{ €} \\ &\approx 27,750,00 \text{ €/año} \end{aligned} \quad (2.2)$$

El periodo de retorno de la inversión inicial (*Payback Period*) en años es:

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{CapEx}}{\text{Ahorro Neto Anual}} = \frac{10,000,00 \text{ €}}{27,750,00 \text{ €/año}} \approx 0,36 \text{ años} \approx 4,3 \text{ meses} \quad (2.3)$$

Calculando el Retorno de Inversión (ROI) anual:

$$\text{ROI} = \frac{\text{Ahorro Neto} - \text{CapEx}}{\text{CapEx}} \times 100 \% = \frac{27,750,00 \text{ €} - 10,000,00 \text{ €}}{10,000,00 \text{ €}} \times 100 \% \approx 178 \% \quad (2.4)$$

La inversión inicial de 10,000 € se recupera en menos de cinco meses de operación. Un ROI del 178 % en un año justifica la viabilidad económica de la propuesta incluso teniendo en cuenta un sobrecoste por fallos, riesgos y elementos no contemplados. Esta solución puede ser más económica y flexible que un túnel de apantallamiento electromagnético a medida, cuyo coste podría superar nuestra previsión en material y mano de obra y comprometer el espacio físico de las instalaciones.

2.3. Viabilidad Técnica

La viabilidad técnica del sistema se sustenta en tres factores:

1. **Disponibilidad de la antena SIW ECD:** La antena de ranuras ya estaba fabricada. Su fabricación se ha realizado sobre sustrato de circuito impreso convencional (*Printed Circuit Board* (PCB) FR4) lo que permite su repetibilidad y bajo coste. Existe un estudio previo sobre su comportamiento electromagnético y se ha validado su funcionamiento en trabajos previos [Jim23, Jaq25].
2. **Compatibilidad *Commercial Off-the-Shelf* (COTS):** El sistema se integra con lectores comerciales estándar (Zebra FX7500) y etiquetas pasivas de bajo coste, facilitando su incorporación en líneas preexistentes mediante *retrofitting*.
3. **Procesamiento en el extremo (*edge computing*):** El procesamiento de señal e inferencia se han diseñado para ser eficientes. El entrenamiento se realiza *offline*, y la inferencia puede ejecutarse en procesadores de bajo coste como Raspberry Pi 4. Además, el clasificador de umbral único basado en la desviación estándar de la fase ($\sigma_\varphi \geq 3,06^\circ$) tiene

complejidad constante $\mathcal{O}(1)$, lo que permite su ejecución en microcontroladores de 8 o 16 bits sin hardware adicional.

Recursos y Limitaciones del Entorno: Los recursos de *software* empleados incluyen Python (librerías NumPy, Pandas, Scikit-learn y *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost)) y L^AT_EX. Entre las limitaciones del entorno, la falta de una cinta transportadora motorizada en el laboratorio de la UAB requirió emular el paso de forma manual a velocidad constante. Esta hipótesis de trabajo es válida ya que la firma de campo cercano de la antena está determinada por la trayectoria y el acoplamiento espacial sobre las ranuras del ECD, siendo tolerante a variaciones en la velocidad de avance. La normalización de las muestras en tiempo y potencia en el preprocesamiento desliga la clasificación de la velocidad, siempre que esta permita realizar un número suficiente de lecturas. Esta firma de campo cercano ha sido validada numéricamente en trabajos previos [Jim23, Jaq25], justificando la validez de la emulación manual.

2.4. Viabilidad Legal y Regulatoria

La implementación cumple con el marco legal y regulatorio vigente para sistemas de comunicaciones de radiofrecuencia y dispositivos RFID:

1. **Atribución de Frecuencias (Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) UN-135):** La subbanda de frecuencias de 865,6 a 867,6 MHz está atribuida a aplicaciones RFID en España (UN-135). El lector se configuró bajo la región geográfica europea (código ‘EU’), operando en dicha banda. Queda reflejado en la orden Asuntos Económicos y Transformación Digital (ETD)/1449/2021 de 16 de diciembre [Gob21].
2. **Límites de Potencia (*European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) EN 302 208):** La potencia máxima de transmisión permitida en esta subbanda es de 2 W ERP (33 dBm). En los ensayos, el lector se configuró a 27 dBm (0,5 W), respetando el límite legal para evitar interferencias con otros servicios [ETS20].
3. **Canalización y Protocolos:** El espaciado de canales es de 200 kHz y el protocolo cumple con el estándar internacional *Electronic Product Code* (EPC) Global Class 1 Gen 2 (*International Organization for Standardization* (ISO)/*International Electrotechnical Commission* (IEC) 18000-63), asegurando la compatibilidad con etiquetas homologadas [GS126].
4. **Seguridad y Exposición (Radiación No Ionizante):** La tecnología RFID *Ultra High Frequency* (UHF) opera con radiación no ionizante, por lo que las ondas no tienen energía suficiente para dañar la estructura del Ácido Desoxirribonucleico (ADN) celular. Al emitir

a 0,5 W, el sistema cumple con las directrices de la *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) y las recomendaciones de la Unión Europea (UE), garantizando la seguridad del personal adyacente al sistema de medida.

2.5. Estudio Ético, Social y Ambiental

El impacto social y ambiental del sistema se evalúa bajo criterios de responsabilidad técnica:

1. **Privacidad de los Datos y Seguridad:** Las etiquetas pasivas solo contienen un código electrónico de producto (EPC) sin información de carácter personal. Además, el confinamiento físico a una distancia de 15 cm de altura y 5 cm de anchura transversal reduce la posibilidad de interceptación no autorizada de datos (*eavesdropping*) desde el exterior del sistema de medida.
2. **Efecto Protector del Confinamiento y Señalización:** El decaimiento exponencial de campo (1 dB/cm) confina la energía sobre la cinta transportadora. El nivel de radiación en el resto del laboratorio es insignificante, minimizando la exposición de los operarios. El despliegue contempla señalización informativa para evitar manipulaciones indebidas.
3. **Impacto Ambiental y Sostenibilidad:**
 - Tecnología sin baterías: El uso de etiquetas pasivas evita la necesidad de baterías químicas, eliminando residuos contaminantes al final de su vida útil. Durante el transcurso de esta investigación no se generó ningún residuo electrónico y todos los elementos son reutilizables al finalizar el proyecto.
 - Eficiencia energética: El procesamiento en el extremo mediante *hardware* COTS de bajo consumo (2–5 W) resulta en un gasto minúsculo de electricidad.
 - Reducción de residuos industriales: La precisión de detección superior al 99,9 % disminuye los errores de enrutamiento y devoluciones, reduciendo indirectamente las emisiones del transporte logístico.

Capítulo 3

Estado del Arte y Fundamentos Teóricos

Este capítulo describe los fundamentos de la tecnología *Radio Frequency Identification* (RFID) pasiva *Ultra High Frequency* (UHF) y las técnicas para mitigar las lecturas espurias en cintas transportadoras. Asimismo, se detallan los principios físicos del *Electromagnetic Confinement Device* (ECD) basado en *Substrate Integrated Waveguide* (SIW).

3.1. Estrategia de Búsqueda Bibliográfica

La revisión de la literatura se orientó a identificar las soluciones para la mitigación de lecturas espurias en sistemas RFID.

Las fuentes de consulta incluyeron bases de datos científicas con revisión por pares, principalmente *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) Xplore y Google Scholar. Los términos de búsqueda utilizados incluyeron conceptos como *RFID UHF*, *stray reads*, *Substrate Integrated Waveguide*, *slotted antenna*, *near-field confinement* y *machine learning*.

El proceso de selección priorizó artículos publicados en revistas de la IEEE y congresos del sector, así como contribuciones previas en la caracterización del ECD [Jim23, Jaq25], para establecer la base teórica y experimental.

3.2. Sistemas RFID Pasivos en Entornos Industriales

La RFID pasiva en la banda de UHF (860–960 MHz) opera bajo el principio de retrodispersión modulada (*modulated backscatter*). Existen otros métodos de funcionamiento para sistemas



Figura 3.1: Imagen del tag RFID utilizado. Es un tag Smartrac Belt Monza 5, donde el chip se encuentra en el centro. La parte plateada es la antena que es la encargada de recibir y reflejar la señal recibida.

RFID como el de inducción magnética, utilizada en RFID de baja frecuencia [Cha07]. En el caso de la banda UHF, el lector RFID emite una onda electromagnética que es captada por la antena del tag RFID. Este tag recibe esta señal a través de su antena y enciende el chip que porta en el centro, véase la Figura 3.1. Una vez encendido, el tag identifica la petición del lector y manipula su impedancia para reflejar una señal de retorno codificada con su identificador único (*Electronic Product Code (EPC)*) [Cha07].

Este proceso es análogo a reflejar la luz de un foco mediante un espejo: si se cubre y descubre el espejo siguiendo un código, se transmite información sin necesidad de que el reflector genere luz propia. En RFID UHF, el tag altera electrónicamente su coeficiente de reflexión para modular la portadora incidente generada por el lector, lo que le permite a este último decodificar el EPC a partir de la señal reflejada. Se puede observar una simplificación en la Figura 3.2.

Esta es una de las muchas operaciones que se describen en el estándar de RFID UHF Gen2. Las operaciones que puede realizar un lector están definidas en el protocolo EPC Gen2 [GS126] y no son parte del estudio de este trabajo.

Dado que los tags son normalmente circuitos pasivos y planos, se pueden generar en masa a un bajo coste. Esto es lo que la ha hecho una tecnología omnipresente en los centros de distribución y logística. El hecho de que los tags deban ser tan sencillos, implica que las modulaciones no pueden ser muy complejas, utilizándose normalmente *Amplitude Shift Keying (ASK)*. Se puede encontrar más información sobre el funcionamiento de los tags RFID en [Wei05].

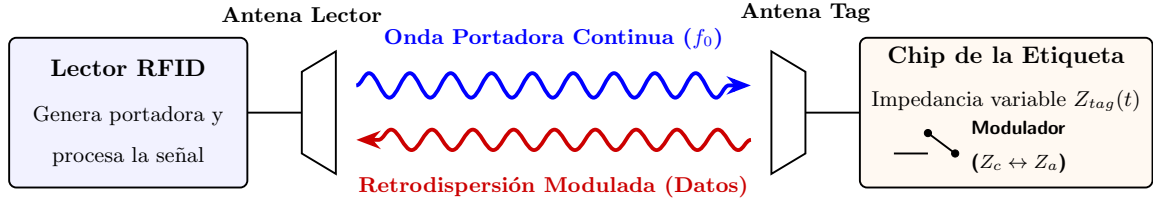


Figura 3.2: Esquema conceptual de la comunicación por retrodispersión modulada (*backscatter*) en un sistema RFID pasivo UHF, donde el chip de la etiqueta altera dinámicamente su impedancia de entrada para reflejar la onda portadora continua emitida por el lector.

3.3. Estrategias para la Mitigación de Lecturas Espurias

La mitigación de lecturas espurias (*stray reads*) en cintas transportadoras se ha abordado mediante técnicas físicas, algorítmicas y de localización.

3.3.1. Apantallamiento electromagnético físico

Consiste en colocar barreras físicas, reflectores metálicos, que aíslan la cinta transportadora de su entorno. Las estructuras tipo túnel o jaulas de Faraday actúan bloqueando la propagación del campo electromagnético fuera de la cinta. Estas barreras incrementan los costes de instalación, dificultan la adaptación en líneas preexistentes y obstaculizan las operaciones de mantenimiento [Med11].

Una jaula de Faraday es un recinto construido con material conductor (habitualmente mallas o planchas metálicas) que explota el principio de redistribución de cargas inducidas. Cuando un campo eléctrico externo $\vec{E}_{\text{ext}}$ incide sobre el conductor, los electrones libres del mismo se desplazan hasta cancelar internamente dicho campo: las cargas negativas migran hacia la superficie expuesta al campo entrante y las cargas positivas quedan en la cara opuesta. Esta redistribución genera un campo interno $\vec{E}_{\text{ind}}$ opuesto y de igual módulo al externo, de modo que el campo neto en el interior es $\vec{E}_{\text{int}} = \vec{E}_{\text{ext}} + \vec{E}_{\text{ind}} = 0$. Las líneas de campo exterior se desvían y se cierran sobre la superficie conductora, quedando el interior completamente apantallado. La Figura 3.3 ilustra este principio: las líneas de campo naranja se doblan alrededor de la jaula, mientras que en su interior no existe campo eléctrico, protegiendo al dispositivo alojado en su interior.

