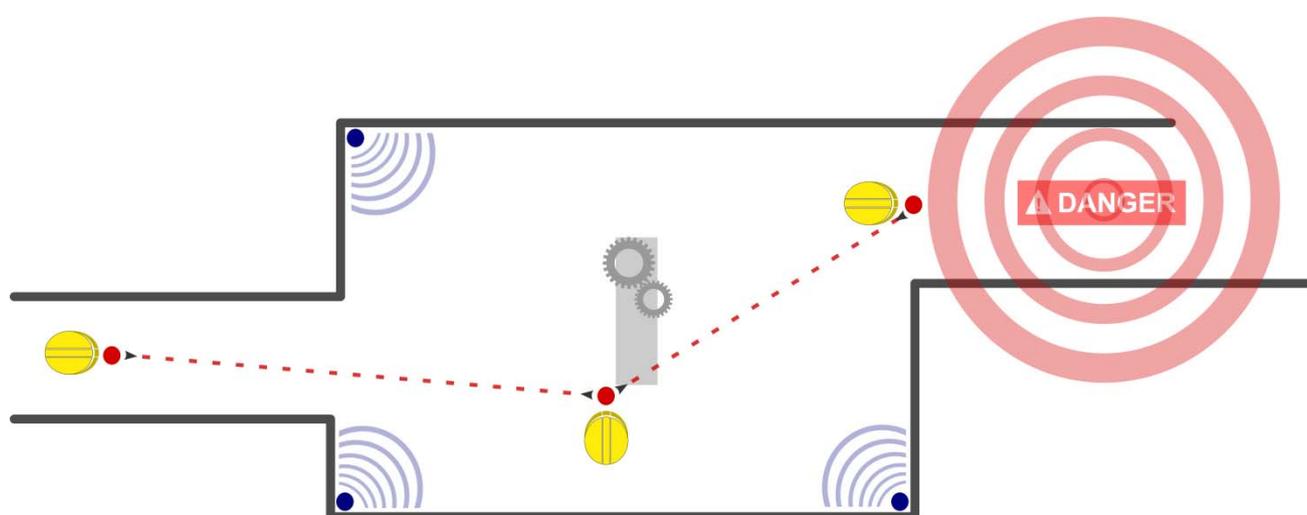


TESIS DOCTORAL

# APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE RADIOFRECUENCIA Y POSICIONAMIENTO EN LA SEGURIDAD INDUSTRIAL



*Tesis doctoral realizada por:*

Mario L. Ruz Ruiz

*Directores:*

Dr. Francisco Vázquez Serrano

Dr. Antonio Cubero Atienza

Córdoba, septiembre 2013



UNIVERSIDAD DE CORDOBA

TITULO: *APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE RADIOFRECUENCIA Y  
POSICIONAMIENTO EN LA SEGURIDAD INDUSTRIAL*

AUTOR: *MARIO L. RUZ RUIZ*

---

© Edita: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 2013  
Campus de Rabanales  
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A  
14071 Córdoba

[www.uco.es/publicaciones](http://www.uco.es/publicaciones)  
[publicaciones@uco.es](mailto:publicaciones@uco.es)

---



**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

**DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA Y ANÁLISIS NUMÉRICO**

**ÁREA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA**



**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA**

***APLICACIONES DE LOS SISTEMAS***

***DE RADIOFRECUENCIA Y POSICIONAMIENTO***

***EN LA SEGURIDAD INDUSTRIAL***

**(APPLICATIONS OF RADIO FREQUENCY AND POSITIONING SYSTEMS IN  
INDUSTRIAL SAFETY)**

**MEMORIA DE TESIS REALIZADA POR**

**MARIO L. RUZ RUIZ**

**COMO REQUISITO PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR**

**CON MENCIÓN INTERNACIONAL POR LA UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA**

**Córdoba , septiembre 2013**





**TÍTULO DE LA TESIS:**

**APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE RADIOFRECUENCIA Y  
POSICIONAMIENTO EN LA SEGURIDAD INDUSTRIAL**

**DOCTORANDO/A:** MARIO L. RUZ RUIZ

**1 INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS**

(se hará mención a la evolución y desarrollo de la tesis, así como a trabajos y publicaciones derivados de la misma).

El doctorando Mario L. Ruz ha realizado satisfactoriamente y en los plazos previstos el trabajo presentado en esta tesis doctoral. A lo largo de su investigación, el doctorando ha contribuido con diversas aportaciones de interés para la comunidad científica, en específico en el área de la seguridad industrial. En la primera parte de su tesis, los estudios llevados a cabo se han centrado en el desarrollo de dispositivos de radiofrecuencia que aporten características de seguridad innovadoras. Con este mismo fin, se ha propuesto un banco de pruebas basado en robot para el análisis de este tipo de equipos. Esta configuración constituye sin duda un enfoque novedoso, permitiendo cuantificar la robustez de dispositivos de seguridad basados en radiofrecuencia y que realizan funciones de protección en áreas de peligro.

Por otra parte, y fruto de su estancia internacional en la Universidad de Vaasa (Finlandia), Department of Computer Science, Communications and Systems Engineering Group, el doctorando se ha centrado en algoritmos de posicionamiento. A partir de este estudio, se ha desarrollado una aplicación interactiva que permite comparar y evaluar el grado de desempeño de diferentes algoritmos, considerando un conjunto de parámetros que definen la precisión alcanzable en función de las características particulares de los equipos y del entorno donde se instalan. Desde el punto de vista de la seguridad industrial, esta aportación establece una herramienta de análisis para los algoritmos de localización y su empleo en la mejora de la seguridad de los trabajadores.

El trabajo realizado por Mario L. Ruz queda reflejado en varias contribuciones relacionadas con la seguridad industrial, entre ellas una revista de alto índice de impacto, un libro, una patente y varios congresos. Se espera además una continuación en esta línea de investigación, especialmente centrada en los algoritmos de posicionamiento. Por todo ello, se autoriza la presentación de esta tesis doctoral.

Córdoba, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

Firma del/de los director/es

Fdo.: \_\_\_\_\_ Fdo.: \_\_\_\_\_



## MENCIÓN DE DOCTORADO INTERNACIONAL

Esta tesis cumple los requisitos establecidos por la Universidad de Córdoba para la obtención del Título de Doctor con Mención Internacional:

- Estancia internacional predoctoral de 3 meses y 3 días (3 julio 2012 – 5 octubre 2012) en la Universidad de Vaasa (Finlandia), Department of Computer Science, Communications and Systems Engineering Group. Supervisor: **Reino Virrankoski**.
- La tesis cuenta con el informe previo, acreditado oficialmente, de dos doctores externos con experiencia acreditada pertenecientes a alguna institución de educación superior o instituto de investigación distinto de España.
  - **Dr. Mohammed Elmusrati**. Professor and Head of Communication and System Engineering Group. University of Vaasa.
  - **Dr. Chien-Ho Ko**. Associate Professor. Department of Civil Engineering. National Pingtung University of Science and Technology.
- Un doctor perteneciente a una institución de educación superior no española forma parte del tribunal evaluador de la tesis.
  - **Dr. Pedro Arezes**. Associate Professor in the Production and Systems Department (Human Engineering Group). School of Engineering of the University of Minho.
- Parte de la tesis doctoral se ha redactado y presentado en dos idiomas, castellano e inglés.

El Doctorando

Fdo: Mario L. Ruz Ruiz



Esta tesis doctoral ha sido parcialmente subvencionada por el proyecto 105/UCO/RFID del Instituto de Seguridad e Higiene en el Trabajo y por el programa predoctoral de Formación de Personal Docente e Investigador de la Junta de Andalucía (FPDI, convocatoria publicada en el BOJA N°50 de 12 de marzo de 2008).



Repositorio de la tesis:

[www.github.com/MarioRuz](https://www.github.com/MarioRuz)

Imagen de portada realizada por María Fca. Ruz Ruiz





## Agradecimientos

Quiero agradecer a mis directores de tesis, los profesores Francisco Vázquez y Antonio Cubero, la ayuda y orientación prestada durante el desarrollo de este trabajo. También agradezco a los profesores del área de Ingeniería de Sistemas y Automática, Jorge Jiménez y Luis Manuel Fernández, la ayuda y disposición recibida en todo momento. Y cómo no, a mis compañeros de trabajo y amigos Ángel Ruiz, Juan Garrido y Sergio Fragoso, por todas las discusiones, opiniones, y puntos de vista diferentes que sin duda enriquecen los trabajos en los que colaboramos. No me olvido de mis amigos Antonio Valenzuela y Niceto R. Luque, y todas esas buenas personas que me rodean.

Agradezco a mi hermana María Fca. Ruz, a Carlos Trapero y a toda mi familia su apoyo y ayuda constante.

I would also like to thank my supervisor Reino Virrankoski for his support given during my internship in the Communications and Systems Engineering Group, from the University of Vaasa (Finland). I also want to thank my external evaluators, Professor Mohammed Elmusrati and Professor Chien-Ho Ko, for taking their time in reviewing this thesis. Besides, I am grateful to Professor Neal Patwari, for sharing his expertise in the field of node localization in sensor networks.

And last but not least, I would like to thank all the researchers I had the pleasure to meet: Caner Cuhac, Matti Tuomaala, Peilin Zhang, Ruifeng Duan, Samuel Ailen-Ubhi and Tobias Glocker from the University of Vaasa, and Huseyin Yigitler from Aalto University.

*Mario*



## ABSTRACT

This PhD thesis is primarily focused on the investigation of radio frequency systems for improving worker safety. Reducing the risks of possible accidents/incidents is a key goal. Radio frequency technology can enable new and innovative solutions where the use of other technologies is infeasible. There exists a variety of situations, especially when potentially hazardous machinery is involved, in which a worker must participate in the activation of an emergency stop, and the stop is often activated after a serious injury has occurred. Where dangerous machinery is involved, the likelihood of accident is greatly reduced by systems that can automatically detect the entry of workers or body parts into critical areas. In the same way, accurately estimating the position of workers can be extremely useful. The implementation of a localization system in underground operations or other industrial environments can minimize certain risks and reduce the rescue time in case of accident. The study of radio-based devices, wireless sensor networks (WSNs) and cooperative localization algorithms can help to improve the safety levels in the aforementioned situations.