La principal limitación de este tipo de soluciones es su dependencia de una estructura física que debe construirse alrededor de la cinta transportadora. Esto no solo implica un coste adicional en términos de materiales y mano de obra, sino que también dificulta la integración en líneas de producción existentes. Existe también el potencial problema de que si el equipamiento presenta sensores que se comuniquen de manera inalámbrica, no se podrán comunicar por este efecto aislante de las jaulas de Faraday, siendo una solución inviable dependiendo del contexto.

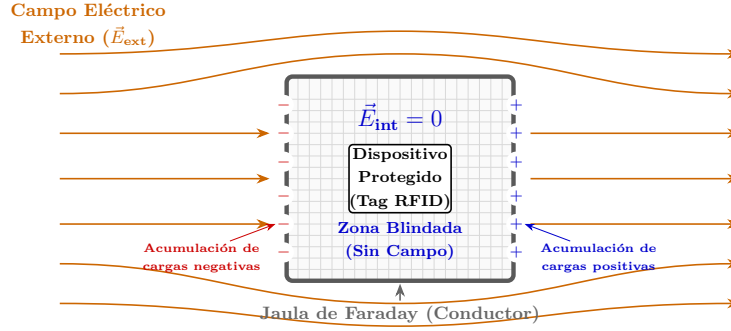


Figura 3.3: Principio de funcionamiento de una jaula de Faraday. Las cargas inducidas en el conductor redistribuyen el campo eléctrico externo $\vec{E}_{\text{ext}}$ de modo que el campo interior es nulo ($\vec{E}_{\text{int}} = 0$), blindando electromagnéticamente el dispositivo alojado en su interior.

3.3.2. Algoritmos de localización y seguimiento

La determinación precisa de la posición de un tag RFID pasivo es un problema relevante en la mitigación de lecturas espurias. Si se conoce la posición del tag, se puede decidir si la lectura proviene de la zona de interés o no. Se han propuesto diversas familias de algoritmos que se describen a continuación.

3.3.2.1. Localización por fase con apertura sintética (*Synthetic Aperture Radar* (SAR))

Buffi et al. [Buf15] proponen una técnica de localización basada en fase para tags en movimiento sobre una cinta transportadora. El principio fundamental se basa en el concepto de apertura sintética SAR: el movimiento conocido del tag genera una antena virtual cuyas muestras permiten estimar la posición.

El modelo de fase de la señal retrodispersada por el tag en la lectura n -ésima viene dado por:

$$\phi_{P_n} = \phi_0 + \frac{4\pi r_n}{\lambda}, \quad n = 1, \dots, N_r \quad (3.1)$$

donde λ es la longitud de onda, ϕ_0 es un desfase constante del *hardware* y r_n es la distancia antena-tag en la lectura n . La coordenada del tag a lo largo de la cinta se muestrea espacialmente con un intervalo $\Delta s = v \cdot \text{IRT}$, donde v es la velocidad de la cinta (conocida) e *Interrogation Repetition Time* (IRT) es el tiempo entre interrogaciones.

La estimación de la posición del tag $\hat{s}_0$ se obtiene maximizando la correlación normalizada entre la historia de fase medida y un conjunto de historias de fase nominales calculadas

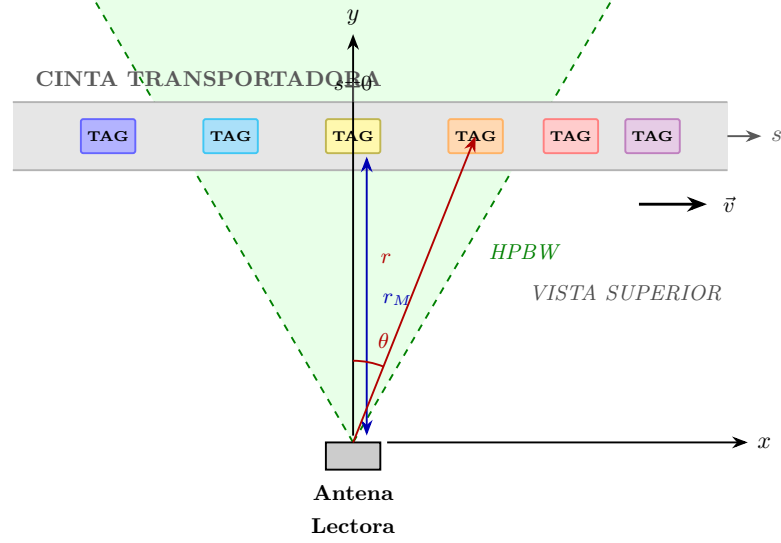


Figura 3.4: Escenario RFID con elementos etiquetados moviéndose en una cinta transportadora (vista superior). Adaptado de Buffi et al. [Buf15].

analíticamente para cada hipótesis s'_0 :

$$\hat{s}_0 = \arg \max_{s'_0} \frac{|\mathbf{a}^H(s'_0) \mathbf{y}_p|^2}{\|\mathbf{a}(s'_0)\|^2 \cdot \|\mathbf{y}_p\|^2} \quad (3.2)$$

donde $\mathbf{a}(s'_0)$ es el vector de dirección (*steering vector*) y $\mathbf{y}_p$ es el vector de datos de fase medido. La resolución espacial del sistema viene determinada por la apertura sintética D y la distancia antena-cinta r_M :

$$R_s = \frac{r_M \lambda}{2D} \quad (3.3)$$

Los resultados experimentales con una cinta transportadora real demuestran precisiones de localización del orden del centímetro (~ 2 cm de error medio) y capacidad de ordenamiento (*sorting*) correcto incluso en presencia de multitrayecto. Sin embargo, el método requiere conocer la velocidad de la cinta y su trayectoria, y necesita recopilar $N_r \geq 10$ lecturas durante el paso del tag.

3.3.2.2. Intersección hiperbólica con desenvelto de fase

Tripicchio et al. [Tri22] proponen un método de localización 2D que combina la apertura sintética con el desenvelto de fase (*phase unwrapping*) y la intersección analítica de hipérbolas. Este método está diseñado para una antena montada sobre un robot móvil que recorre el entorno.

El modelo fase-distancia para la lectura i -ésima es:

$$\phi_i = \left(\phi_0 + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2r \right) \text{ mód } 2\pi \quad (3.4)$$

La ambigüedad de fase se resuelve mediante desenvuelto (*unwrapping*), que reconstruye la fase acumulada eliminando los saltos de 2π . Una vez obtenida la variación de distancia Δr entre dos posiciones de la antena AP_0 y AP_1 (separadas por una distancia d), el lugar geométrico de posiciones del tag compatibles con esa medida es una hipérbola con parámetros:

$$a = \pm \frac{\Delta r}{2}, \quad b = \pm \frac{\sqrt{d^2 - \Delta r^2}}{2} \quad (3.5)$$

La intersección de múltiples hipérbolas, generadas conforme la antena se desplaza, proporciona un conjunto de estimaciones de la posición del tag. La mejor estimación se selecciona minimizando una función de calidad:

$$\text{posRFID}^* = \arg \min_{(x,y) \in \mathcal{I}} \sum_{i=0}^N \sum_{k=i+1}^N Q_{k,i} \quad (3.6)$$

donde $Q_{k,i} = \|D_i - D_k - (\text{phiDist}_i - \text{phiDist}_k)\|$ mide la consistencia entre las distancias geométricas y las distancias derivadas de la fase, y $\mathcal{I}$ es el conjunto de intersecciones calculadas.

Los experimentos demuestran errores de localización inferiores a 5 cm en un escenario con 38 tags y un robot equipado con *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM). La principal limitación es la necesidad de un agente móvil que genere la apertura sintética y un sistema externo de posicionamiento.

3.3.2.3. Posicionamiento hiperbólico con redes neuronales

Megalou et al. [Meg22] proponen un sistema de seguimiento en tiempo real basado en posicionamiento hiperbólico combinado con redes neuronales. El sistema utiliza dos pares de antenas fijas en posiciones conocidas para rastrear un tag móvil.

La diferencia de fase $\Delta\phi_{12}$ entre dos antenas de un par, separadas una distancia d_{12} , se relaciona con la diferencia de distancias:

$$\Delta\phi_{12} = \frac{4\pi}{\lambda}(d_1 - d_2) \quad (3.7)$$

donde d_1 y d_2 son las distancias desde el tag a cada antena del par. Para evitar la ambigüedad de fase, se restringe la separación entre antenas a $d_{12} < \lambda/2$.

El sistema calcula la diferencia de fase de cada par de antenas en cada instante de tiempo, desenvuelve los saltos de 2π , y aplica un filtro de Savitzky-Golay para suavizar el ruido. En lugar de calcular analíticamente la intersección de las hipérbolas 3D (problema sin solución cerrada general), se entrena una red neuronal para aproximar la función que mapea las diferencias de fase a la posición del tag. Tras el entrenamiento, se aplica un filtro de Kalman a las predicciones de la red para estabilizar la trayectoria estimada.

Los experimentos en un escenario de museo con multitrayecto severo obtuvieron errores medios de 24–47 cm, suficientes para el seguimiento de visitantes. El método es aplicable en tiempo real, pero requiere cuatro antenas fijas, un entrenamiento previo específico para cada geometría y la distancia entre antenas de cada par inferior a $\lambda/2 \approx 17$ cm.

3.3.2.4. Estimación de ángulo de llegada (*Angle of Arrival* (AoA)) con fusión bayesiana

Benelmekki et al. [Ben26] proponen un marco bayesiano informado por la física para la estimación del AoA con *hardware Commercial Off-the-Shelf* (COTS). El sistema utiliza dos antenas separadas una distancia L y un lector Zebra FX7500.

El estimador más sencillo es la diferencia de fase (*Phase Difference*, PD):

$$\hat{\theta}_{PD} = \arcsin \left(\frac{\lambda}{2\pi L} (\Delta\varphi - \Delta\varphi_0) \right) \quad (3.8)$$

donde $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ es la diferencia de fase medida entre las dos antenas y $\Delta\varphi_0$ el desfase del *hardware*. Para evitar la ambigüedad se requiere $L \leq \lambda/(2 \sin \theta_m)$.

Sin embargo, el estimador PD individual produce errores del orden de $5,5^\circ$ en entornos reales. Para mejorar la precisión, el sistema calcula también estimaciones mediante *Delay-and-Sum Beamforming* y el algoritmo *MUltiple SIgnal Classification* (MUSIC). Estas cuatro estimaciones físicas se introducen como observaciones ruidosas en un modelo de regresión bayesiana que trata el AoA verdadero como una variable latente, fusionando las estimaciones para obtener un resultado con incertidumbre calibrada.

La mejor configuración alcanza un *Root Mean Square Error* (RMSE) de $0,50^\circ$ y un *Mean Absolute Error* (MAE) de $0,37^\circ$. No obstante, el sistema requiere una fase de calibración con datos etiquetados, un array de dos antenas con separación precisa, e interrogación multifrecuencia en los cuatro canales *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI).

3.3.2.5. Fusión de RFID y visión por computador

Duan et al. [Dua17] proponen un sistema (*TagVision*) que fusiona visión por computador (CV) y RFID para el seguimiento fino de objetos etiquetados. El subsistema CV obtiene las trayectorias de los objetos mediante sustracción de fondo y seguimiento de *blobs*, mientras que el lector RFID proporciona la secuencia de fase del tag.

El algoritmo de fusión calcula, para cada trayectoria candidata L_i , la fase teórica esperada a partir de las posiciones conocidas del objeto:

$$\vartheta_{i,j} = \frac{4\pi}{\lambda} |P_{i,j} A| \text{ mód } 2\pi \quad (3.9)$$

donde $P_{i,j}$ es la posición del objeto i en el instante j y A es la posición de la antena. La asignación se realiza mediante un *matching score* que mide la correlación entre la fase medida y la teórica.

El sistema alcanza una precisión de seguimiento de ~ 10 mm pero requiere una cámara calibrada, sincronización temporal entre RFID y CV mediante *Network Time Protocol* (NTP), y un coste computacional elevado por la fusión multimodal.

3.3.3. Síntesis comparativa de los métodos de localización

La Tabla 3.1 resume los requisitos y limitaciones de cada enfoque descrito. Los métodos basados en fase (SAR e hiperbólico) ofrecen precisiones del orden del centímetro, pero requieren conocer la velocidad de la cinta o emplear un agente móvil. Los métodos de AoA logran resoluciones angulares inferiores al grado, pero necesitan arrays de antenas calibrados y entrenamiento previo. La fusión RFID+CV alcanza la mayor precisión espacial (~ 10 mm), pero a costa de la complejidad del sistema multimodal.

Cuadro 3.1: Comparación de los métodos de localización y seguimiento RFID revisados.

Método	Precisión	Antenas	Tiempo real	Requisitos principales
SAR fase [Buf15]	~ 2 cm	1	Sí	Velocidad de cinta conocida
Hiperbólico [Tri22]	< 5 cm	1 (móvil)	No	Robot con SLAM
Hiperbólico + NN [Meg22]	24–47 cm	4 fijas	Sí	Entrenamiento por geometría
AoA Bayesiano [Ben26]	$0,5^\circ$	2 (array)	Sí	Calibración con datos etiquetados
RFID + CV [Dua17]	~ 10 mm	1 + cámara	Sí	Cámara calibrada y NTP

Todos los métodos comparten la necesidad de infraestructura adicional (múltiples antenas, cámaras, robots o sensores de velocidad) o de información *a priori* (velocidad de la cinta, geometría del escenario) para funcionar correctamente. Además, la precisión de los métodos basados en fase se degrada en presencia de multitrayecto, reflexiones electromagnéticas y ruido del *hardware*. Estas limitaciones motivan la búsqueda de enfoques alternativos que simplifiquen la discriminación de lecturas espurias sin depender de la localización espacial del tag.

3.3.4. Posicionamiento de este trabajo frente al estado del arte

El enfoque de este trabajo combina *hardware* y *software* para superar las limitaciones de las estrategias aisladas:

- **Frente al apantallamiento físico:** El ECD basado en SIW confina el campo electromagnético a nivel de *hardware*, evitando blindajes mecánicos y facilitando la adaptación en líneas preexistentes.
- **Frente a los métodos de localización:** En lugar de estimar la trayectoria tridimensional del tag (lo que requiere lectores multicanal y algoritmos complejos), el procesamiento de señal aprovecha la onda estacionaria del ECD para segmentar y clasificar los pasos mediante características estadísticas sencillas.
- **Frente a los enfoques basados en datos:** Los métodos basados en datos con antenas convencionales de campo lejano requieren que la velocidad de la cinta sea conocida y constante. En este trabajo, el ECD genera una traza característica con un contraste elevado entre pasos, lo que simplifica la clasificación. Esto permite utilizar clasificadores más sencillos.

Aunque el método no requiere conocer la velocidad de la cinta para la segmentación, asume que el desplazamiento del tag ocurre a una velocidad aproximadamente constante durante el intervalo de paso (duración del arco). La validez de esta hipótesis se analiza en el Capítulo 7.

3.4. Fundamentos de Dispositivos de Confinamiento de Campo (ECD) y SIW

Una alternativa consiste en realizar un filtrado espacial directamente a nivel de *hardware* electromagnético, limitando el volumen de lectura mediante los ECD.

3.4.1. Principio Físico: Acoplamiento de Ondas Evanescentes

En electromagnetismo, un campo o onda evanescente es un campo electromagnético oscilante cuya energía está espacialmente concentrada en las proximidades de la fuente, pero que no se propaga por el espacio como una onda convencional. A diferencia de las ondas radiadas en campo lejano, el vector de Poynting¹ promediado en el tiempo de un campo evanescente es nulo, lo que implica que no hay un flujo neto de energía hacia el exterior. En su lugar, la intensidad del

¹El vector de Poynting representa la densidad direccional de flujo de energía de un campo electromagnético. Matemáticamente se define como el producto vectorial del campo eléctrico y el magnético ($\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$).

campo decae exponencialmente a medida que aumenta la distancia desde la superficie que lo genera.

Cuando la radiación electromagnética encuentra una interfaz, entre un medio y el aire, con un ángulo muy inclinado, por encima del ángulo crítico, se refleja por completo. Sin embargo, las ecuaciones de Maxwell no permiten una transición abrupta a 0 de los campos electromagnéticos en la frontera. En su lugar un poco de energía se propaga en las proximidades del material, formando una onda evanescente. Esta onda se propaga en la dirección de la superficie y se desvanece de forma exponencial al alejarse de la misma.

Para poner un ejemplo, supongamos dos materiales cuya interfaz se encuentra en el plano horizontal (xz en $y = 0$) y que la propagación de la onda se da en el plano perpendicular (xy en $z = 0$). Se puede observar un esquema simplificado en la Figura 3.5.

La onda transmitida tendrá dos componentes en el plano de propagación:

$$\mathbf{k}_t = k_y \hat{\mathbf{y}} + k_x \hat{\mathbf{x}} \quad (3.10)$$

donde $k_x = k_t \sin \theta_t$, $k_y = k_t \cos \theta_t$ y θ_t es el ángulo de la onda transmitida. La ley de Snell modela el cambio de dirección de una onda cuando pasa de un medio a otro, relaciona los ángulos de incidencia y refracción con los índices de refracción de los materiales.

$$n_i \sin(\theta_i) = n_t \sin(\theta_t) \quad (3.11)$$

Ahora, combinando la ley de 3.11 con 3.10, podemos obtener la siguiente expresión:

$$k_y = k_t \cos \theta_t = \pm k_t \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_i n_i^2}{n_t^2}} \quad (3.12)$$

Si tenemos una reflexión total, es decir, el ángulo de incidencia θ_i es mayor que el ángulo crítico θ_c se cumple que $\sin(\theta_i) > \sin(\theta_c) = \frac{n_t}{n_i} = n_{ti}$ por lo tanto k_y se vuelve imaginario:

$$k_y = \pm i k_t \sqrt{\left(\frac{\sin^2 \theta_i}{n_{ti}^2} - 1\right)} = \pm i \alpha \quad (3.13)$$

Si la polarización es perpendicular al plano de incidencia, es decir, presenta una componente en z , entonces se puede expresar el campo eléctrico como:

$$E_z(x, y, z) = E_0 e^{-i \mathbf{k}_t \cdot (x, y, z)} = E_0 e^{-i(k_x x \pm k_y y)} = E_0 e^{\pm \alpha y - i \beta x} \quad (3.14)$$

donde $\alpha = k_t \sqrt{\left(\frac{\sin^2 \theta_i}{n_{ti}^2} - 1\right)}$ es la atenuación constante y $\beta = k_x$ es la constante de fase. La parte positiva $+i\alpha$ se descarta ya que no tiene sentido físico porque implicaría una amplificación.

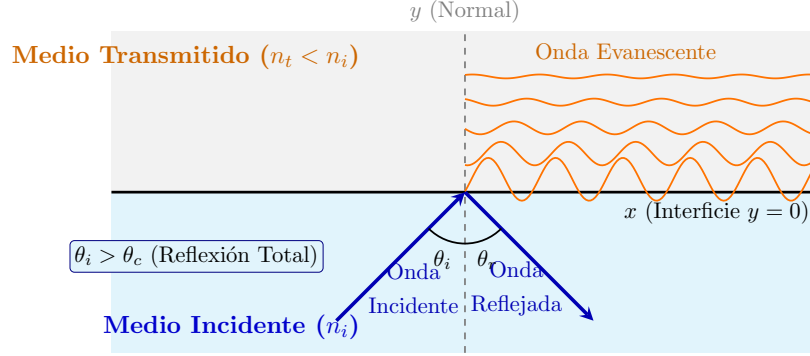


Figura 3.5: Representación gráfica de la formación de una onda evanescente en una reflexión total interna. La energía no se propaga en el medio menos denso, sino que se desplaza tangencialmente a la interfaz mientras su amplitud decae exponencialmente.

3.4.2. Diseño físico del ECD utilizando SIW

El principio fundamental de un ECD se basa en la generación controlada de estas ondas evanescentes. Un factor de diseño es el factor de decaimiento α que se relaciona con el número de onda en el vacío k_0 y el número de onda en la estructura β como:

$$\alpha = \sqrt{\beta^2 - k_0^2} \quad (3.15)$$

En el caso de un dispositivo fabricado con tecnología SIW, la estructura se comporta como una guía de onda rellena de un material dieléctrico. Su número de onda β depende de la frecuencia de operación (f), la permitividad relativa del material (ϵ_r) y la anchura física de la guía (a), según la relación teórica [Ja25]:

$$\beta = \sqrt{\epsilon_r \left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} \quad (3.16)$$

donde c es la velocidad de la luz.

Combinando ambas ecuaciones, el ingeniero puede diseñar la anchura geométrica a exacta de la guía para forzar un nivel de atenuación α deseado, adaptando así el volumen de lectura a las necesidades concretas de la aplicación:

$$a = \frac{\pi}{\sqrt{(\epsilon_r - 1) \left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 - \alpha^2}} \quad (3.17)$$

Esta formulación demuestra que, seleccionando un sustrato adecuado (ϵ_r) y diseñando la geometría correcta (a), es posible crear una región de iluminación electromagnética muy delimitada donde el campo decae rápidamente (por ejemplo, a un ritmo de 1 dB/cm), evitando por completo las fugas de radiación en campo lejano que sufren las antenas UHF convencionales.

La interacción entre el ECD y el tag RFID se produce a través del fenómeno conocido como acoplamiento de ondas evanescentes (*evanescent-wave coupling*). Cuando el tag entra en el volumen de confinamiento (campo cercano), su antena se solapa con el campo del dispositivo. Esto produce una transferencia de energía local que permite alimentar el circuito integrado del tag y establecer comunicación sin emitir ondas que se propaguen más allá del área deseada. Esta característica es la que asegura que solo los objetos que cruzan físicamente por el área restringida sean leídos.

La tecnología SIW emula una guía de onda rectangular dentro de una placa de circuito impreso (*Printed Circuit Board* (PCB)) de doble cara. Las caras de cobre superior e inferior forman las paredes horizontales, mientras que las filas de vías metalizadas forman las paredes laterales. Las ranuras en la cara superior irradian una fracción de la energía, generando un campo electromagnético en la superficie que decae de forma exponencial con la distancia vertical, definiendo el comportamiento de campo cercano del ECD [Jim23].

Un ECD basado en SIW con ranuras (*slotted SIW*) actúa como una línea de transmisión que irradia campo electromagnético en la región de campo cercano, presentando las siguientes propiedades:

- **Atenuación exponencial del campo:** El campo electromagnético decae a una tasa de 1 dB/cm en la banda de UHF, limitando la detección en campo lejano [Jaq25].
- **Generación de ondas estacionarias:** La estructura de ranuras del ECD induce un patrón de interferencia electromagnética de onda estacionaria a lo largo de su superficie, lo que genera lóbulos en la intensidad de campo eléctrico.
- **Firma característica:** Al desplazarse un tag sobre la superficie del ECD, las variaciones espaciales del campo inducen una forma característica del campo irradiado en las proximidades. Este patrón permite la posterior discriminación algorítmica, como se muestra en la Figura 3.6.

3.4.3. Regiones de Campo y Distancia de Fraunhofer

Las regiones de campo electromagnético en función de la distancia z al elemento radiante se dividen en tres zonas:

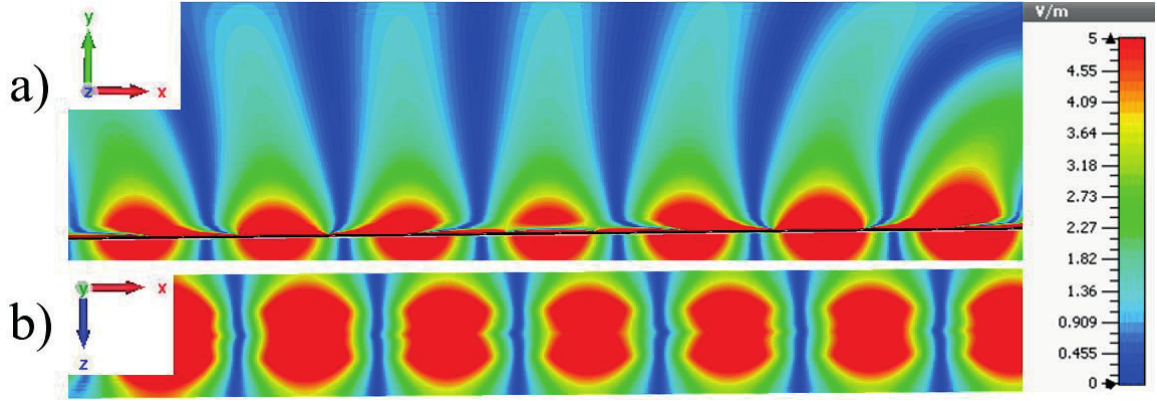


Figura 3.6: Campo eléctrico simulado del ECD a 867 MHz. (a) Plano xy . (b) Plano xz a 10 mm de la superficie. Extraído de [Jim23].