To this end, this thesis makes three main contributions. Firstly, an RFID (Radio Frequency Identification) prototype providing industrial security features is developed. The main objective of the prototype is to prevent or reduce accidents by sending a stop signal to a machine when a worker's wrist, bearing an RFID tag, gets too close to the dangerous area. A methodology for the design and tuning of inductive coupling antennas is also described, considering their embedding in machinery. Secondly, a robotic experimental setup is proposed to test the performance of safety devices based on radio frequency technology. The setup specifically tests devices designed for improving safety in dangerous areas of small size, such as those surrounding power press brakes. As an example, the RFID prototype is tested. Furthermore, a matrix approach is proposed for analyzing the robustness of safety devices that are designed to automatically prevent a worker entering in dangerous areas. This approach allows distinguishing different entry point within a dangerous area, allowing for the collection of independent statistics for each entry point. Finally, an interactive application, named `wsnLocalize`, has been designed for the simulation and evaluation of cooperative localization algorithms. The tool is intended to compare and evaluate such methods,

providing researchers and designers a fast way to measure the performance of different localization algorithms under specific settings.

The results presented in the thesis describe the potential benefits that WSNs and safety devices based on radio frequency technology can confer for improved worker safety.

## RESUMEN

Esta tesis doctoral se centra en el estudio de los sistemas de radiofrecuencia y su aplicación en la prevención y limitación de riesgos para los trabajadores. En el ámbito industrial, es bien conocida la problemática de los accidentes laborales, y reducir su probabilidad o minimizar sus consecuencias es un aspecto clave. La radiofrecuencia puede aportar soluciones donde el uso de otras tecnologías no es factible. Existen limitaciones en los actuales sistemas de seguridad que hacen que, para ciertas situaciones con maquinaria peligrosa involucrada, no se pueda producir una alarma o paro automático cuando se presenta una situación de riesgo para el operario, teniendo éste que intervenir para realizar la parada de emergencia, y en ocasiones cuando una lesión grave se ha producido. En trabajos con maquinaria, la detección automática de un operario o una parte de su cuerpo en zonas de peligro reduce indudablemente la posibilidad de accidente, por ejemplo mediante la activación de alarmas o un paro de emergencia. Del mismo modo, el conocimiento de la posición de los trabajadores puede ser extremadamente útil. La implementación de un sistema de localización en espacios cerrados u otro tipo de entornos industriales puede minimizar ciertos riesgos y reducir el tiempo de rescate en caso de accidente. El estudio de dispositivos basados en radio, las redes de sensores inalámbricos (WSNs) y los algoritmos de localización cooperativa pueden contribuir a mejorar los niveles de seguridad en situaciones similares a las mencionadas.

La seguridad del trabajador se debe garantizar tanto como sea posible. En base a esta finalidad, en esta tesis se realizan principalmente tres contribuciones. En la primera, se desarrolla un prototipo basado en identificación por radiofrecuencia (RFID) cuyo principal objetivo es el de aportar capacidades de seguridad en aquellas situaciones donde dispositivos estándares no son aplicables o prácticos. Dicho prototipo se ha diseñado para producir un paro de emergencia ante la detección de una situación de riesgo, como la introducción de la mano de un operario en una zona de peligro. Se establece también una metodología para el diseño, sintonización y acople en maquinaria de antenas de acoplamiento inductivo. En la segunda contribución se diseña una configuración basada en robot para caracterizar dispositivos de seguridad basados en radiofrecuencia, diseñados para mejorar la seguridad en zonas de peligro de un tamaño relativamente pequeño, como puede ser la de una prensa hidráulica. Se evalúa el

prototipo RFID y se propone un enfoque matricial para el estudio de áreas de peligro. Esta estrategia permite distinguir diferentes puntos de entrada en la zona de peligro y obtener parámetros estadísticos para cada punto de entrada de forma independiente. Por último, se ha desarrollado una aplicación interactiva, wsnLocalize, diseñada para la simulación y evaluación de algoritmos de localización cooperativa. Con wsnLocalize se pretende proporcionar una herramienta de diseño que permita a los investigadores cuantificar el grado de desempeño de sus algoritmos bajo diferentes configuraciones de red.

Los resultados presentados en esta tesis pretenden describir los beneficios potenciales que las redes de sensores y los dispositivos de seguridad basados en radiofrecuencia pueden aportar en la mejora de la seguridad industrial.

---

## Índice de contenidos

---

<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>XIX</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>XXII</b>
<b>ABREVIATURAS.....</b>	<b>XXIII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS Y OPERACIONES.....</b>	<b>XXV</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1    MOTIVACIÓN .....	1
1.2    OBJETIVOS Y PRINCIPALES CONTRIBUCIONES .....	2
1.3    PUBLICACIONES .....	3
1.3.1 <i>Otras contribuciones relacionadas con la tesis</i> .....	4
1.4    ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	5
<b>CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE UN PROTOTIPO RFID CON FUNCIONES DE SEGURIDAD INDUSTRIAL .....</b>	<b>7</b>
2.1    INTRODUCCIÓN .....	7
2.2    PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LA TECNOLOGÍA RFID....	8
2.2.1 <i>La comunicación</i> .....	11
2.2.1.1    Modos de comunicación .....	11
2.2.1.2    Tipos de acoplamiento .....	12
2.3    COMPONENTES DE UN SISTEMA RFID.....	15

2.3.1	<i>La etiqueta (transponder)</i> .....	15
2.3.1.1	Tipos de etiquetas.....	15
2.3.1.2	Principales características de una etiqueta .....	18
2.3.2	<i>El lector</i> .....	21
2.4	LECTOR RFID RI-K2A-001A.....	25
2.4.1	<i>Justificación de su elección</i> .....	25
2.4.1.1	Principales características del lector RFID.....	27
2.5	DISEÑO DE ANTENAS DE ACOPLAMIENTO INDUCTIVO .....	32
2.5.1	<i>La antena del lector RFID</i> .....	32
2.5.1.1	Requisitos específicos de la antena del lector RFID .....	37
2.5.2	<i>Patrón de lectura de la antena</i> .....	39
2.5.3	<i>Metodología de diseño</i> .....	41
2.5.3.1	Ajuste al punto de resonancia.....	45
2.5.3.2	Cercanía de metales y proceso de sintonía .....	46
2.5.3.3	Guía de diseño de antenas de acoplamiento inductivo .....	50
2.6	INTERFAZ DE CONTROL CON EL LECTOR RFID .....	52
2.6.1	<i>Elección del microcontrolador</i> .....	53
2.6.2	<i>Desarrollo de la placa de circuito impreso</i> .....	54
2.6.2.1	PCB y programa para el microcontrolador.....	57
2.7	PROTOTIPO RFID .....	61
2.8	CONCLUSIONES .....	63

**CAPÍTULO 3: BANCO DE ENSAYOS BASADO EN ROBOT PARA  
DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD INDUSTRIAL..... 65**

3.1	INTRODUCCIÓN .....	66
3.2	ANTECEDENTES.....	68
3.2.1	<i>Métodos de protección estándar para el punto de operación</i> .....	69

3.2.2	<i>La tecnología de radiofrecuencia en la seguridad industrial</i> .....	74
3.2.2.1	El significado general del término RFID .....	75
3.2.2.2	Estrategias basadas en radio para posicionamiento .....	77
3.3	DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE ENSAYOS .....	80
3.4	PROTOTIPO RFID Y CONEXIONADO CON EL BANCO DE ENSAYOS .....	85
3.5	DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS.....	86
3.5.1	<i>Enfoque matricial</i> .....	88
3.6	RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	90
3.6.1	<i>Análisis de los resultados</i> .....	94
3.7	CONCLUSIONES .....	96
<b>CAPÍTULO 4: LOCALIZACIÓN COOPERATIVA .....</b>		<b>99</b>
4.1	INTRODUCCIÓN A LA LOCALIZACIÓN COOPERATIVA.....	102
4.1.1	<i>Aplicaciones de interés basadas en localización</i> .....	104
4.2	DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA .....	106
4.2.1	<i>Caracterización de las magnitudes para la tarea de localización ...</i>	107
4.2.1.1	RSSI.....	108
4.2.1.2	TOA .....	110
4.2.1.3	AOA y aspectos generales de las medidas.....	112
4.2.2	<i>Cota inferior de Cramér-Rao</i> .....	113
4.3	LOCALIZACIÓN COOPERATIVA BASADA EN MDS .....	118
4.3.1	<i>Introducción a los algoritmos MDS</i> .....	118
4.3.2	<i>Conceptos básicos de MDS aplicado a la localización</i> .....	120
4.3.3	<i>Etapas de los algoritmos de localización basados en MDS</i> .....	122
4.3.3.1	Estimación de la matriz de distancias $D$ .....	125

4.3.3.2	Propuestas para la distribución del cálculo y mejora de la estimación de las posiciones de nodos .....	127
4.4	DESARROLLO DE UN SIMULADOR: WSNLOCALIZE.....	130
4.4.1	<i>Introducción</i> .....	130
4.4.2	<i>Justificación</i> .....	131
4.4.3	<i>Descripción de wsnLocalize</i> .....	133
4.5	EJEMPLOS DE SIMULACIÓN .....	138
4.5.1	<i>Distribución en forma de grid</i> .....	139
4.5.1.1	Resultados .....	142
4.5.1.2	Interpretación de los resultados .....	143
4.5.2	<i>Distribución de nodos aleatoria</i> .....	147
4.5.2.1	Resultados .....	147
4.5.2.2	Interpretación de los resultados.....	148
4.5.3	<i>Especificaciones particulares de los nodos</i> .....	151
4.5.3.1	Resultados .....	152
4.5.3.2	Interpretación de los resultados.....	154
4.6	CONCLUSIONES .....	155
<b>CHAPTER 5: CONCLUSIONS AND FUTURE WORK .....</b>		<b>159</b>
5.1	CONCLUSIONS.....	159
5.2	FUTURE WORK.....	162
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>165</b>
<b>APÉNDICE I: NORMATIVA RELACIONADA .....</b>		<b>173</b>
<b>APÉNDICE II: INFORMES ESTADÍSTICOS .....</b>		<b>193</b>