1. **Campo cercano reactivo:** Región inmediatamente adyacente a la antena ($z < 0,62\sqrt{D^3/\lambda}$, donde D es la dimensión máxima de la antena y λ es la longitud de onda). En esta zona domina el campo reactivo no propagativo (evanescente), el cual almacena energía electromagnética pero no la irradia de forma neta. La intensidad de campo decae de forma exponencial.
2. **Campo cercano radiante o región de Fresnel:** Zona de transición intermedia ($0,62\sqrt{D^3/\lambda} \leq z < 2D^2/\lambda$) donde los campos reactivos se atenúan y el campo de radiación comienza a dominar, aunque la forma del haz varía con la distancia.
3. **Campo lejano o región de Fraunhofer:** Región a partir de la distancia de transición o distancia de Fraunhofer:

$$d_F = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.18)$$

En esta zona ($z \geq d_F$), la distribución angular de la energía se mantiene estable, comportándose como una onda plana donde la densidad de potencia decae proporcionalmente a la inversa del cuadrado de la distancia ($1/z^2$) en el espacio libre.

Para las antenas directivas COTS de campo lejano, la distancia de Fraunhofer es grande, operando en la tercera región para propagar energía a larga distancia. En contraste, el diseño del ECD restringe la radiación en campo lejano mediante la carga de adaptación de 50Ω y las ranuras de la guía SIW. La interrogación ocurre dentro de la región de campo cercano (rango vertical de 0 a 15 cm). Fuera de esta zona, el campo decae a un ritmo de 1 dB/cm, evitando lecturas a distancias mayores. La Figura 3.7 ilustra las regiones electromagnéticas y la comparación de la atenuación de potencia entre ambos enfoques.

Es importante destacar que este dispositivo nos permite utilizar tags desarrollados para campo lejano en aplicaciones de corto alcance, siendo conveniente para operaciones de almacén y puntos de venta donde se quiere leer a varios metros como en distancias muy cortas.

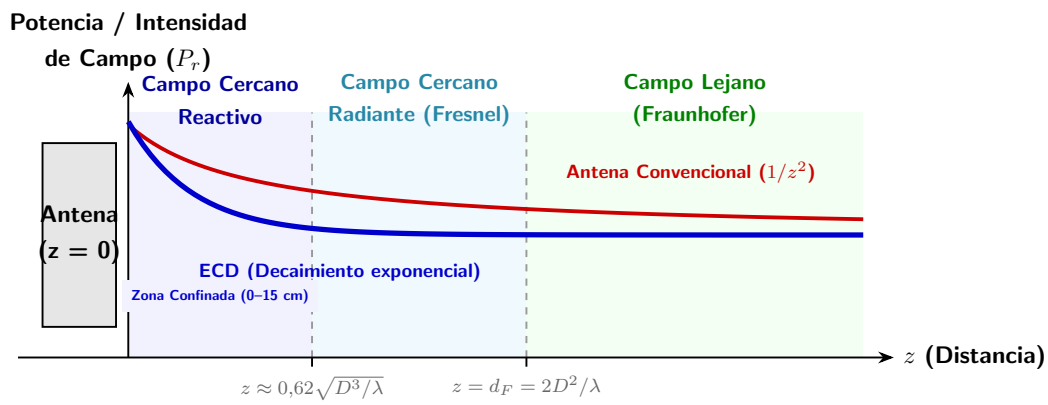


Figura 3.7: Esquema conceptual de las regiones electromagnéticas y comparación de las curvas de atenuación de potencia en función de la distancia z para una antena de campo lejano convencional ($1/z^2$) y el ECD confinante en campo cercano (decaimiento exponencial).

Capítulo 4

Diseño del Sistema y Algoritmo de Segmentación

Este capítulo describe la formulación matemática del problema de detección y detalla el diseño de la capa *software* encargada del procesamiento de señal. En particular, se presenta el algoritmo de segmentación de arcos en dos fases desarrollado para delimitar y normalizar los perfiles temporales de las señales capturadas.

4.1. Definición y Formalización del Problema

Se considera un escenario industrial donde una cinta transportadora traslada objetos equipados con tags *Radio Frequency Identification* (RFID) pasivos *Ultra High Frequency* (UHF) (tags válidos). En el entorno existen otros tags que permanecen estáticos o en movimiento fuera de la línea de transporte (tags espurios). El objetivo consiste en detectar y registrar únicamente los tags válidos que atraviesan la zona de lectura, rechazando las lecturas procedentes de los tags espurios.

Cuando un tag RFID es leído por el lector, este registra una secuencia temporal de observables electromagnéticos en cada instante de lectura n :

- El *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), expresado en dBm. Es una medida logarítmica de la potencia recibida, donde 0 dBm equivale a 1 mW. Las señales recibidas son débiles (típicamente entre -40 dBm y -80 dBm). Que el lector Zebra FX7500 entregue el RSSI digitalizado en pasos discretos de 1 dB implica una cuantificación gruesa: los pequeños cambios cerca de la transición entre uno y otro valor resultan en saltos de 1 dBm que no es insignificante teniendo en cuenta el orden de magnitud del número de valores que observamos que no llega a 100. Este problema de cuantificación requerirá de cierto suavizado

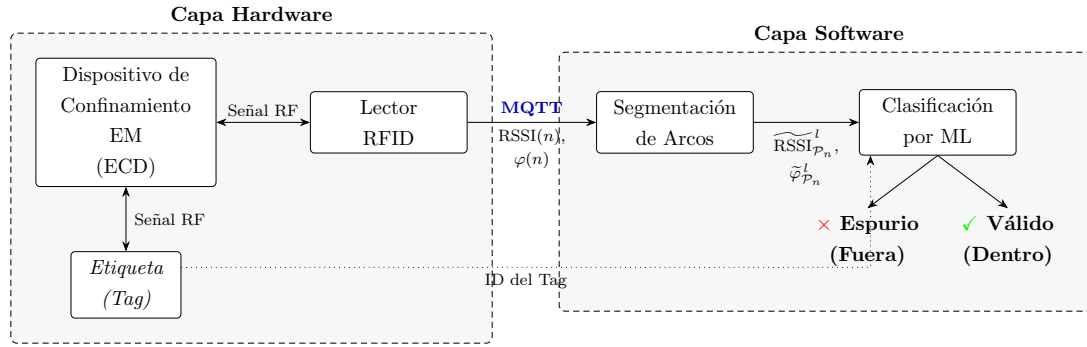


Figura 4.1: Diagrama de bloques de la solución propuesta. El hardware captura las lecturas de RFID desde la cinta transportadora, mientras que la capa de *software* aplica procesamiento de señal y clasificación de ML para determinar si cada lectura procede de la zona de interés o si es una lectura espuria.

de la señal.

- La fase de la señal recibida, $\varphi(n)$, expresada en grados dentro del intervalo $[-180^\circ, 180^\circ]$. Mide la posición relativa del frente de onda electromagnética en el receptor. Dado que las ondas electromagnéticas son periódicas, la fase medida está confinada al rango $[-180^\circ, 180^\circ]$. A medida que el tag se desplaza, la fase evoluciona de forma continua, pero al alcanzar el límite del intervalo experimenta un salto de 180° a -180° (*wrapping*). Este comportamiento periódico impide el uso de herramientas estadísticas lineales tradicionales, puesto que la media aritmética no considera la continuidad en los extremos del intervalo, lo que requiere emplear estadística circular.

El paso de un tag por encima del *Electromagnetic Confinement Device* (ECD) genera un patrón de potencia en forma de arco debido al acoplamiento de campo cercano y al patrón de onda estacionaria del elemento radiante. Las ranuras radiantes del ECD generan un patrón de interferencia espacial (onda estacionaria) con crestas de alta intensidad electromagnética alternadas con valles de intensidad nula a distancias fijas. Cuando un objeto etiquetado transita longitudinalmente sobre el ECD, el tag experimenta secuencialmente estos máximos y mínimos de campo. La potencia recibida (RSSI) dibuja una serie de oscilaciones suaves y simétricas (arcos de potencia) cuya amplitud decae hacia los extremos del trayecto, como se puede observar en la Figura 4.2. Esta firma geométrica permite distinguir un paso válido de una lectura espuria, la cual presenta un RSSI plano o fluctuante sin estructura definida. Las lecturas espurias carecen de esta modulación espacial, de modo que el problema de clasificación se reduce a discriminar estos perfiles temporales segmentados.

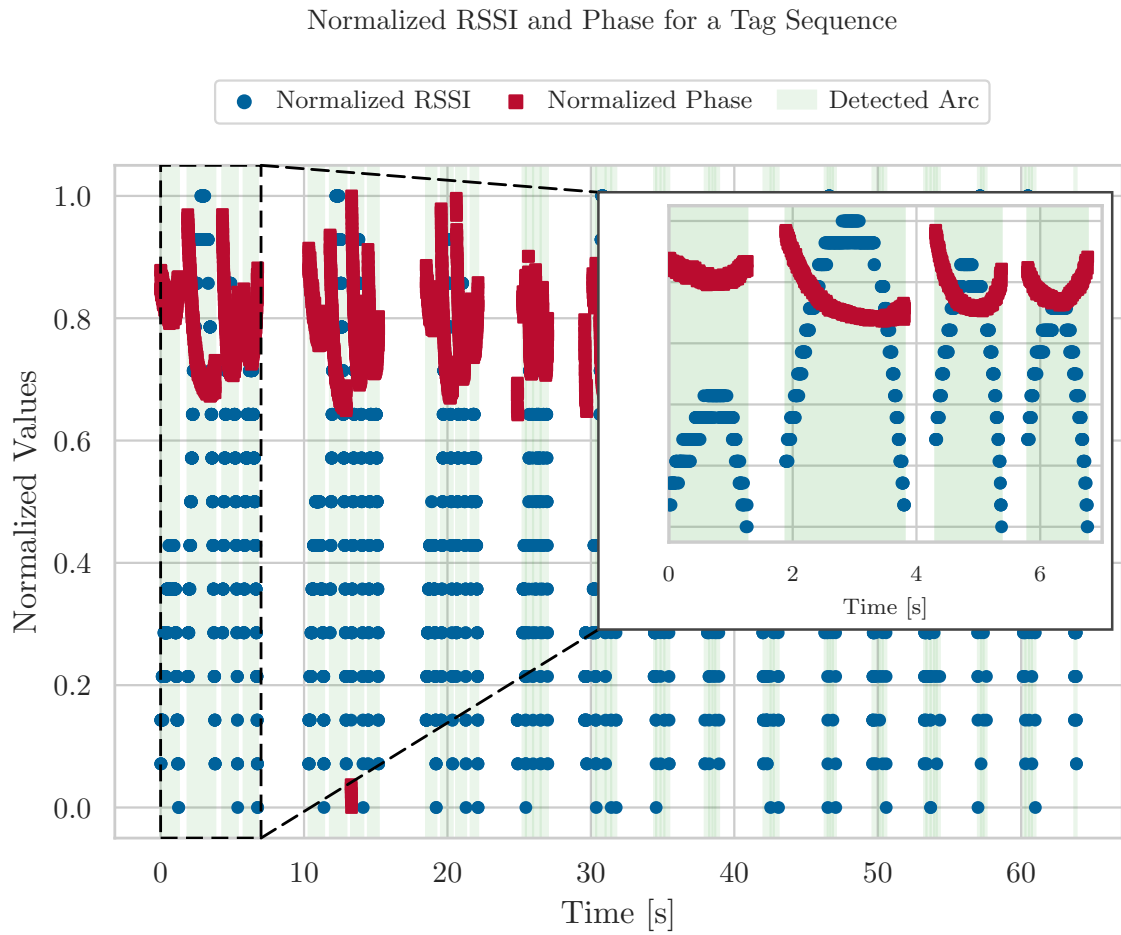


Figura 4.2: RSSI y fase normalizados para una secuencia de paso típica de un tag RFID, ilustrando la estructura de arco de potencia producida por el patrón de onda estacionaria del ECD.

4.2. Algoritmo de Segmentación de Arcos

El algoritmo de segmentación aísla los pasos individuales de los tags en segmentos de longitud fija L_s tanto para el RSSI como para la fase. El flujo de trabajo consta de dos fases controladas por los parámetros $\mathcal{P} = \{\Delta_{th}, \Delta_{sth}, L_{th}, L_s, \sigma_F\}$. Estos parámetros se irán introduciendo con la explicación del algoritmo.

4.2.1. Fase I: Segmentación temporal aproximada (Coarse-to-Fine)

Esta fase realiza una segmentación inicial basada en las diferencias de tiempo entre lecturas sucesivas de un mismo tag i :

$$\Delta_i(n) = t_i(n+1) - t_i(n) \quad (4.1)$$

donde $t_i(n)$ es la marca de tiempo de la lectura n para el tag i .

1. **Segmentación gruesa:** Se define un límite de inactividad temporal Δ_{th} (primer parámetro). Si la diferencia temporal $\Delta_i(n) > \Delta_{th}$, se asume que ha transcurrido un tiempo prolongado sin lecturas, dividiendo la señal en segmentos independientes $RSSI_{i,j}(n)$.
2. **Segmentación fina:** Dentro de cada segmento grueso j , se aplica una segmentación más fina en las posiciones que cumplen:

$$\Delta_{i,j}(n) > \mu_{i,j} + \Delta_{sth}\sigma_{i,j} \quad (4.2)$$

donde $\mu_{i,j}$ y $\sigma_{i,j}$ son la media y la desviación estándar de las diferencias temporales $\Delta_{i,j}(n)$ en dicho segmento. Δ_{sth} es el segundo parámetro y representa el número de variaciones estándar por encima de la media a partir del cual se divide un segmento basándonos en la diferencia de tiempo entre muestras.

3. **Filtrado por longitud:** Aquellos subsegmentos que contienen un número de muestras menor o igual a un umbral L_{th} (tercer parámetro) se descartan por considerarse ruido o lecturas de corta duración.

4.2.2. Fase II: Remuestreo, suavizado y detección de picos

La Fase II delimita los arcos individuales dentro de los segmentos obtenidos:

1. Se remuestrea temporalmente cada segmento a una longitud estándar de L_s (cuarto parámetro) muestras mediante interpolación lineal.

2. Se aplica un filtro de suavizado Gaussiano con desviación estándar σ_F (quinto parámetro). Se utiliza este filtro para eliminar las fluctuaciones causadas por la cuantificación de 1 dBm del lector RFID, sin introducir sobreoscilación (*overshoot*). Este filtro no altera la simetría temporal ni introduce un retraso de grupo asimétrico, lo que preserva el alineamiento del pico central de potencia y permite un remuestreo consistente.
3. La señal de RSSI suavizada se normaliza al rango $[0, 1]$ e invierte verticalmente.
4. Se ejecuta un algoritmo de detección de picos locales sobre la señal invertida. Dado que los algoritmos estándar de búsqueda de picos están diseñados para localizar máximos locales, la señal se invierte verticalmente. De este modo, los máximos locales detectados corresponden a los valles o mínimos de potencia de la señal original, que representan los límites de transición entre arcos sucesivos de paso.

4.3. Optimización de Parámetros mediante Evolución Diferencial

Para evitar depender de la calibración manual en cada cambio de velocidad o de geometría, los parámetros de segmentación $\mathcal{P}$ se optimizan utilizando *Differential Evolution* (DE) [Roc11]. Este algoritmo se utiliza porque la función de coste basada en la discrepancia del conteo de arcos es discontinua, no diferenciable y presenta múltiples mínimos locales, lo que impide el uso de métodos basados en gradiente.

El proceso de optimización requiere un etiquetado manual de unas pocas docenas de secuencias de referencia. Este etiquetado consiste en indicar el número de arcos de paso reales en cada secuencia. La función de coste mide la discrepancia entre el número de arcos anotados y el número de segmentos detectados. El optimizador busca el vector de parámetros $\mathcal{P}$ que minimiza esta discrepancia, iterando hasta cumplir el criterio de parada:

$$|\text{Mean Squared Error}(\text{MSE})^n(\mathcal{P}_{n-1}) - \text{MSE}^{n+1}(\mathcal{P}_n)| < \epsilon \quad (4.3)$$

Se puede observar en la Figura 4.3 el diagrama de flujo del algoritmo de segmentación, así como el de DE. Las fases I y II representarían el flujo normal del código, mientras que la parte de DE representa la optimización de los parámetros de segmentación.

4.3.1. Resultado de la Optimización

La optimización mediante DE se llevó a cabo partiendo de un vector de inicialización $\mathcal{P}^0 = \{1, 2, 5, 2, 200\}$. Estos valores iniciales se escogieron por ser unos valores razonables para

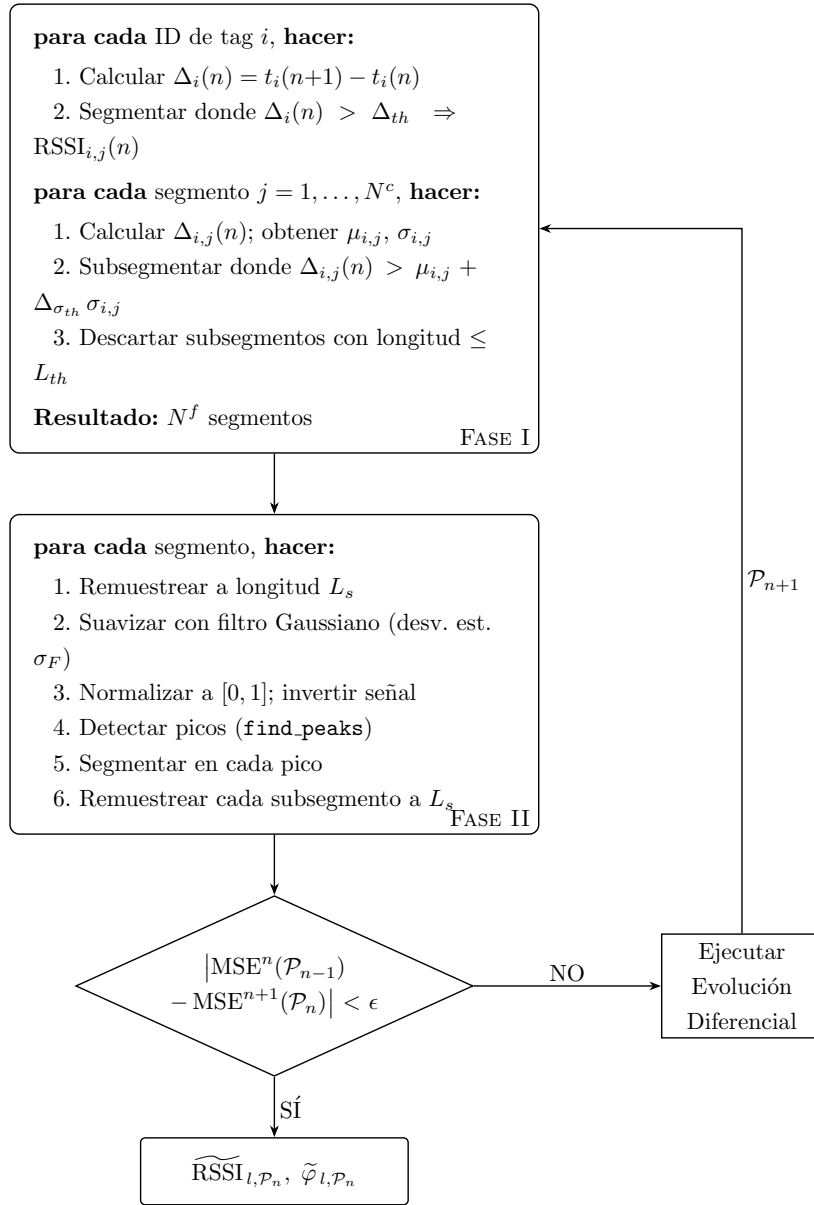


Figura 4.3: Diagrama de flujo del proceso de DE. Los bloques de Fase I y Fase II representarían el flujo normal del código.

cada variable, dejando que el algoritmo los optimizara. Al evaluar las funciones de coste (*Mean Relative Error* (MRE) y MSE), se obtuvieron los parámetros reportados en la Tabla 4.1.

Cuadro 4.1: Parámetros de segmentación de arcos optimizados mediante Evolución Diferencial.

Función de Coste	Δ_{th} (s)	$\Delta_{\sigma th}$	L_{th}	σ_F	L_s
Error Relativo Medio (MRE)	0,57	8,72	3	2,34	129
Error Cuadrático Medio (MSE)	0,55	8,83	3	4,07	224

Se observa consistencia en los parámetros obtenidos por ambas funciones de coste. La diferencia en σ_F y L_s es físicamente coherente debido al acoplamiento a través de la relación L_s/σ_F , la cual determina el grado de suavizado aplicado a las señales de RSSI y fase.

Como referencia, se evaluó inicialmente una búsqueda en rejilla (*grid search*). Debido a las cinco dimensiones del espacio y la resolución requerida, esta técnica requirió varios minutos de procesamiento en *Central Processing Unit* (CPU). La optimización por DE convergió a los mismos valores en unos segundos debido al carácter dirigido de su búsqueda heurística, por lo que se prefirió este acercamiento.

Capítulo 5

Montaje Experimental y Adquisición de Datos

Este capítulo describe la configuración física del hardware y del sistema informático de adquisición empleado en el laboratorio. Asimismo, se describe el procedimiento de la campaña de mediciones para la creación del conjunto de datos.

5.1. Componentes del Hardware Electromagnético

El sistema requiere componentes específicos para restringir la radiación espacial:

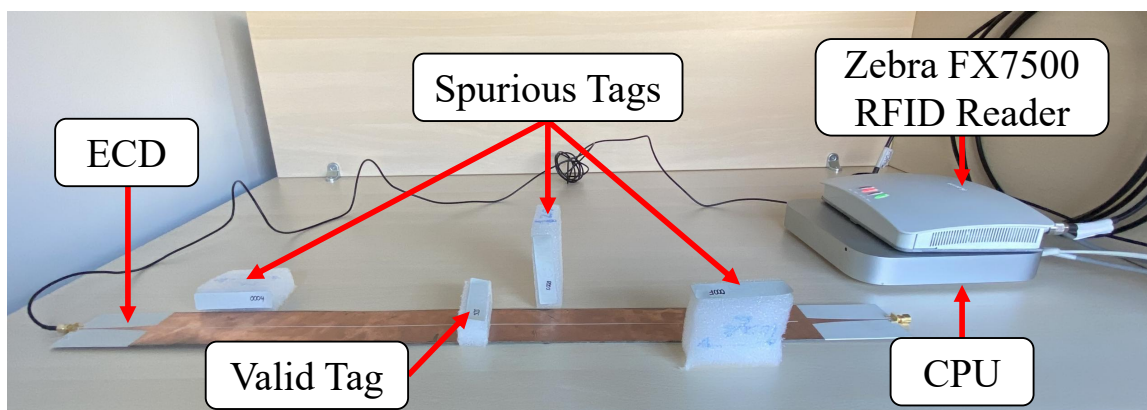


Figura 5.1: Montaje experimental desplegado en el laboratorio.

5.1.1. Elemento radiante: Dispositivo de Confinamiento Electromagnético (*Electromagnetic Confinement Device* (ECD))

El ECD consiste en una antena de ranuras basada en tecnología *Substrate Integrated Waveguide* (SIW). La antena opera en la banda europea de *Ultra High Frequency* (UHF) *Radio Frequency Identification* (RFID) (865,7–867,5 MHz) y está conectada a una carga de adaptación de $50\ \Omega$ para asegurar el comportamiento de onda progresiva y el perfil de radiación confinado [Jim23]. El campo en la superficie del dispositivo decae a un ritmo aproximado de 1 dB/cm [Jaq25]. Para mantener distancias constantes y evitar interferencias durante los ensayos, se utiliza espuma de poliestireno expandido, cuyas propiedades dieléctricas son similares a las del aire al estar relleno en su mayoría de este.

5.1.2. Lector RFID

Se utiliza un lector comercial de dos puertos modelo **Zebra FX7500**. Este dispositivo actúa como *front-end* de radiofrecuencia, gestionando la modulación, demodulación y el cumplimiento del protocolo *Electronic Product Code* (EPC) Class 1 Gen 2. El proceso de digitalización impone los siguientes límites de resolución para la captura de los observables [Mac25]:

- **Received Signal Strength Indicator (RSSI):** resolución de 1 dBm.
- **Fase:** resolución de $\approx 0,005^\circ$ por el *Analog-to-Digital Converter* (ADC) interno del lector.
- **Marca de tiempo:** resolución de 1 ms (*timestamp*) determinada por el reloj del lector.

5.1.3. Transpondedores RFID (*tags*)

Se emplean *tags* RFID pasivos modelo **AD/Smartrac Belt M5**. Estos tags se utilizan en logística por su respuesta en superficies dieléctricas y de cartón.

5.2. Infraestructura de *Software* y Captura

Para recolectar las lecturas en tiempo real, se utilizó un cliente *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) escrito en Python que se ejecuta en un ordenador Linux. El software empleado se basa en el desarrollo de [Mac25]. El lector Zebra FX7500 está configurado para publicar cada evento de lectura en un bróker MQTT local. Cada registro consta de cuatro campos:

1. Identificador único del tag (EPC) en formato hexadecimal.

2. RSSI de la lectura en dBm.
3. Fase de la portadora en grados dentro del intervalo $[-180^\circ, 180^\circ]$.
4. Marca de tiempo (*timestamp*) en formato UNIX con resolución de milisegundos.

Los datos recibidos se exportan a archivos *Comma-Separated Values* (CSV) para su posterior análisis.

5.3. Campaña de Mediciones y Dataset

La campaña de adquisición simuló un entorno con objetos sobre la cinta (válidos) y en las inmediaciones (espurios).