## Índice de figuras

FIGURA 2.1. ESQUEMA GENERAL DE UNA POSIBLE APLICACIÓN RFID (modificada de Manis & Sharam, 2005) .....	9
FIGURA 2.2. ELEMENTOS PRINCIPALES DE UN SISTEMA RFID (modificada de Manis & Sharam, 2005).....	10
FIGURA 2.3. COMPONENTES TÍPICOS DE UNA ETIQUETA QUE UTILIZA <i>BACKSCATTER</i> (Glover & Bhatt, 2006) .....	13
FIGURA 2.4. ACOPLAMIENTO INDUCTIVO.....	14
FIGURA 2.5. ESQUEMA DE UNA ETIQUETA SAW (modificada de Bhatt and Glover, 2006).....	16
FIGURA 2.6. EJEMPLOS DE LECTORES RFID (Manis & Sharam, 2005) .....	21
FIGURA 2.7. ZONA DE LECTURA Y ENTRADA DE PALÉS (Manis & Sharam, 2005).....	24
FIGURA 2.8. MÓDULO DE CONTROL RI-CTL-MB2A (Texas Instruments, 2002b).....	27
FIGURA 2.9. ALIMENTACIÓN UTILIZADA CON EL EQUIPO RFID (Texas Instruments, 2002b).....	28
FIGURA 2.10. CONEXIONADO SERIE MEDIANTE EL CONECTOR ST21 DEL LECTOR (Texas Instruments, 2002b) .....	30
FIGURA 2.11. LÍNEAS DE CAMPO MAGNÉTICO GENERADAS .....	33
FIGURA 2.12. INDUCCIÓN DE TENSIÓN EN LA ETIQUETA (modificada de Microchip Technology, 2003) ....	34
FIGURA 2.13. POSIBLES GEOMETRÍAS DE ANTENAS DE ACOPLAMIENTO INDUCTIVO (creada a partir de Microchip Technology, 2003).....	36
FIGURA 2.14. INFLUENCIA DE UN ELEVADO Q EN LA TRANSMISIÓN DE ENERGÍA .....	38
FIGURA 2.15. PATRÓN DE LECTURA SEGÚN LA ANTENA Y LA ORIENTACIÓN DE LA ETIQUETA (Texas Instruments, 2002e).....	39
FIGURA 2.16. SOLAPE DE PATRONES DE LECTURA (modificada de Texas Instruments, 2002c).....	40
FIGURA 2.17. ETIQUETAS COMPATIBLES CON EL EQUIPO RFID UTILIZADO.....	41

FIGURA 2.18. VALOR DE LA INDUCTANCIA DE UNA ANTENA RECTANGULAR EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE VUELTAS.....	43
FIGURA 2.19. ANTENA Y MEDIDOR DE INDUCTANCIA .....	43
FIGURA 2.20. COLA DE LA ANTENA QUE CONECTA CON EL LECTOR RFID (Texas Instruments, 2002d) .....	45
FIGURA 2.21. MÉTODO DE AJUSTE AL PUNTO DE RESONANCIA .....	46
FIGURA 2.22. ANTENA Y CHAPA DE METAL EMPLEADAS .....	47
FIGURA 2.23. PLACA PERFORADA DE CONDENSADORES PARA SINTONÍA DE LA ANTENA .....	49
FIGURA 2.24. FASES PARA EL DISEÑO E INSTALACIÓN DE ANTENAS DE ACOPLAMIENTO INDUCTIVO .....	51
FIGURA 2.25. PROTOTIPO DE ANTENA ACOPLADA Y MUÑEQUERA CON ETIQUETA RFID .....	52
FIGURA 2.26. CIRCUITO SIMULADO EN PROTEUS.....	54
FIGURA 2.27. CONTROL DE UN RELÉ A PARTIR DE LA SALIDA DE UN MICROCONTROLADOR .....	55
FIGURA 2.28. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA A LA SALIDA DEL MICROCONTROLADOR.....	56
FIGURA 2.29.PLACA DE CIRCUITO IMPRESO.....	57
FIGURA 2.30. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA DE COMUNICACIÓN .....	60
FIGURA 2.31. ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA .....	61
FIGURA 2.32. PROTOTIPO RFID .....	62
FIGURA 3.1. POSIBLES APLICACIONES DE SISTEMAS BASADOS EN RADIOFRECUENCIA EN ENTORNOS INDUSTRIALES .....	75
FIGURA 3.2. PRINCIPALES COMPONENTES DEL BANCO DE ENSAYOS .....	82
FIGURA 3.3. DISTANCIA ENTRE LAS ETIQUETAS RFID Y EL EXTREMO DE LA MANO .....	84
FIGURA 3.4. BANCO DE ENSAYOS EN EL LABORATORIO DE AUTOMÁTICA.....	87
FIGURA 3.5. CORRESPONDENCIA ENTRE LOS PUNTOS DE ENTRADA Y LA REPRESENTACIÓN MATRICIAL.....	89
FIGURA 3.6. MEDIAS Y DESVIACIONES TÍPICAS PARA CADA PUNTO DE ENTRADA .....	91
FIGURA 3.7. EXPERIMENTOS MÁS SIGNIFICATIVOS (DATOS EN mm).....	92
FIGURA 3.8. DISTRIBUCIONES DE LAS DISTANCIAS DE DETECCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS 1,5 Y 6.....	93
FIGURA 4.1. ESQUEMA GENERAL DE UNA WSN REPRESENTADA MEDIANTE UN GRAFO.....	104
FIGURA 4.2. ETAPAS BÁSICAS EN ALGORITMOS DE LOCALIZACIÓN COOPERATIVA .....	129
FIGURA 4.3. VENTANA PRINCIPAL DE WSNLOCALIZE .....	134
FIGURA 4.4. (a) POSICIONES REALES DE LOS NODOS (●) Y ERROR RESPECTO A LAS POSICIONES ESTIMADAS (—). $R = 1.5r$ . (b) POSICIONES VERDADERAS DE LOS NODOS Y GRAFO ASOCIADO A LA WSN.....	141

FIGURA 4.5. MAPA RELATIVO OBTENIDO CON MDS-MAP(C), $R = 1.5r$ .....	141
FIGURA 4.6. ERROR MEDIO SEGÚN LA CONECTIVIDAD MEDIA DE LA WSN Y EL ALGORITMO EMPLEADO, $e_r = 5\%$ , $m = 3$ .....	146
FIGURA 4.7. ERROR MEDIO EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE NODOS <i>ANCHOR</i> .....	146
FIGURA 4.8. 200 NODOS DISTRIBUIDOS DE FORMA ALEATORIA. (a) POSICIONES REALES DE LOS NODOS (○) Y ERROR RESPECTO A LAS POSICIONES ESTIMADAS (—), (b) POSICIONES VERDADERAS DE LOS NODOS Y GRAFO ASOCIADO A LA WSN. $R = 1.5r$ .....	147
FIGURA 4.9. EVOLUCIÓN DEL ERROR MEDIO CON EL AUMENTO DE RUIDO EN LAS DISTANCIAS DE ENTRADA .....	148
FIGURA 4.10. GRID DE 25 NODOS <i>ANCHOR</i> , 7 NODOS A LOCALIZAR. (a) POSICIONAMIENTO FINAL EN ALGUNA DE LAS ITERACIONES, (b) POSICIÓN INICIAL DE LA WSN. ....	152
FIGURA 4.11. ELIPSES DE INCERTIDUMBRE ( $1 - \sigma$ ), CALCULADAS POR SIMULACIÓN (---) Y LÍMITE CRLB-TOA (---). $R = 1.5\text{ m}$ , $std(TOA) = 0.5\text{ m}$ .....	154
FIGURA I.1. ESQUEMA DE APLICACIÓN DE EPES UTILIZANDO AOPDS EN UNA PRESA HIDRÁULICA (IMAGEN ADAPTADA DE LA NORMA UNE-EN-693) .....	191

# Índice de tablas

TABLA 2.1. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE UNA ETIQUETA RFID (Finkenzeller, 2003) .....	20
TABLA 2.2. BANDAS DE FRECUENCIA RFID Y APLICACIONES TÍPICAS (Manis & Sharam, 2005) .....	23
TABLA 2.3. MODOS DEL LECTOR RFID (modificada de Texas Instruments, 2002b) .....	29
TABLA 2.4. PRINCIPALES COMANDOS ASCII(Texas Instruments, 2000) .....	31
TABLA 2.5. VALORES DE LOS CONDENSADORES EN FUNCIÓN DE LA INDUCTANCIA DE LA ANTENA (Texas Instruments, 2002f) .....	48
TABLA 3.1. MÉTODOS BÁSICOS DE PROTECCIÓN EN EL PUNTO DE OPERACIÓN DE MAQUINARIA .....	72
TABLA 3.2. NORMAS UNE RELACIONADAS CON LOS REQUISITOS ESENCIALES DE SEGURIDAD EN MAQUINARIA .....	73
TABLA 3.3. RESUMEN DE LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS .....	91
TABLA 3.4. VALORES SIGNIFICATIVOS DE CADA EXPERIMENTO (en mm) .....	93
TABLA 4.1. EXPRESIONES PARA EL CÁLCULO DEL CRLB (Patwari, 2005) .....	117
TABLA 4.2. ALGORITMO MDS-MAP .....	125
TABLA 4.3. PRINCIPALES ELEMENTOS INTERACTIVOS DE WSNLOCALIZE .....	136
TABLA 4.4. DATOS ESTADÍSTICOS. WSN 100 NODOS DISTRIBUIDOS EN GRID $10r \cdot 10r$ , $e_p = 10\%$ , 3 NODOS ANCHOR .....	143
TABLA 4.5. DATOS ESTADÍSTICOS OBTENIDOS CON DIFERENTES NIVELES DE RUIDO. MDS-MAP(D). .....	149
TABLA 4.6. COMPARACIÓN CASO UNIFORME Y NO UNIFORME. MDS-MAP(D) .....	152

# Abreviaturas

<b>AC</b>	Alternating Current
<b>ANSI</b>	American National Standards Institute
<b>AOPD</b>	Active Optoelectronic Protective Device
<b>ARAP</b>	As-Rigid-As-Possible
<b>ASCII</b>	American Standard Code for Information Interchange
<b>ASK</b>	Amplitude Shift Keying
<b>CR</b>	Carrier Return
<b>CRLB</b>	Cramér-Rao Bound
<b>DC</b>	Direct Current
<b>EAS</b>	Electronic Article Surveillance
<b>EMF</b>	Electromotive Force
<b>EPC</b>	Electronic Product Code
<b>EPES</b>	Equipo de Protección Electrosensible
<b>FDX</b>	Full Duplex
<b>FIM</b>	Fisher Information Matrix
<b>FMCW</b>	Frequency Modulated Continuous Wave
<b>FSK</b>	Frequency Shift Keying
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>HDX</b>	Half Duplex
<b>HF</b>	High Frequency
<b>HVAC</b>	Heating Ventilation and Air Conditioning systems
<b>ICSP</b>	In-Circuit Serial Programming
<b>LF</b>	Line Feed
<b>LOS</b>	Line of Sight
<b>LPS</b>	Local Positioning Systems
<b>MDS</b>	Multi-Dimensional Scaling
<b>NLOS</b>	Non Line of Sight