5.3.1. Simulación de tags válidos

Para emular el comportamiento de los objetos en la cinta transportadora, se desplazaron manualmente diversos tags a velocidad aproximadamente constante y simultáneamente por encima del ECD. Los pasos se realizaron a alturas de entre 0 y 15 cm respecto a la superficie de la antena, ya que a alturas superiores el lector no registraba lecturas debido al decaimiento del campo confinado. Se varió la orientación de los tags, su altura de paso y su desplazamiento lateral. En total, se registraron 118 secuencias de paso válidas, con duraciones individuales inferiores a una hora. El software empleado está disponible en [Mac25], y los datos experimentales se han publicado en el repositorio *Catalan Open Research Area* (CORA) [RT25].

5.3.2. Simulación de tags espurios

Los tags espurios se colocaron en el entorno circundante a la cinta a distintas distancias y orientaciones (tanto monoaxiales como triaxiales¹). Se configuraron escenarios estáticos y dinámicos (emulando operarios moviendo cajas adyacentes). Se realizaron capturas de hasta 12 horas para registrar el comportamiento en periodos de tiempo prolongados. En total se registraron 4 secuencias de ruido.

5.3.3. Segmentación del conjunto de datos

Tras aplicar el algoritmo de segmentación descrito en el Capítulo 4 sobre los datos crudos, se obtuvo un conjunto compuesto por:

¹La orientación monoaxial implica que el tag está alineado con un eje respecto a la polarización del campo, mientras que la configuración triaxial distribuye los tags en los tres ejes del espacio.

- **4.016 segmentos de arco válidos** (pasos sobre la cinta).
- **1.075 segmentos espurios** (detecciones fuera de la cinta).

En la fase de entrenamiento se aplicaron técnicas de balanceo para evitar sesgos en las métricas de evaluación de los clasificadores.

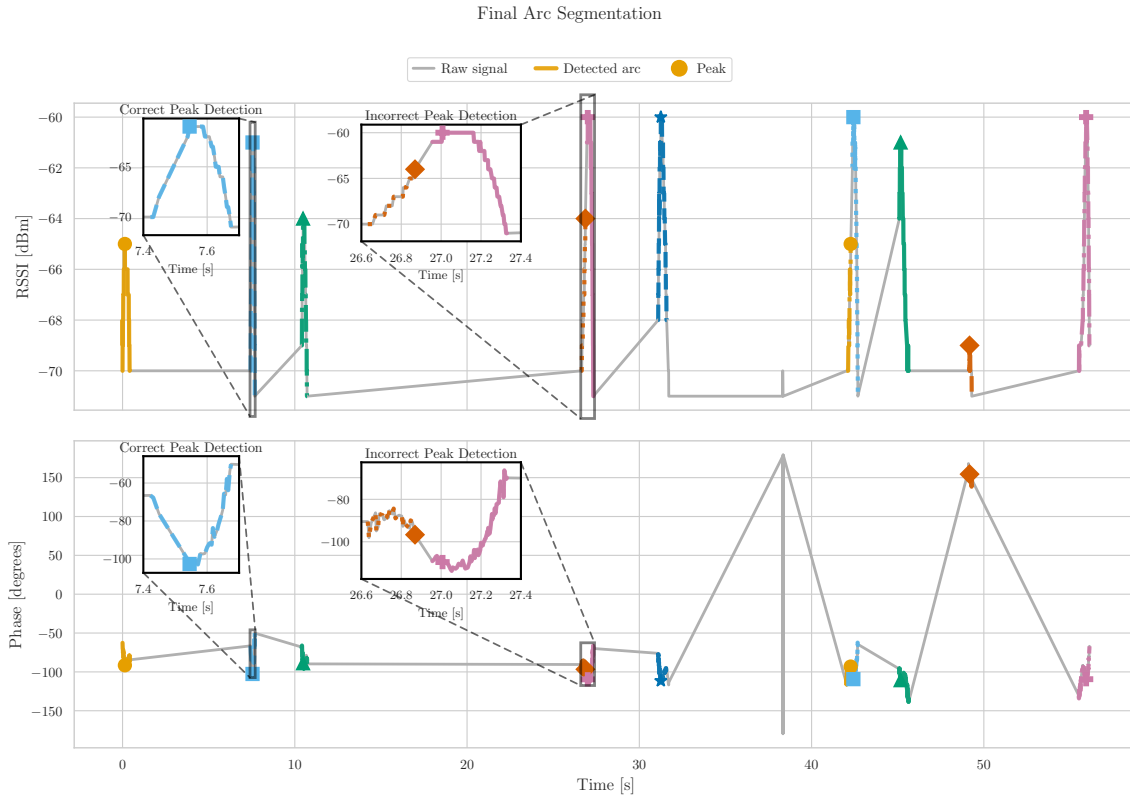


Figura 5.2: Ejemplo de la salida del algoritmo de segmentación de arcos. Se muestra una detección correcta en azul claro (marcador cuadrado en el pico de RSSI) y un caso de detección incorrecta donde la componente temporal provocó que un solo arco se dividiera en dos segmentos.

Capítulo 6

Resultados y Clasificación con Aprendizaje Automático

Este capítulo describe los resultados de clasificación para discriminar etiquetas válidas de espurias. Se detallan los clasificadores evaluados, la extracción de características, la validación cruzada y el proceso de *Recursive Feature Elimination* (RFE).

6.1. Modelos de Aprendizaje Automático Evaluados

Se evalúan tres clasificadores seleccionados por su coste computacional y capacidad de separación no lineal:

1. ***Support Vector Machine* (SVM):** Determinan un hiperplano de separación de máximo margen en un espacio de características de alta dimensionalidad. Se evalúan tres tipos de kernel utilizando la librería `scikit-learn` [Ped11]:
 - SVM Lineal: Evalúa la separabilidad lineal básica.
 - SVM *Radial Basis Function* (RBF) (Función de Base Radial): Permite una separación no lineal mediante la proyección por kernel a un espacio distinto, empleando una función Gaussiana $K(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \exp(-\gamma\|\mathbf{x} - \mathbf{x}'\|^2)$. Esta técnica proyecta los datos de entrada a un espacio de mayor dimensión donde los perfiles no lineales de *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) y fase pueden volverse linealmente separables mediante un hiperplano de decisión.
 - SVM Polinomial (de grado 5): Proyecta las características a un espacio de mayor dimensión mediante una función polinómica del tipo $K(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = (\gamma\langle\mathbf{x}, \mathbf{x}'\rangle + r)^d$ con $d = 5$. Este kernel modela combinaciones de las variables hasta dicho grado, lo cual

caracteriza la forma polinómica de los arcos de señal.

2. **Random Forest (RF)**: Algoritmo de ensamble que entrena múltiples árboles de decisión paralelos sobre subconjuntos de datos y características, combinando sus predicciones mediante votación mayoritaria [Bre01].
3. **Extreme Gradient Boosting (XGBoost)**: Método basado en el incremento de gradiente que entrena árboles de decisión de forma secuencial, minimizando el error de los anteriores de manera iterativa [Che16].

6.2. Clasificación basada en Secuencias Completas

En el primer análisis, los clasificadores se alimentan directamente de las secuencias completas de RSSI y fase normalizadas de longitud L_s , lo que conforma un vector de entrada de $2 \cdot L_s$ variables. Para evitar sesgos hacia la clase mayoritaria, se construyó un subconjunto de datos balanceado seleccionando los 1.075 segmentos de la clase espuria y una muestra aleatoria de 1.075 segmentos de la clase válida, obteniendo un conjunto de evaluación de 2.150 segmentos (50/50). Se aplicó una validación cruzada de 5 particiones. Los resultados de exactitud media se listan en la Tabla 6.1.

Cuadro 6.1: Precisión media de clasificación utilizando secuencias crudas completas ($2 \cdot L_s$ variables) sobre el conjunto balanceado.

Método	Precisión media (%)	Desviación Estándar (%)
SVM Lineal	96,88 %	0,41 %
SVM RBF	97,29 %	0,43 %
SVM Polinomial (5.º grado)	99,19 %	0,23 %
RF	99,86 %	0,13 %
XGBoost	99,96 %	0,10 %

El clasificador basado en árboles (XGBoost) supera la especificación de precisión del 99,9 %.

6.3. Extracción de Características Estadísticas

Entrenar con secuencias completas no es viable en microcontroladores de bajo coste. Se propone una reducción dimensional mediante la extracción de 12 características estadísticas y temporales (Tabla 6.2). Esta aproximación disminuye la carga computacional y mejora la capacidad de generalización frente a variaciones en la velocidad o en los parámetros de segmentación.

Al desacoplar la segmentación de la clasificación, el modelo analiza propiedades espaciales del arco.

Cuadro 6.2: Características estadísticas extraídas de las señales retrodispersadas y tiempos de segmento.

Símbolo	Característica
μ_{RSSI}	Media del RSSI
σ_{RSSI}	Desviación estándar del RSSI
min_{RSSI}	RSSI mínimo
max_{RSSI}	RSSI máximo
μ_{φ}	Media circular de la fase
σ_{φ}	Desviación estándar circular de la fase
N	Número de muestras del segmento
t_a	Duración total del arco
$\Delta\mu_t$	Media de diferencias temporales entre muestras
$\Delta\sigma_t$	Desviación estándar de diferencias temporales
$min_{\Delta,t}$	Diferencia temporal mínima
$max_{\Delta,t}$	Diferencia temporal máxima

Al re-entrenar los modelos sobre este espacio de 12 dimensiones, se obtienen las precisiones detalladas en la Tabla 6.3.

Cuadro 6.3: Precisión media de clasificación utilizando las 12 características estadísticas sobre el conjunto balanceado.

Método	Precisión media (%)	Desviación Estándar (%)
SVM Lineal	99,10 %	0,11 %
SVM RBF	99,76 %	0,05 %
SVM Polinomial (5.º grado)	99,35 %	0,22 %
RF	99,82 %	0,07 %
XGBoost	99,92 %	0,04 %

El uso de características estadísticas reduce el tamaño del espacio de entrada y mejora el desempeño de la SVM lineal en un 2,22 %, superando el umbral del 99 %. Los métodos basados en árboles mantienen un rendimiento similar, reduciendo la carga de almacenamiento y cálculo.

Aunque el conjunto de datos original está desbalanceado (79 % de segmentos válidos frente a 21 % de espurios), se aplicó un balanceo mediante una partición adecuada en la fase de entrenamiento. Para evaluar la detección de la clase espuria (el problema práctico de supresión de lecturas indeseadas), se calcularon la precisión, sensibilidad (*recall*) y puntuación F1 sobre el conjunto balanceado. Los modelos RF y XGBoost obtienen una sensibilidad y precisión superiores al 99,7 % en la clase espuria, con una tasa de falsos positivos (FPR) inferior al 0,1 %, lo que indica la separabilidad física de las señales que proporciona el confinamiento del ECD.

6.4. Simplificación del Modelo mediante Eliminación Recursiva (RFE)

Para definir el modelo ejecutable en microcontroladores con recursos limitados, se aplica el método (RFE) sobre XGBoost. El algoritmo RFE funciona de manera iterativa: se entrena el modelo con las características iniciales, se evalúa la importancia de cada una y se elimina la variable con menor contribución. Este proceso se repite de forma iterativa. La monitorización de la exactitud en cada paso permite identificar el compromiso entre el número de variables y el rendimiento de clasificación. La Tabla 6.4 muestra la evolución del rendimiento al eliminar las variables.

Cuadro 6.4: Precisión media de clasificación de XGBoost tras la eliminación recursiva de variables.

Variable Eliminada	Precisión media (%)	Desv. (%)	Red. precisión (%)
Max RSSI	99,92 %	0,04 %	0,00 %
Min time diff.	99,92 %	0,04 %	0,00 %
Total time (t_a)	99,90 %	0,06 %	0,02 %
Max time diff.	99,90 %	0,06 %	0,00 %
Num. samples (N)	99,88 %	0,07 %	0,02 %
Time diff. mean ($\Delta\mu_t$)	99,88 %	0,07 %	0,00 %
Time diff. std. dev. ($\Delta\sigma_t$)	99,88 %	0,07 %	0,00 %
Mean RSSI (μ_{RSSI})	99,88 %	0,07 %	0,00 %
RSSI std. dev. (σ_{RSSI})	99,88 %	0,07 %	0,00 %
Phase mean (μ_φ)	99,19 %	0,20 %	0,69 %
Min RSSI	98,37 %	0,16 %	0,82 %

El análisis muestra que se obtiene una exactitud del 99,88 % con 3 características (σ_φ , μ_φ y

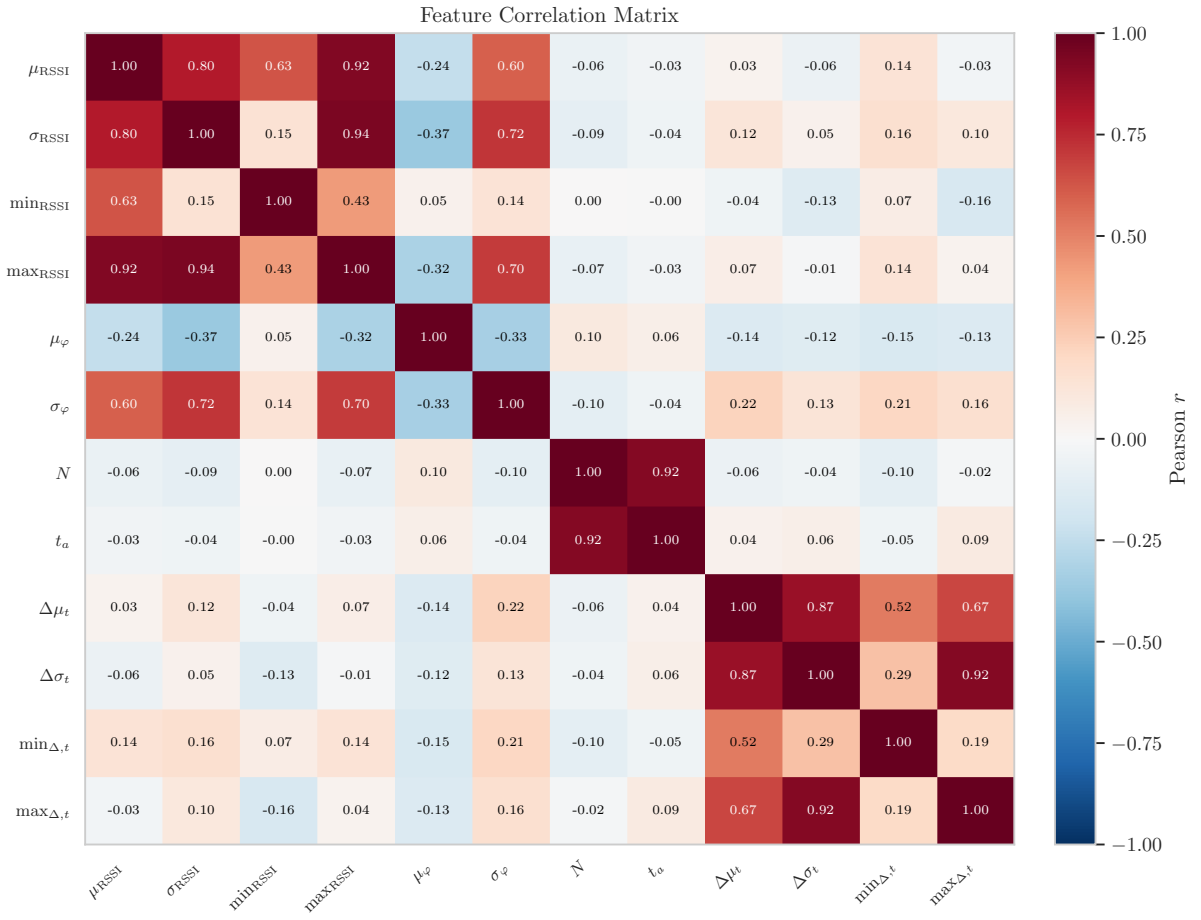


Figura 6.1: Matriz de correlación de Pearson de las 12 características seleccionadas.

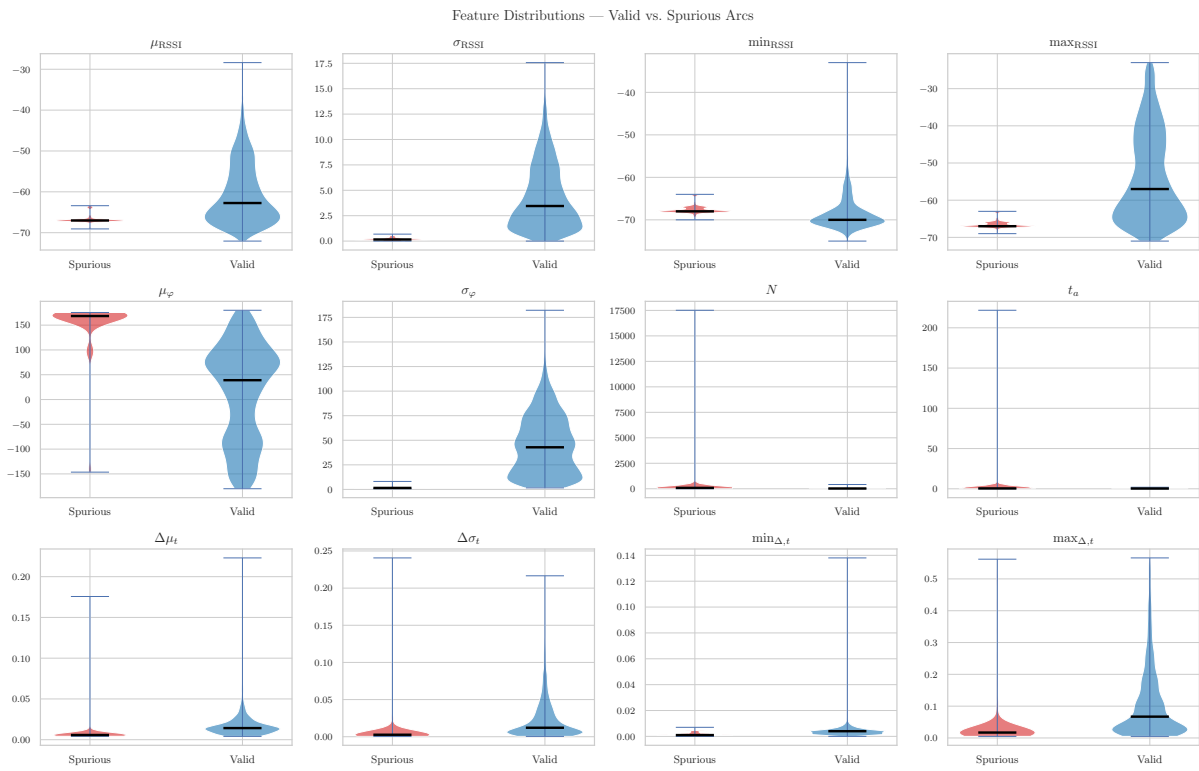


Figura 6.2: Distribuciones de características comparadas entre las clases de etiquetas válidas y espurias mediante diagramas de violín.

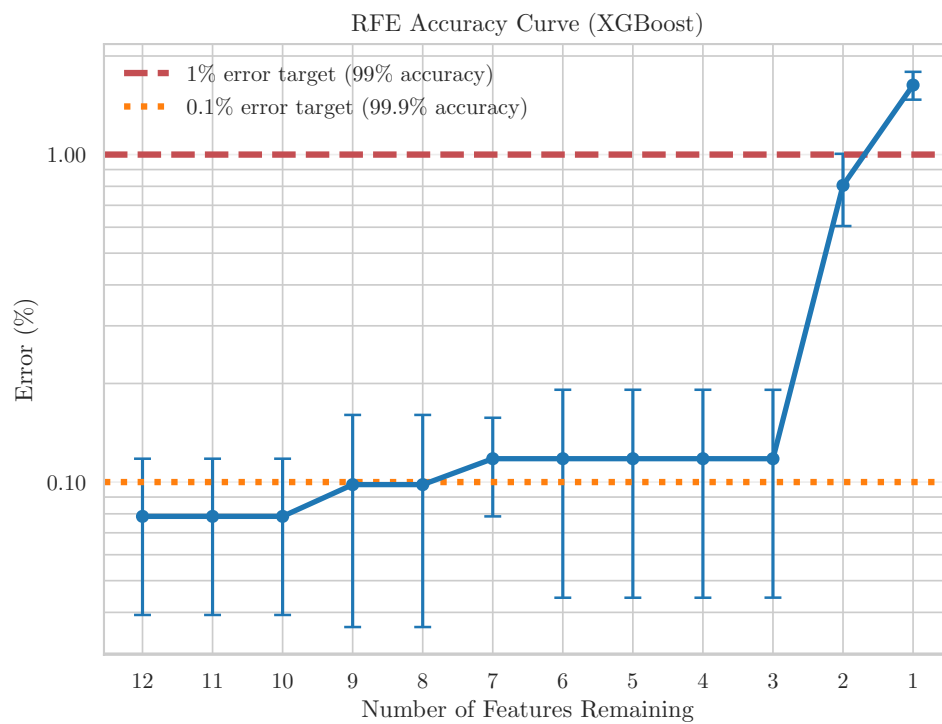


Figura 6.3: Curva de precisión (exactitud) media obtenida en el proceso de eliminación recursiva de características (*RFE*) para el modelo XGBoost, ilustrando el rendimiento obtenido en función del número de variables.

$\min_{RSSI}$). Como observamos en la Figura 6.1, hay ciertos grupos de características fuertemente correlacionadas. Las medidas temporales presentan una correlación muy alta entre ellas, lo que indica que no aporta información adicional utilizar varias estadísticas temporales en lugar de una sola. Lo mismo pasa con la longitud y tiempo total de captura, que también están fuertemente correlacionadas. El bloque de RSSI también, siendo el que menos el $\min_{RSSI}$ con respecto a las otras características del bloque. La media de fase y variación no presentan correlación, haciéndolas buenas candidatas para inferir el estado del tag.

Las distribuciones de las características se pueden observar en la Figura 6.2. Podemos observar cómo las características seleccionadas son las que presenta una mayor separabilidad entre clases. Aunque puede no ser evidente en datos como el σ_{RSSI} o μ_{RSSI} .

6.5. Clasificador de Umbral Único sobre la Fase

En caso de requerir un coste de procesamiento mínimo sin soporte para algoritmos de árboles, el análisis de RFE señala que el uso exclusivo de la desviación estándar de la fase σ_φ obtiene una exactitud del 98,41 % mediante la evaluación de un único umbral físico:

$$\text{Clasificación} = \begin{cases} \text{Válida} & \text{si } \sigma_\varphi \geq 3,06^\circ \\ \text{Espuria} & \text{si } \sigma_\varphi < 3,06^\circ \end{cases} \quad (6.1)$$

Este clasificador se sustenta en el comportamiento de la señal: cuando un tag cruza el campo del *Electromagnetic Confinement Device* (ECD), el desplazamiento genera una modulación en la fase que se traduce en una desviación estándar elevada (mediana de $\sigma_\varphi \approx 43^\circ$). En cambio, los tags espurios permanecen estáticos y sus lecturas presentan una fase estable con una desviación estándar baja (mediana de $\sigma_\varphi \approx 1,9^\circ$), quedando por debajo del umbral de $3,06^\circ$.

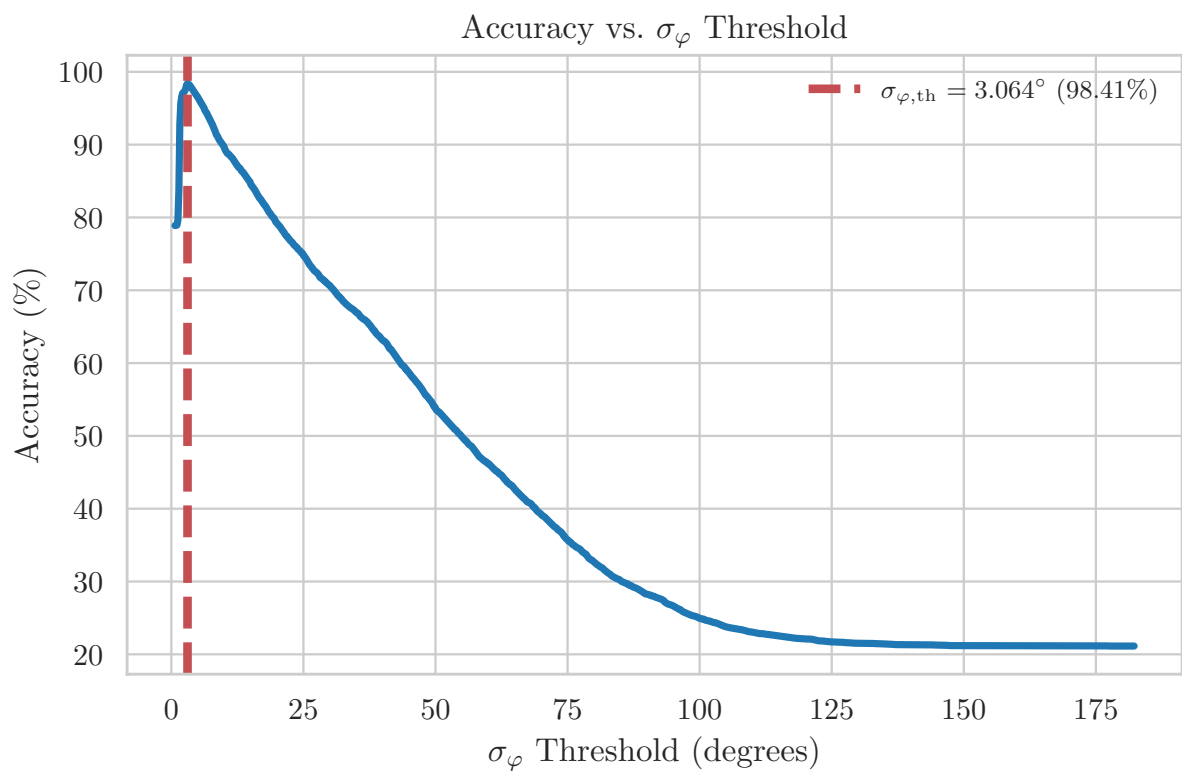


Figura 6.4: Precisión de clasificación como función del umbral de desviación estándar de la fase $\sigma_{\varphi,th}$, con el umbral óptimo de $3,06^\circ$ indicado.