<b>NIOSH</b>	National Institute for Occupational Safety and Health
<b>OSHA</b>	Occupational Safety and Health Administration
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board
<b>PSK</b>	Phase Shift Keying
<b>RFID</b>	Radio Frequency Identification
<b>ROC</b>	Receiver Operating Characteristic
<b>RSSI</b>	Received Signal Strength Indication
<b>RTI</b>	Radio Tomographic Imaging
<b>RTS</b>	Robotic Total Station
<b>RTT</b>	Round Trip Time
<b>RW</b>	Read-Write
<b>SAW</b>	Surface Acoustic Wave Tags
<b>SEQ</b>	SEquential system
<b>SIS</b>	Safety Instrumented Systems
<b>SMACOF</b>	Scaling by MAjorizing a COmplicated Function
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>TOA</b>	Time Of Arrival
<b>TDOA</b>	Time Difference of Arrival
<b>ToF</b>	Time of Flight
<b>TTL</b>	Transistor-Transistor Logic
<b>UHF</b>	Ultra High Frequency
<b>USART</b>	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
<b>UWB</b>	Ultra-Wide Band
<b>WORM</b>	Write Once-Read Memory
<b>WSNs</b>	Wireless Sensor Networks

## Lista de símbolos y operaciones

$\tilde{d}_{i,j}$	Distancia medida o inferida entre dos nodos $i, j$
$d_{i,j}$	Distancia real entre dos nodos $i, j$
$\hat{d}_{i,j}$	Distancias inferidas a partir de las distancias medidas $\tilde{d}_{i,j}$
$\tilde{D}$	Matriz de distancias estimadas
$D$	Matriz de distancias exactas (desconocida)
$e_r$	Error gaussiano agregado a una distancia, expresado en tanto por ciento de la desviación estándar de la curva normal estándar.
$E$	Conjunto que definen las aristas asociadas al grafo $G$ y que definen la comunicación entre pares de nodos
$F_\theta$	Matriz de información de Fisher (FIM)
$G$	Grafo asociado a una red de sensores
$H(i)$	Conjunto de sensores que pueden comunicarse directamente con el sensor $i$
$R$	Rango expresado en unidades de longitud
$m$	Nodos cuyas coordenadas absolutas son conocidas (nodos de referencia o <i>anchor</i> )
$n$	Nodos cuyas coordenadas son desconocidas y se pretenden estimar ( <i>blind nodes</i> )
$N$	Número total de nodos en una red, $N = n + m$
$n_p$	Exponente asociado a la pérdida de la potencia de la señal
$\{X_{i,j}\}$	Conjunto de medidas entre los pares de nodos $i$ y $j$
$p_i$	Probabilidad de fallo del nodo $i$
$p_{i,j}$	Proximidad o similitud entre dos objetos $i, j$ . En esta tesis $p_{i,j}$ representa la distancia medida o inferida
$P_{i,j}$	Potencia recibida de un nodo $i$ transmitida por un nodo $j$
$P_0$	Potencia recibida (dBm) a una distancia de referencia $d_0$
$\bar{P}(d)$	Potencia media recibida a una distancia $d$
$R$	Rango o alcance de un nodo
$V$	Conjunto de vértices asociados a un grafo $G$ , y que definen los nodos

$\mathbf{X}$	En la definición del CRLB (apartado 4.2.2) $\mathbf{X}$ es una matriz, donde cada elemento representa $\{X_{i,j}\}$ . En la definición de algoritmos basados en MDS $\mathbf{X}$ es una matriz de $N \cdot 2$ con las coordenadas reales de los nodos de la WSN.
$\tilde{x}_i$	Posición absoluta estimada del nodo $i$
$\theta$	Vector de parámetros a estimar. En el caso bidimensional $\theta = [\theta_x, \theta_y]$
$\hat{\theta}$	Estimación del parámetro $\theta$ (o conjunto de estimaciones si $\theta$ es un vector)
$\sigma_{dB}$	Desviación estándar de la medidas del tipo RSSI
$\sigma_T$	Desviación estándar para medidas del tipo TOA
$\sigma_\alpha$	Desviación estándar para medidas del tipo AOA
$\ \cdot\ _F$	Distancia de Frobenius
$\hat{\tau}_{TOA}$	Tiempo de llegada estimado de una señal

---

# Capítulo 1: Introducción

---

## 1.1 MOTIVACIÓN

En el ámbito industrial, es bien conocida la problemática de los accidentes laborales, y reducir su probabilidad o minimizar sus consecuencias es un aspecto clave. El uso de la radiofrecuencia puede aportar soluciones donde el uso de otras tecnologías no es factible. Existen limitaciones en los actuales sistemas de seguridad que hacen que, para ciertas situaciones, no se pueda producir, o al menos no a tiempo, una alarma o paro automático cuando se presenta una situación de riesgo para el operario. Un ejemplo representativo son aquellos casos en los que el operario necesita manejar piezas que sobresalen de la zona de operación y requieren un posicionamiento específico en la máquina. En esta casuística el área de trabajo está constantemente cortada por la pieza, y es posible que no puedan aplicarse dispositivos automáticos de seguridad tradicionales, como las células fotoeléctricas. La solución que queda para resolver este problema consiste en *discriminar* si el objeto que se encuentra dentro de la zona riesgo es la pieza o una parte del cuerpo del operario. De la misma manera, este problema también es extensible a zonas o áreas de gran extensión que no pueden resguardarse mediante métodos estándar, como por ejemplo mediante el uso de barreras físicas, y en todo caso, aporta versatilidad a la protección permanente del operario. Para esta casuística, las redes de sensores inalámbricos (WSNs) y los algoritmos de localización

pueden aportar nuevas capacidades para una mejora de la seguridad industrial. Algunos ejemplos de aplicación incluyen operaciones de búsqueda y rescate o seguimiento de objetos y personas. En el contexto de la seguridad industrial, el disparo automático de alarmas o el paro de emergencia de maquinaria cuando se detecta la intrusión de personal laboral en zonas de peligro podría alcanzarse estimando con suficiente precisión la posición de los trabajadores. En caso de accidente, la localización de los operarios en espacios cerrados o galerías, como por ejemplo aquellas desarrolladas en la industria minera, puede aportar información de relevancia. Éstas y otras aplicaciones innovadoras podrían desarrollarse mediante el uso de WSNs y los algoritmos de localización cooperativa.

Dicho esto, cabe preguntarse: ¿qué nuevas características pueden aportar los sistemas basados en radiofrecuencia en el campo de la seguridad industrial? y ¿qué metodología podría aplicarse para evaluar su desempeño en una aplicación específica?

## **1.2 OBJETIVOS Y PRINCIPALES CONTRIBUCIONES**

El objetivo principal de esta tesis consiste en intentar dar respuesta a las dos cuestiones planteadas en el apartado anterior, es decir, estudiar métodos innovadores de aplicación de la tecnología basada en radiofrecuencia, y las redes de sensores, como sistemas de seguridad. Los objetivos técnicos que se propusieron fueron los siguientes:

- Estudio del estado actual del conocimiento de dispositivos basados en radiofrecuencia, resaltando las características innovadoras que podrían aportar en el campo de la seguridad industrial respecto a dispositivos de seguridad tradicionales.
- Elaboración de un primer prototipo basado en la tecnología de radiofrecuencia cuyo objetivo principal sea el de reducir la probabilidad de accidente en aquellas situaciones en las que el operario trabaja cerca de una zona peligrosa.
- Desarrollo de un método de validación que permita evaluar el grado de desempeño de dispositivos basados en radiofrecuencia similares al prototipo desarrollado.
- Estudio de algoritmos de localización cooperativa y su aplicación a la seguridad industrial. Estudio del estado del conocimiento relacionado con las redes de sensores inalámbricos y su aplicación a la automatización industrial, con

especial atención a tareas relacionadas con la seguridad industrial y posicionamiento.

### 1.3 PUBLICACIONES

Las contribuciones científicas a las que ha dado lugar esta tesis doctoral son las siguientes:

a) Artículos en revistas:

- M. L. Ruz, F. Vázquez, L. Salas-Morera, and A. Cubero-Atienza. Robotic testing of radio frequency devices designed for industrial safety, *Safety Science*, 50 (7), 2012, 1606-1617, ISSN: 0925-7535.
- M. L. Ruz and F. Vázquez. An RFID prototype providing industrial security features in the manufacturing environment, *International Journal of Internet Protocol Technology*, 4 (4), 2009, 240-246, ISSN: 1743-8209 (Print), 1743-8217 (Online).

b) Comunicaciones en congresos (nacionales e internacionales):

- M. L. Ruz, F. Vazquez y F. Chacón. Aplicación de la tecnología RFID en seguridad en seguridad en máquinas (105/UCO/RFID). *X Congreso Andaluz de Seguridad y Salud Laboral/IV Congreso de Prevención y riesgos Laborales en Iberoamérica*. Granada (2010).
- M. L. Ruz, F. Vázquez. La tecnología RFID en la seguridad industrial. *IX Congreso Andaluz de Seguridad y Salud Laboral*. Punta Umbría (2008).
- M. L. Ruz, F. Vázquez. Análisis y aplicación de la tecnología RFID en seguridad industrial. *Primeras Jornadas Científicas sobre RFID*. Ciudad Real (2007).
- M. L. Ruz, F. Vázquez. Control de un lector RFID mediante microcontrolador. *XXVIII Jornadas de Automática. CEA-IFAC*. Huelva (2007).

c) Patente:

- M. L. Ruz, J. Galán, F. Vázquez, F. Chacón. Método y dispositivo de seguridad industrial (Method and device for industrial security). Titular: Grupo de

empresas Dadrev gabinete técnico S.L. Fecha de publicación: 01.05.2009. Fecha de concesión: 03.02.2010. N° de patente: ES2319066. N° de publicación internacional: WO2009060316 A1.

d) Actividades divulgativas

- M. L. Ruz, L. Salas-Morera, A. Cubero-Atienza, F. Vázquez. Aplicación de la tecnología RFID en seguridad industrial. *Consejo Social de la Universidad de Córdoba* (2009).
- B. Bacheldor. RFID Can Stop the Presses. *RFID Journal*. 5(5), 2008, p. 4.

**1.3.1 Otras contribuciones relacionadas con la tesis:**

Se detallan las publicaciones, también realizadas por el autor, relacionadas parcialmente con el desarrollo de esta tesis. En las tres primeras (libro, revista de divulgación y publicación del Consejo Social de la Universidad de Córdoba) se realiza una revisión bibliográfica sobre el estado actual del conocimiento de los efectos de los campos magnéticos y eléctricos de muy baja frecuencia (ELF) en la salud humana. Las posibles medidas sobre prevención y protección en el ámbito laboral, así como los métodos de medición de los campos magnéticos y eléctricos, son también aplicables a dispositivos de protección basados en radiofrecuencia. Por último, en dos congresos (uno nacional y otro internacional) se presentó el desarrollo de una interfaz elaborada por el autor de esta tesis y que ha servido como base para el diseño de la herramienta de simulación de algoritmos de posicionamiento (wsnLocalize) aquí presentada.

- M. L. Ruz, F. Vázquez, A. Cubero-Atienza, L. Salas-Morera, J.E. Jiménez, A. Arauzo, J. R. Cubero, L. García-Hernández, M. D. Redel, J. Garrido. Efectos sobre la salud humana de los campos magnéticos y eléctricos de muy baja frecuencia (ELF). Junta de Andalucía, Consejería de Empleo, Sevilla (2010). 217 páginas., ISBN: 978-84-692-4787-7.
- M. L. Ruz, F. Vázquez, A. Cubero-Atienza, L. Salas-Morera. El riesgo ante la exposición a los campos magnéticos ELF. *Formación de seguridad Laboral*. No. 110, 2010, 108-112, ISSN: 1130-9148.

- M. L. Ruz, A. Cubero-Atienza, F. Vázquez, M.D. Redel, L. García-Hernández, A. Araúzo-Azofra. El riesgo ante la exposición a los campos magnéticos ELF. *Consejo Social de la Universidad de Córdoba* (2009).
- M. L. Ruz, F. Morilla, F. Vázquez. Teaching control with first order time delay model and PI control. *8<sup>th</sup> IFAC symposium on advances in Control Education (ACE 2009)*. Kumamoto, Japan (2009).
- M. L. Ruz, F. Morilla, and F. Vázquez. Herramienta interactiva sobre el control PI de procesos de primer orden con retardo. *XXX Jornadas de Automática. CEA-IFAC*. Valladolid (2009).

## 1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis se estructura en cinco capítulos y dos anexos que describen, además de los objetivos y estructura del documento, el prototipo RFID desarrollado, el banco experimental de pruebas basado en robot y las herramientas software desarrolladas para la evaluación de algoritmos de localización cooperativa. En este primer capítulo se han especificado los principales objetivos de la tesis, indicándose las principales contribuciones científicas y publicaciones que se han derivado de la misma.

El capítulo 2 está dedicado a la tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID) y al desarrollo de un prototipo. Como punto de partida, se lleva a cabo un resumen de los principios de funcionamiento básicos de RFID, en virtud de mostrar una visión global de esta tecnología. Posteriormente, en el mismo capítulo se estudia el lector RFID utilizado en el que se basó el diseño del prototipo, una metodología de diseño de antenas de acoplamiento inductivo, su acople en máquinas y el desarrollo de una hardware de comunicaciones para controlarlo.

En el capítulo 3 se describe el desarrollo de un banco experimental de pruebas basado en el robot ABB IRB 2400L, y propuesto para analizar el rendimiento de dispositivos de seguridad basados en radiofrecuencia. Se analiza el rendimiento del prototipo RFID simulando con el robot la introducción de la mano de un operario en una prensa hidráulica. Para ello, se describe un enfoque matricial diseñado para definir diferentes puntos de entrada en áreas peligrosas, y poder así obtener datos estadísticos de manera independiente. Se discuten los resultados obtenidos, destacándose las limitaciones actuales del prototipo RFID. Se realiza también un estudio bibliográfico de

algunos sistemas de posicionamiento propuestos por algunas compañías y que podrían aplicarse en el ámbito de la seguridad industrial.

En el capítulo 4 se abordan los algoritmos de localización cooperativa y los posibles beneficios que se podrían obtener en aplicaciones de seguridad. El estudio se centra en algoritmos basados en la técnica de *multidimensional scaling* (MDS), aunque también se consideran otras propuestas. Se realiza un estudio del estado actual del conocimiento de este tipo de algoritmos y se describen las etapas de las que suelen constar, desde un punto de vista general. Se describe wsnLocalize, una interfaz gráfica desarrollada en Matlab para la evaluación de algoritmos de localización cooperativa en redes de sensores. Mediante dicha herramienta se llevan a cabo comparaciones de diferentes algoritmos de localización cooperativa y se estudia su rendimiento en diferentes topologías de redes.

En el capítulo 5 se presentan las principales conclusiones y aportaciones de esta tesis. Se sugieren también líneas futuras de investigación. Finalmente, se adjuntan dos anexos; en el primero de ellos se comenta la normativa que guarda mayor relación con los dispositivos de seguridad en maquinaria similares al prototipo RFID desarrollado. En el segundo apéndice se recogen algunos de los informes estadísticos que permite generar wsnLocalize para la evaluación de algoritmos de localización cooperativa.

---

# **Capítulo 2: Desarrollo de un prototipo RFID con funciones de seguridad industrial**

---

## **2.1 INTRODUCCIÓN**

Este capítulo alberga, desde un punto de vista práctico, la descripción de las etapas de desarrollo de un prototipo RFID con funciones de seguridad. En particular, mediante este dispositivo se pretende implementar un paro de emergencia automático cuando se presenta una situación de riesgo para un operario que trabaja con maquinaria peligrosa, como por ejemplo una prensa hidráulica. Como punto de partida, se exponen los antecedentes más importantes para el desarrollo del prototipo. En primer lugar, se lleva a cabo un resumen de los principios de funcionamiento de la tecnología RFID. Para mostrar una visión global de esta tecnología, se comentan a modo introductorio los elementos básicos que conforman cualquier sistema RFID. A partir de estas explicaciones, en segundo lugar se entra en aspectos de carácter más técnico sobre cada uno de los componentes y características principales, como los tipos de etiquetas, los rangos de frecuencia de funcionamiento, y las formas de comunicación y transmisión de energía entre el lector y las etiquetas. Se consideran también los principales elementos que pueden causar una degradación del rendimiento de un sistema RFID, tales como la

presencia de metales, ruido electromagnético o perturbaciones del entorno, y una serie de factores que deben considerarse en la instalación de este tipo de sistemas.

Una vez expuestos los principales aspectos en lo que a RFID se refiere, se estudia el lector utilizado para el prototipo desarrollado, se explica su funcionamiento y se estudian detalladamente las especificaciones que el equipo requiere para un rendimiento óptimo. En esta parte del capítulo se desarrolla una metodología de diseño de antenas de acoplamiento inductivo para su acople en máquinas. Posteriormente, se describe el desarrollo de un hardware de comunicación que permite realizar una acción de emergencia (como por ejemplo el paro de una máquina) y controlar el prototipo RFID. Como caso particular, se diseña y acopla una antena para un modelo específico de prensa hidráulica. Por último, se presenta el prototipo RFID desarrollado y se describen sus principales componentes. Debido al carácter práctico de este capítulo, en lo que a la construcción del prototipo se refiere, se incluyen los objetivos y resultados obtenidos en cada una de las fases de las que ha constado.

## **2.2 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LA TECNOLOGÍA RFID**

**Objetivo:** *Estudio del arte y viabilidad técnica, con objeto de la adquisición de conocimientos sobre la situación actual, alcance y requerimientos de la tecnología RFID.*

**Resultados obtenidos:** *recopilación de la base teórica necesaria para definir y concretar los elementos apropiados para la construcción del prototipo RFID: antena, disposición y sintonización adecuada, tipos de etiquetas empleadas y formas de integración con el trabajador.*

En este apartado se describen los fundamentos de un sistema RFID, desde sus principios básicos de funcionamiento hasta las variantes existentes en la actualidad. El propósito fundamental de la tecnología RFID es transmitir mediante ondas de radio la información relacionada con una entidad u objeto, almacenadas en dispositivos denominados etiquetas, *tags* o *transponders*. Los principales componentes que va a tener todo sistema RFID son los siguientes:

- Etiqueta (*tag* o *transponder*): en ella se almacenan los datos relacionados con un objeto determinado, como por ejemplo un número de identificación.

- Lector (*interrogator*): hardware encargado de leer y procesar esos datos.
- Antena: dispositivo encargado de recibir y transmitir los datos entre etiquetas y lector y, en el caso de las etiquetas pasivas, transmitir la energía a éstas para que puedan comunicarse.

El lector, normalmente, se conecta a un ordenador u otro dispositivo. Existe una extensa variedad de aplicaciones en las que se usa la tecnología RFID. Un ejemplo de aplicación simple puede ser un almacén de ropa, donde cada prenda tiene asociada y acoplada una etiqueta RFID, y su detección por parte de un lector activa una alarma. Como ejemplo de mayor complejidad, se puede considerar una aplicación de suministro en cadena de cajas de cereales que llevan adheridas etiquetas RFID, y cuya lectura, al pasar por algún portal de detección (donde se encuentran instaladas las antenas RFID) actualiza una base de datos, pudiéndose iniciar otra serie de acciones, como el almacenamiento automatizado de la mercancía en un lugar concreto, algún tipo de notificación al personal de administración del almacén, indicando qué estantería ha sido ocupada, u otro tipo de acción, como por ejemplo el envío de datos al suministrador del producto, indicándole que el porte solicitado ha sido recibido. La tecnología RFID ha tenido un gran impacto en las aplicaciones de trazabilidad (identificación en las diferentes etapas de un proceso de producción y distribución de bienes). En la Figura 2.1 se muestra una posible estructura de un sistema RFID empleado en una aplicación compleja, donde los lectores RFID distribuyen los datos a un conjunto de computadoras, y éstas a su vez los envían a un conjunto de servidores a través de internet.

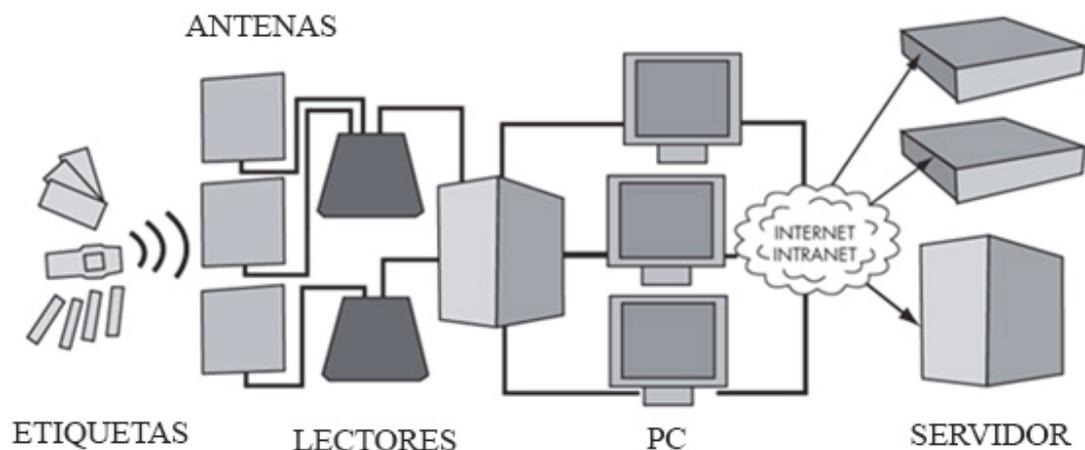


Figura 2.1. Esquema general de una posible aplicación RFID (modificada de Manis & Sharam, 2005)

Una de las características más importantes de un sistema RFID es el modo en que se realiza la transmisión de datos entre el lector y la etiqueta, también llamado acoplamiento (*coupling*), a través de la/s antena/s. Se muestra en la Figura 2.2.