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajo Futuro

Este capítulo expone las conclusiones del trabajo, las limitaciones del sistema y las líneas de investigación futuras.

7.1. Conclusiones Generales

Se ha desarrollado y validado experimentalmente un sistema de percepción híbrido hardware-software de bajo coste para identificar objetos etiquetados en movimiento sobre cintas transportadoras. Este sistema mitiga las falsas lecturas de las antenas *Radio Frequency Identification* (RFID) *Ultra High Frequency* (UHF) convencionales causadas por la radiación libre y las fugas de campo.

Las conclusiones principales son:

- **Confinamiento electromagnético:** El diseño y caracterización del dispositivo de confinamiento (*Electromagnetic Confinement Device* (ECD)) basado en tecnología *Substrate Integrated Waveguide* (SIW) confirman que la zona de lectura se restringe a un rango de entre 0 y 15 cm en dirección vertical [Jim23]. Esto elimina la necesidad de blindajes físicos metálicos o jaulas de Faraday.
- **Algoritmo de segmentación:** El algoritmo de segmentación temporal en dos fases aísla los arcos de paso de las etiquetas sin requerir información sobre la velocidad de la cinta transportadora. La optimización mediante *Differential Evolution* (DE) sintoniza los parámetros de forma automática.
- **Escenarios multi-etiqueta:** El sistema procesa y clasifica múltiples etiquetas de forma simultánea. Las pruebas con hasta 6 etiquetas concurrentes en diferentes orientaciones

confirman que el protocolo de anticolisión y el algoritmo de segmentación operan sin degradación en la densidad de muestras por arco.

- **Rendimiento de clasificación:** El vector de 12 características estadísticas obtiene una exactitud en validación cruzada del 99,92 % con *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost), superando el requisito industrial del 99,9 %. No obstante, en producción real una tasa de fallo del 0,08 % puede requerir optimizaciones adicionales debido al volumen de lecturas.
- **Clasificador simplificado:** Las técnicas de *Recursive Feature Elimination* (RFE) muestran que el uso exclusivo de la desviación estándar de la fase (σ_φ) permite definir un umbral de decisión en $3,06^\circ$ con una exactitud del 98,41 %. Esto reduce la inferencia a una única comparación aritmética, aplicable en sistemas empotrados de recursos limitados.

La comparación entre el clasificador basado en el umbral de fase ($\sigma_\varphi \geq 3,06^\circ$) y los modelos basados en árboles define dos alternativas de diseño. En aplicaciones con hardware limitado en el extremo (como microcontroladores de 8 o 16 bits), el clasificador por umbral permite tomar decisiones con una sola comparación aritmética y un error del 1,59 %. En líneas de producción que requieran minimizar los errores de lectura, la implementación de XGBoost con las 12 características explota la complementariedad entre *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) y fase para obtener una precisión superior al 99,9 %, ejecutable en tiempo real en un procesador convencional.

7.2. Limitaciones del Sistema

Se identifican las siguientes limitaciones en la evaluación del sistema:

- **Ausencia de cinta automatizada:** Las mediciones se realizaron desplazando manualmente las etiquetas a velocidad constante, sin emplear una cinta transportadora motorizada.
- **Diversidad del ruido electromagnético:** Las 1,075 muestras espurias proceden de 4 campañas de medición en el mismo laboratorio. Las reflexiones y el multitrayecto registrados están asociados a ese entorno específico. Un entorno industrial real con maquinaria y elementos metálicos móviles presentaría perfiles de interferencia diferentes.
- **Correlación temporal en la validación:** La validación cruzada de 5 particiones se aplicó sobre segmentos individuales. Dado que varios segmentos proceden de la misma sesión de medición continua, la presencia de datos correlacionados en los conjuntos de entrenamiento y prueba podría sesgar de forma optimista las métricas de rendimiento obtenidas.

7.3. Líneas de Trabajo Futuro

Se proponen las siguientes líneas de trabajo futuro:

1. **Procesamiento en tiempo real:** Implementar la segmentación y clasificación en flujo continuo a través de la infraestructura *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) existente. Esto permitirá evaluar la latencia de extremo a extremo en una instalación industrial a velocidades reales de operación, sustituyendo el procesamiento basado en archivos *Comma-Separated Values* (CSV).
2. **Efecto de la velocidad variable:** Evaluar el sistema bajo perfiles de aceleración y parada repentina para determinar la estabilidad de los umbrales estadísticos óptimos.
3. **Integración con sistemas *Manufacturing Execution System* (MES) y *Enterprise Resource Planning* (ERP):** Desarrollar la interfaz para conectar las salidas del clasificador con sistemas de gestión de almacenes (*Warehouse Management System* (WMS)) y sistemas de ejecución de manufactura (MES) o planificación de recursos (ERP).
4. **Estudio de ablación del hardware y software:** Realizar un análisis comparativo utilizando una antena direccional comercial convencional (*Commercial Off-the-Shelf* (COTS)) de campo lejano en el mismo escenario físico. La comparación del rendimiento del modelo entre la antena COTS y el ECD permitirá cuantificar por separado el impacto del dispositivo de confinamiento electromagnético y de la etapa de clasificación.
5. **Validación cruzada por grupos:** Aplicar una estrategia de validación cruzada basada en secuencias completas de origen ('GroupKFold'). Agrupar todos los segmentos de una misma sesión experimental en la misma partición asegurará que el entrenamiento y la prueba se realicen con campañas de medición independientes, mitigando el sesgo por correlación temporal.

7.3.1. Autoevaluación de Competencias y Aprendizaje

El desarrollo del Trabajo de Fin de Grado (TFG) ha requerido aplicar conceptos de electromagnetismo, radiofrecuencia, procesamiento de señal y aprendizaje automático. En la fase inicial, se requirió adquirir conocimientos específicos sobre guías de onda integradas en sustrato (SIW) y la manipulación de flujos de datos en Python.

Estas competencias se adquirieron mediante aprendizaje autónomo, consultando textos de referencia en el área, como la obra de Bishop [Bis06]. Este proceso posibilitó la programación del optimizador DE y de los clasificadores basados en árboles de decisión, facilitando la toma de decisiones técnicas y la resolución de problemas durante el diseño.

Declaración sobre el Uso de Inteligencia Artificial

De acuerdo con las directrices de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), se declara el uso de herramientas de Inteligencia Artificial Generativa en este proyecto. Específicamente, se emplearon modelos de lenguaje para la revisión gramatical del manuscrito, la traducción de los resúmenes y el soporte en la generación de código $\text{\LaTeX}$ para las figuras en TikZ.

Valoración crítica: El uso de estas herramientas facilita la redacción y la depuración de código. Sin embargo, el análisis técnico, la validación del clasificador y la veracidad de la información del documento son responsabilidad exclusiva del autor.

Bibliografía

- [Ben26] Nedal M. Benelmekki, Antoni Morell, Gerard Zamora, Jordi Bonache, Jose Lopez Vicario, “Physics-informed bayesian angle-of-arrival estimation for commercial off-the-shelf RFID with sub-degree accuracy”, *Internet of Things*, Vol. 37, pags. 101913, 2026.
- [Bis06] Christopher M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, Springer, New York, 2006.
- [Bre01] Leo Breiman, “Random forests”, *Machine Learning*, Vol. 45, n^o 1, pags. 5–32, 2001.
- [Buf15] Alice Buffi, Paolo Nepa, Fabrizio Lombardini, “A phase-based technique for localization of uhf-rfid tags moving on a conveyor belt: Performance analysis and test-case measurements”, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 15, n^o 1, pags. 387–396, 2015.
- [Cha07] Vipul Chawla, Dong Sam Ha, “An overview of passive rfid”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 45, n^o 9, pags. 11–17, 2007.
- [Che16] Tianqi Chen, Carlos Guestrin, “XGBoost: A scalable tree boosting system”, *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, KDD '16, pags. 785–794, ACM, New York, NY, USA, 2016.
- [Dua17] Chunhui Duan, Xing Rao, Lei Yang, Yunhao Liu, “Fusing rfid and computer vision for fine-grained object tracking”, *IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications*, pags. 1–9, 2017.
- [ETS20] ETSI, “Radio frequency identification equipment operating in the band 865 mhz to 868 mhz with power levels up to 2 w and in the band 915 mhz to 921 mhz with power levels up to 4 w; harmonised standard for access to radio spectrum”, 2020.
- [GM20] Rafael Granillo-Macías, Isaias Simón-Marmolejo, Isidro González-Hernández, Jorge Zuno-Silva, “TRACEABILITY IN INDUSTRY 4.0: A CASE STUDY IN THE METALMECHANICAL SECTOR”, *Acta logistica*, Vol. 7, n^o 2, pags. 95–101, 2020.
- [Gob21] Gobierno de España, “Orden etd/1449/2021, de 16 de diciembre, por la que se aprueba el cuadro nacional de atribución de frecuencias.”, 2021.
- [GS126] GS1 EPCglobal, “EPC Radio-Frequency Identity Generation-2 UHF RFID Standard”, GS1 Standard, 2026, version 3.0.1, <https://ref.gs1.org/standards/gen2/>.
- [Jaq25] Álvaro Jaque, Gerard Zamora, Jordi Bonache, “Novel electromagnetic field confinement device based on SIW technology for RFID near-field applications”, *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, Vol. 9, pags. 32–37, 2025.

- [Jim23] Alvaro-Patricio Jaque Jiménez, *Leaky Wave Antennas and Electromagnetic Field Confinement Devices based on Periodic Uniform Structures*, PhD Thesis, Universitat Autònoma de Barcelona, 2023.
- [Mac25] Elvis Diaz Machado, Nedal Martinez Benelmekki, “Rfid reader fx7500”, <https://github.com/Wireless-Information-Networking/RFID-Reader-FX7500>, 2025, version v4.0.0.
- [Med11] Carla R. Medeiros, Jorge R. Costa, Carlos A. Fernandes, “Rfid reader antennas for tag detection in self-confined volumes at uhf”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 53, n^o 2, pags. 39–50, 2011.
- [Meg22] Spyros Megalou, Aristidis Raptopoulos Chatzistefanou, Anastasios Tzitzis, Traianos V. Yioultsis, Antonis G. Dimitriou, “Passive uhf-rfid hyperbolic positioning of moving tags by exploiting neural networks”, *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, Vol. 6, pags. 402–412, 2022.
- [Ped11] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, E. Duchesnay, “Scikit-learn: Machine learning in Python”, *Journal of Machine Learning Research*, Vol. 12, pags. 2825–2830, 2011.
- [Roc11] P. Rocca, G. Oliveri, A. Massa, “Differential evolution as applied to electromagnetics”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 53, n^o 1, pags. 38–49, 2011.
- [RT25] Javier del Río Toledano, “Replication Data for: Robust RFID identification in conveyor belt systems”, CORA.Repositori de Dades de Recerca [Dataset], 2025, version V1, <https://doi.org/10.34810/DATA2768>.
- [Tri22] Paolo Tripicchio, Matteo Unetti, Salvatore D’Avella, Alice Buffi, Andrea Motroni, Fabio Bernardini, Paolo Nepa, “A synthetic aperture uhf rfid localization method by phase unwrapping and hyperbolic intersection”, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 19, n^o 2, pags. 933–945, 2022.
- [Wei05] R. Weinstein, “RFID: a technical overview and its application to the enterprise”, *IT Professional*, Vol. 7, n^o 3, pags. 27–33, 2005.