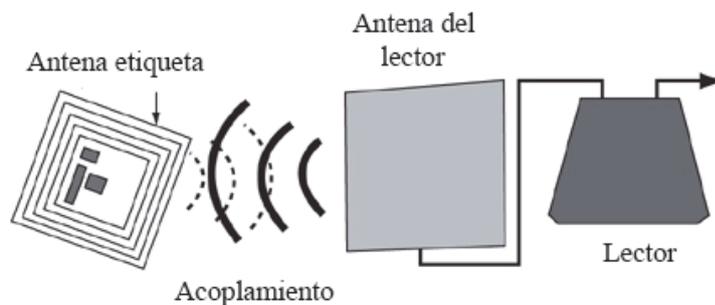


Figura 2.2. Elementos principales de un sistema RFID (modificada de Manis & Sharam, 2005)

El acoplamiento, en la mayoría de los sistemas RFID, o bien es electromagnético (*backscattering*) o inductivo (*inductive*). El método utilizado dependerá de los requisitos de la aplicación, como el tamaño de las etiquetas, el rango de lectura, o el coste por etiqueta. En el caso del acoplamiento inductivo, habitualmente se tiene una menor distancia de lectura, del orden de centímetros; este acoplamiento se utiliza en bastantes aplicaciones del tipo “control de acceso”, como por ejemplo el desbloqueo de una puerta cuando el lector detecta un número de identificación concreto (proporcionado por la etiqueta cuando ésta se encuentra dentro del rango de lectura, cercana a la antena del lector RFID).

Como ya se ha comentado anteriormente, la antena es el elemento que permite la comunicación entre el lector y la etiqueta. Es importante recordar que tanto lector como etiqueta poseen su propia antena. Otra característica importante a tener en cuenta en un sistema RFID es la frecuencia a la que trabaja el sistema. La selección de la frecuencia es determinante en la capacidad de la velocidad de transmisión de datos, la lectura simultánea de varias etiquetas o el grado de susceptibilidad ante las condiciones del entorno. Por ejemplo, las aplicaciones basadas en la identificación animal suelen operar en la banda de los 134 kHz, baja frecuencia. Esta frecuencia de trabajo hace que, generalmente, el sistema sea menos susceptible a la presencia de líquidos, aunque también la velocidad de transferencia de datos y el alcance es menor que a frecuencias de trabajo mayores.

### 2.2.1 La comunicación

La comunicación entre el lector y la etiqueta utiliza como interfaz o medio de transmisión el espacio libre. Conociendo el modo en que se transmiten los datos será posible determinar el rango de lectura típico y qué lectores son compatibles con un tipo de etiqueta determinada. En los siguientes apartados se describen las principales características que definen las principales formas de comunicación.

#### 2.2.1.1 Modos de comunicación

Un modo en el que se diferencia el funcionamiento de las etiquetas consiste en saber si éstas pueden transmitir o no a la vez que el lector. Al igual que con las comunicaciones por cable, las comunicaciones por radiofrecuencia pueden ser *full-duplex* (FDX), donde tanto lector como etiqueta pueden transmitir a la vez; o tomando turnos, denominándose entonces *half-duplex* (HDX). En la mayoría de los casos, las denominadas etiquetas pasivas obtienen la energía necesaria para su funcionamiento a partir de la comunicación con el lector. Esta forma de aportar energía se realiza mediante una variante de HDX, donde la transmisión de energía se realiza mientras la etiqueta no está respondiendo. La alimentación se realiza por medio de un condensador o algún dispositivo de almacenamiento integrado en la etiqueta, lo que permite la transmisión de datos mientras ésta no reciba energía por parte del lector (Finkenzeller, 2003). Este modo de transmisión se denomina secuencial (SEQ).

En cuanto a las formas de modulación (*keying*), este término hace referencia a las características que una señal analógica utiliza para representar unos y ceros en un mensaje digital (Glover & Bhatt, 2006). Las formas básicas de modulación son las siguientes:

- *Amplitude shift keying* (ASK): Este tipo de modulación envía los datos digitales modificando la amplitud de la señal portadora
- *Frequency shift keying* (FSK): En este caso los datos digitales se distinguen modificando la frecuencia de la onda, (el equipo RFID utilizado en este proyecto utiliza esta variante (Texas Instruments, 2002a).
- *Phase-shift keying* (PSK): Los datos digitales se distinguen realizando cambios en la fase de la señal.

Por otra parte, el modo de codificación (*encoding*) determina la forma en que etiqueta y lector interpretan los cambios en la señal analógica recibida que representan datos digitales. De esta forma, se define codificación como el “acuerdo” entre transmisor y receptor respecto al significado de los cambios que se producen. El método de codificación empleado depende del fabricante y del estándar seguido. Algunos modos de codificación utilizados en equipos RFID convencionales son la codificación Manchester bifase, mediante intervalos de pulsos (PIE), o la codificación EPC Miller. No obstante, hay organizaciones encargadas del desarrollo de estándares y consensos a nivel mundial. Una de las más importantes es EPC Global<sup>1</sup>, donde se pueden consultar las especificaciones de los diferentes tipos de sistemas RFID existentes.

### *2.2.1.2 Tipos de acoplamiento*

Si la modulación es la *forma* de realizar cambios para enviar bits con valores uno o cero; y la codificación la *interpretación* de esos cambios; el acoplamiento (*coupling*) entre lector y etiqueta se puede definir como el mecanismo mediante el cual ambos elementos transmiten información, e incluso energía. El tipo de acoplamiento que se utilice es determinante en el rango de lectura (alcance) entre lector y etiqueta. Una clasificación de los sistemas RFID atendiendo al rango de lectura puede ser la siguiente (Glover & Bhatt, 2006):

- Sistemas de rango cercano: alcance en torno al cm.
- Sistemas remotos: de 1 cm a 1 m (en los casos más favorables).
- Sistemas de largo alcance: más de 1 m.

En el apartado anterior ya se ha hecho referencia a los dos principales tipos de acoplamiento existentes (electromagnético e inductivo). Además, también se distinguen los acoplamientos magnético y capacitivo, que pertenecen a la categoría de rango cercano. El acoplamiento inductivo es un tipo de acoplamiento remoto, y el de tipo *backscatter* puede ser o bien remoto, o de largo alcance. En los trabajos realizados por (Finkensteller, 2003; Glover & Bhatt, 2006; Manis & Sharam, 2005) se hace una descripción detallada de cada uno de ellos. A continuación se comentan de forma simple y resumida algunas de las características más relevantes.

---

<sup>1</sup> <http://www.epcglobalinc.org>

El acoplamiento *backscatter* es una de las posibles soluciones para proporcionar energía a las etiquetas pasivas. En este proceso, el lector envía una señal (energía) a la etiqueta, y la etiqueta responde “reflejando” o devolviendo parte de esa energía recibida. Un dispositivo de carga, como un condensador integrado en la etiqueta, hace esta reflexión posible a partir de su energía almacenada. El condensador (u otra circuitería que permita almacenar energía) se carga almacenando la energía recibida por el lector; y dicha energía almacenada se utiliza por la etiqueta para enviar la señal al lector, transmitiendo de esta forma los datos. Durante este proceso, el condensador se descarga. La Figura 2.3 muestra un ejemplo típico de etiquetas que funcionan mediante acoplamiento *backscatter*. En el caso mostrado, un chip se encarga de controlar una resistencia mediante la cual, a través de su conexión y desconexión en un circuito donde también se encuentra involucrada la antena de la etiqueta, se transmiten los datos digitales (número de identificación), generalmente generándose una señal del tipo ASK.

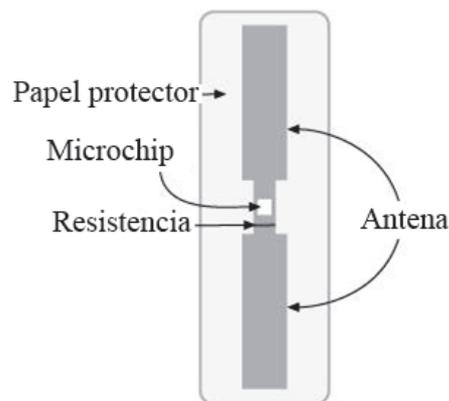


Figura 2.3. Componentes típicos de una etiqueta que utiliza *backscatter* (Glover & Bhatt, 2006)

Por otra parte, se tiene el acoplamiento inductivo, el cual se emplea en una amplia gama de etiquetas. En esta variante la antena del lector genera un campo magnético, a partir de una antena generalmente formada por espiras de cable conductor. Este campo magnético inducirá una tensión en la antena de la etiqueta (la conocida ley de *Faraday*) proporcionando la energía necesaria para el chip de la etiqueta. En la Figura 2.4 se ilustra lo explicado, donde las espiras representan el acoplamiento inductivo que se produce entre el lector y la etiqueta.

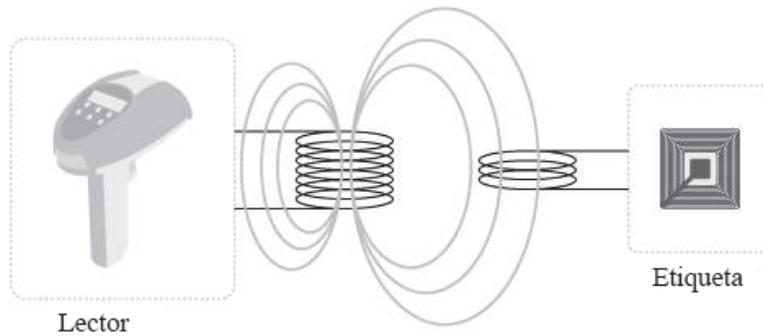


Figura 2.4. Acoplamiento inductivo

Una vez que la etiqueta tiene la energía suficiente, ésta puede comunicarse con el lector mediante un mecanismo similar al explicado en el método *backscatter*. Una resistencia u otro tipo de impedancia se conecta y desconecta causando fluctuaciones en el campo magnético, y produciendo de este modo variaciones de tensión en la antena del lector. Estas variaciones se realizan mediante diferentes estrategias, y son las que permiten recibir el mensaje.

Las etiquetas que utilizan acoplamiento inductivo son pasivas o semi-pasivas y tienen generalmente capacidades de hasta 2 kbits (Glover & Bhatt, 2006). Existen modelos desde sólo lectura hasta reprogramables (en los cuales es posible, por ejemplo, modificar el código de identificación que transmiten). Como se ha comentado, la antena (o antenas) del lector que funciona por acoplamiento inductivo básicamente son espiras de cable conductor, cuya función es generar el campo magnético, teniéndose antenas relativamente grandes y un rango de lectura más bien pequeño. Los rangos de lectura van generalmente desde los 10 cm al metro, dependiendo de la antena del lector y la etiqueta, además de otros factores, como la intensidad de campo magnético generado.

Por último, cabe mencionar de nuevo los dos tipos de acoplamiento cercano, el acoplamiento magnético y el capacitivo. El primero es bastante similar al inductivo, aunque generalmente funciona para distancias del orden de no más de un cm, y se suele utilizar más para las tarjetas inteligentes o *smart-cards*, teniéndose éstas que insertar en el lector. El acoplamiento capacitivo también trabaja con la etiqueta insertada en el lector y también se utiliza para las *smart-cards* (tal y como se define en la norma ISO/IEC 10536-1:2000, 2000).

## 2.3 COMPONENTES DE UN SISTEMA RFID

En los siguientes apartados se describen de forma más detallada los tres componentes comunes en cualquier sistema RFID: etiqueta, lector y antena.

### 2.3.1 La etiqueta (*transponder*)

La etiqueta, también conocida como *transponder* (derivado de los términos *transmitter* y *responder*) contiene los datos que se transmiten al lector cuando éste la “interroga”, esto es, cuando un lector detecta que se encuentra en su rango de alcance, definido por el rango de cobertura de su antena. Las etiquetas más comunes consisten en un circuito integrado, en ocasiones con memoria, y un chip de control. También existen etiquetas que no integran chip y que se comentarán más adelante.

Cuando una etiqueta es “interrogada” (detectada por alguna de las antenas de un lector RFID), los datos que ésta almacena se transmiten al lector. Una etiqueta puede ejecutar tareas básicas (lectura/escritura desde/a memoria), e incluso manipular los datos que tiene almacenados en su memoria. Las capacidades de memoria de una etiqueta pueden ser de sólo lectura, de una escritura y varias lecturas (WORM), o de lectura y escritura (RW). Las capacidades de escritura en la memoria aumentan el coste total de la etiqueta, a la vez que también proporcionan la capacidad de realizar funciones más complejas. Por otra parte, las etiquetas de sólo lectura eliminan el riesgo accidental o malintencionado de sobre-escritura o modificación de los datos.

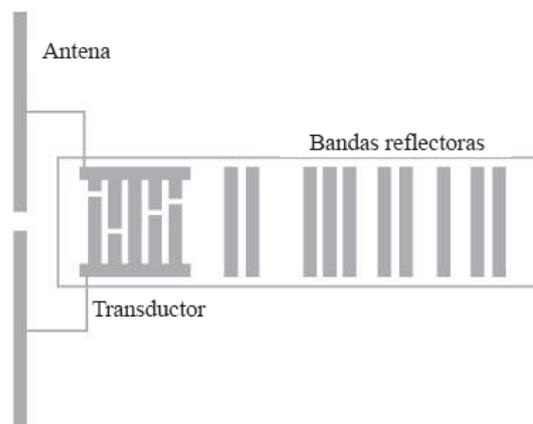
#### 2.3.1.1 Tipos de etiquetas

Las etiquetas más ampliamente utilizadas actualmente son las etiquetas pasivas (*passive tags*). Este tipo de etiquetas poseen unas características que posibilitan una producción a bajo coste, principalmente porque no requieren de una batería autónoma, y obtienen la energía aprovechando el campo electromagnético o magnético (bien mediante *backscatter* o acoplamiento inductivo, respectivamente) emitido por el lector. En muchas aplicaciones se emplean este tipo de etiquetas, como en la identificación animal, automatización industrial, vigilancia de artículos o aplicaciones de control de acceso.

Por otra parte, otro tipo de etiquetas, denominadas activas, poseen una batería integrada que permite mayores distancias de lectura y capacidades más complejas de

intercambio de información y tratamiento de datos. Ya que las etiquetas activas tienen su propia alimentación, pueden transmitir datos sin necesidad de que el lector les proporcione energía. También, debido a la batería, las etiquetas activas tienen un tiempo de vida limitado. Uno de los usos más comunes de este tipo de etiquetas es su aplicación en objetos de gran valor. Sin embargo, las etiquetas activas se utilizan también en aplicaciones comerciales donde las condiciones del entorno y los requerimientos de la aplicación demandan una alta robustez en las comunicaciones entre etiqueta y lector. Otra clase de etiquetas son las semi-activas o semi-pasivas (el nombre dependerá del fabricante). Este tipo de etiquetas obtienen la energía de la batería que tienen integrada para realizar tareas simples. Sin embargo, utilizan la energía obtenida por el campo electromagnético para transmitir al lector los datos que tienen almacenados. Un ejemplo de aplicación es el pago de peajes, en uso desde los años 80. Las baterías utilizadas tienen una durabilidad de varios años ya que su energía se utiliza sólo cuando la etiqueta está activada y se encuentra dentro del campo de lectura del lector, o cuando es necesario ampliar el rango de cobertura.

En las denominadas etiquetas SAW (*Surface Acoustic Wave tags*), la etiqueta carece de chip. Esencialmente son pasivas, y operan en el rango de microondas (Glover & Bhatt, 2006). Las etiquetas sin chip carecen de algunas de las capacidades de memoria que sí poseen las etiquetas basadas en un chip integrado. Utilizan la idea de la codificación única de patrones en las superficies materiales reflectantes. La Figura 2.5 muestra el esquema de una etiqueta SAW.



**Figura 2.5. Esquema de una etiqueta SAW (modificada de Bhatt and Glover, 2006)**

La antena (izquierda) recibe los pulsos de microondas enviados por el lector, éstos alimentan a un transductor digital; y este transductor contiene un cristal piezoeléctrico que vibra cuando recibe los pulsos de microondas. Dicha vibración crea una onda acústica que se transmite a través de la etiqueta, encontrándose con una serie de bandas reflectoras en el camino de propagación. A su vez, estas bandas reflejan parte de la onda, causando una nueva vibración en el cristal y creando una reflexión tipo *backscatter*.

El número y espaciado entre bandas determina el número y tiempo entre pulsos, esto es, el código de identificación que representa la etiqueta, y que se transmite mediante ondas electromagnéticas al lector. Este número debe definirse durante la propia fabricación de la etiqueta, las etiquetas SAW son de sólo lectura, y ya que no tienen ninguna circuitería lógica implementada, un conjunto de etiquetas SAW responderá de forma simultánea al lector, sin esperar turno alguno, pudiendo causar problemas de detección por parte del lector cuando están transmitiendo varias etiquetas simultáneamente. Estas características no describen completamente la tecnología utilizada por las etiquetas SAW, pero representan una buena parte de la variedad existente.

Por otra parte, cabe mencionar que existen etiquetas más complejas que también integran sensores, ofreciendo la capacidad de medir y almacenar datos. Para ello, un dispositivo sensor se integra en la etiqueta y graba cualquier variable para la cual ha sido diseñado. Se pueden presentar problemas en la aplicación si la implementación de estos sensores se hace en etiquetas pasivas. Por ejemplo, es posible que el sensor no disponga de la energía necesaria para funcionar si la etiqueta no se encuentra dentro del rango de lectura.

Por último, existen diferentes propuestas de dispositivos con sensores integrados y con capacidades de comunicación *wireless*. Estos equipos se denominan motas, y poseen mayores capacidades de procesamiento y comunicación, pudiendo incluso actuar como lectores RFID o etiquetas, además de poder integrar diferentes tipos de sensores. En este caso se extiende el concepto de RFID, que en su esencia define la identificación de objetos mediante tecnología por radiofrecuencia, a dispositivos con mayores capacidades de procesado, donde las etiquetas ya no sólo identifican, sino que también participan de forma cooperativa, actuando como transmisores-receptores. Estas

capacidades, así como técnicas más avanzadas relacionadas con el posicionamiento mediante radio, se comentan en los capítulos 3 y 4.

### *2.3.1.2 Principales características de una etiqueta*

A continuación se describen las principales características generales a considerar en cualquier tipo de etiqueta, además de los modos de comunicación comentados anteriormente, y que son determinantes para el correcto funcionamiento del sistema RFID, según el tipo de aplicación. En (Finkenzeller, 2003; Glover & Bhatt, 2006) se puede encontrar información más detallada de las características que aquí se resumen.

#### a) Formas de empaquetamiento de las etiquetas

La forma de empaquetado de las etiquetas juega un papel muy importante para determinar la validez de la tecnología RFID en ciertas aplicaciones, ya que es posible que se requiera acoplar o integrar la etiqueta a determinados objetos que pueden variar en tamaño, contorno o material de la superficie. El encapsulado de la etiqueta debe considerarse para según qué entorno.

Las dimensiones del empaquetado se suelen definir por el tamaño y forma de la antena, integrada con la etiqueta. La tecnología actual ha posibilitado la producción de etiquetas flexibles. Una característica interesante de este tipo de etiquetas es su acoplamiento al objeto de forma adhesiva, además de que pueden llevar impresa información en forma de código de barras. Se utilizan en aplicaciones de identificación y *tracking* de diferentes elementos, por ejemplo, maletas de equipaje en aeropuertos. La integración de etiquetas es posible en una gran variedad de objetos, tales como:

- Tarjetas de pago automático.
- Llaves de vehículos o de control de acceso.
- Encapsulados de cristal para su inyección en piel animal.
- Etiquetas adheridas a prendas de vestir.
- Diseños especiales para aplicaciones industriales, por ejemplo en objetos con materiales metálicos, y que hacen necesario un encapsulado especial de la etiqueta.
- Encapsulados con forma de pulsera o collar.

En cualquier caso, como se ha dicho, el tipo de encapsulado, además de sus dimensiones y de la tecnología de la propia etiqueta RFID, es determinante en el rendimiento global de la aplicación. Por ejemplo, en el caso de utilizar etiquetas RFID con objetos que contienen cantidades elevadas de líquidos, se debe tener en cuenta dónde se va a acoplar la etiqueta y si el tipo de encapsulado está preparado para que ésta pueda detectarse y transmitir los datos que contiene en presencia de líquidos.

#### b) Memoria

La memoria de la etiqueta puede ser un factor muy importante en un sistema RFID. En ciertas aplicaciones de suministro en cadena, como por ejemplo la trazabilidad en ganadería, la memoria de la etiqueta puede que se utilice únicamente para almacenar un único número identificativo. Por el contrario, también puede requerirse la necesidad de que a cualquier nivel de la cadena de suministro sea posible actualizar, leer o almacenar información esencial para la aplicación. Disponer de memoria integrada con la etiqueta posibilita la capacidad de almacenar una mayor cantidad de datos. En la aplicación comentada, por ejemplo, la información podría incluir un historial de salud, número de crías producidas por el animal, fecha y localización del vendedor, peso y fecha de venta esperada, u otras variables.

Las configuraciones de la memoria varían dependiendo de los requerimientos de la aplicación. En el caso de la vigilancia electrónica de artículos (EAS), donde se instalan portales RFID a las salidas y entradas de centros comerciales, las etiquetas suelen tener un solo bit de memoria y son relativamente baratas comparadas con otro tipo de etiquetas que poseen más memoria. En definitiva, la cantidad de memoria presente en la etiqueta depende de los requerimientos de la aplicación o cualquier normalización de carácter relevante.

La Tabla 2.1 muestra un resumen de los aspectos más relevantes en una etiqueta y que se han comentado en los apartados anteriores.

Tabla 2.1. Principales características de una etiqueta RFID (Finkenzeller, 2003)

Característica	Descripción
<i>Diseño</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La mayoría de las etiquetas tienen un circuito integrado para almacenar energía. Algunas poseen mayores capacidades, como por ejemplo más cantidad de memoria o capacidad de reprogramar los datos que contienen.</li> <li>- Las etiquetas RFID sin chip (SAW), se basan en las propiedades del material de las que están hechas para la transmisión de datos. Pueden alcanzar un mayor rango. Sin embargo, no pueden almacenar nuevos datos o modificar su código de identificación.</li> <li>- El tipo de encapsulado es determinante para el adecuado funcionamiento del sistema RFID, especialmente si en el entorno de trabajo existe abundancia de líquidos o materiales metálicos.</li> </ul>
<i>Tipo</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Pasivas:</b> no necesitan batería para funcionar, bajo alcance. Generalmente son las de menor coste y su uso está extendido para diferentes tipos de aplicaciones.</li> <li>- <b>Activas:</b> una batería proporciona la energía al chip y posibilita la comunicación con el lector. Pueden ofrecer un mayor alcance de lectura. Son generalmente más caras. Como concepto extendido de etiqueta RFID, se pueden considerar las motas, que constituyen un transmisor-receptor con capacidades mucho más elevadas, y también mayor coste.</li> <li>- <b>Semi-activas:</b> requieren la batería sólo para proporcionar energía al chip. Ofrecen mayor alcance que las etiquetas pasivas.</li> </ul>
<i>Memoria</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Etiquetas de sólo lectura:</b> los datos (número de identificación o posiciones de memoria específicas) que luego transmiten se programan sólo en el proceso de manufactura.</li> <li>- <b>Etiquetas de una escritura y varias lecturas:</b> similares a las anteriores, pero pueden reprogramarse una vez después de su manufactura, proporcionando flexibilidad en la aplicación.</li> <li>- <b>Etiquetas de lectura y escritura:</b> Etiquetas reprogramables (y por tanto vulnerables a la falsificación de datos).</li> </ul>

### 2.3.2 El lector

El lector o *reader*, también denominado *interrogator*, es el dispositivo que captura y procesa los datos de la etiqueta (ver Figura 2.6). Algunos de ellos tienen la capacidad de escribir datos en la etiqueta. El lector también suele contar con una interfaz de comunicación con el ordenador (*host computer*) para así poder transmitir los datos recibidos de las etiquetas. Los dos lectores mostrados en la Figura 2.6 son ejemplos de equipos estáticos, aunque también existen terminales portátiles.



Figura 2.6. Ejemplos de lectores RFID (Manis & Sharam, 2005)

Algunas de las características distintivas de un lector RFID son las siguientes:

a) Transmisión de energía a la etiqueta

En el caso de etiquetas pasivas o semi-activas, el lector proporciona la energía necesaria para alimentar a la etiqueta a través del campo electromagnético (o magnético en el caso de acoplamiento inductivo) generado. El alcance de este campo depende generalmente del tamaño de las antenas, tanto la del lector como la de la etiqueta. Además, el tamaño de la antena dependerá del tipo de aplicación. Sin embargo, la energía del lector (transmitida a través de su antena), la cual define la intensidad y alcance del campo electromagnético producido, está generalmente limitada por estándares o normas reguladoras. Cada país tiene su propio conjunto de estándares donde se establecen un conjunto de límites máximos según diferentes parámetros, como la frecuencia de trabajo del sistema. Por esta razón, pueden existir incompatibilidades legales de los sistemas RFID dependiendo de la región o país.

b) Definición de la frecuencia de operación

Uno de los aspectos más importantes de la “conexión” entre etiqueta y lector (acoplamiento, *coupling*) es la frecuencia de trabajo u operación, es decir, la frecuencia

a la cual opera el sistema. La frecuencia de operación puede variar dependiendo de la aplicación, estándares, regulaciones. Los rangos de frecuencias más comunes en los que opera la tecnología RFID son la baja frecuencia (LF, *Low Frequency*) a 135 kHz o menos, Alta Frecuencia (HF, *High Frequency*) a 13.56 MHz, Ultra-Alta Frecuencia (UHF, *Ultra High Frequency*), la cual comienza en 433 MHz, y Microondas (*Microwave Frequency*) a 2.45 GHz y 5.8 GHz.

En general, existe una relación entre la frecuencia de trabajo y la tasa de transmisión de datos entre etiqueta y lector en sistemas RFID convencionales. A menor frecuencia, menor tasa de transferencia, aunque también influyen otros factores, como el ancho de banda de la señal utilizada y el tipo de modulación empleada. Sin embargo, la velocidad no es la única consideración a tener en cuenta. Las condiciones del entorno pueden jugar un papel importante a la hora de determinar la frecuencia de operación más adecuada, para una aplicación en particular. Por ejemplo, el tipo de material al cual se encuentran adheridas las etiquetas y la presencia de ondas de radio producidas por otros dispositivos (como microondas generados por teléfonos inalámbricos), pueden degradar el rendimiento del sistema RFID. Los equipos RFID que funcionan a frecuencias bajas (del orden de los kHz) suelen tener un comportamiento robusto ante este tipo de interferencias. Sin embargo, una mayor frecuencia de operación usualmente también permite antenas más pequeñas y por tanto un menor tamaño de la etiqueta, así como un mayor alcance (es decir, mayor distancia posible de detección entre las etiquetas y el lector), por lo que se debe de buscar la situación de compromiso que más se ajuste a la aplicación en concreto.

La Tabla 2.2 muestra un resumen de las principales bandas de frecuencia, así como sus aplicaciones típicas y principales características.

Tabla 2.2. Bandas de frecuencia RFID y aplicaciones típicas (Manis & Sharam, 2005)<sup>2</sup>

Frecuencia	Características	Aplicaciones típicas
<i>Baja frecuencia (LF)</i> <i>135 kHz o menos</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- En uso desde los años 80 y ampliamente desarrollada.</li> <li>- Buen comportamiento ante la presencia de líquidos y metales.</li> <li>- Menor tasa de transferencia de datos.</li> <li>- Alcance bajo, del orden de 1 metro.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificación animal.</li> <li>- Automatización industrial.</li> <li>- Control de acceso.</li> </ul>
<i>Alta Frecuencia (HF)</i> <i>13.56 MHz</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- En uso desde mediados de los noventa y ampliamente desarrollada.</li> <li>- Existencia de estándares comunes a nivel mundial.</li> <li>- Generalmente mayor alcance que en baja frecuencia (un metro o más)</li> <li>- Menor coste por etiqueta que en baja frecuencia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tarjetas de pago (<i>Smart Cards</i>)</li> <li>- Control de acceso.</li> <li>- Aplicaciones de tracking (control de inventario, equipaje)</li> <li>- Estanterías “inteligentes”.</li> <li>- Monitorización e identificación de personal.</li> </ul>
<i>Ultra Alta Frecuencia (UHF)</i> <i>433 MHz, 860 MHz hasta 930 MHz</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizada desde finales de los noventa.</li> <li>- Mayor rango de lectura que las etiquetas HF (4 metros o más).</li> <li>- Gran alcance para sistemas activos a 433 MHz (del orden de varios metros).</li> <li>- Capacidad de ofrecer el menor coste por etiqueta.</li> <li>- Existencia de incompatibilidades según la región en el mundo.</li> <li>- Susceptible ante la presencia de líquidos y metales.</li> </ul>	<p>Suministros en cadena y logística, por ejemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Control de inventario.</li> <li>- Administración de almacenes.</li> <li>- Aplicaciones que requieran lectura simultánea de etiquetas.</li> </ul>
<i>Microondas,</i> <i>2.45 GHz y 5.8 GHz</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- En uso desde hace más de una década.</li> <li>- Rápida tasa de transmisión de datos. Utilizada con etiquetas activas y semi-activas</li> <li>- Bajo rendimiento ante la presencia de líquidos y metales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Control de acceso.</li> <li>- Pago de peajes</li> <li>- Automatización industrial</li> </ul>

<sup>2</sup> Esta tabla es orientativa. Dependiendo de las referencias consultadas, los intervalos de frecuencia pueden variar ligeramente. Además, debido al continuo desarrollo de los sistemas RFID, algunas de las características señaladas en la tabla pueden dejar de ser ciertas, como por ejemplo el rendimiento ante la presencia de metales o la degradación del sistema en función de la frecuencia.

c) La antena del lector

En cuanto a la antena del lector, las dimensiones pueden variar de forma significativa dependiendo de los requerimientos de la aplicación. En ciertos casos como los lectores de mano, la antena va montada directamente en el lector. En otros, varias antenas se montan aparte del lector y se sitúan de forma estratégica para definir la zona de detección. Por ejemplo, en una aplicación de identificación de palés, el lector podrá conectarse a un conjunto de antenas que forman una zona de lectura bien definida, como un portal o puerta de acceso. Al pasar el palé por el portal deberían identificarse todos los objetos etiquetados. En la Figura 2.7 se muestra un ejemplo de portal de entrada.



**Figura 2.7. Zona de lectura y entrada de palés** (Manis & Sharam, 2005)

d) Limitaciones

No se debe olvidar que el principio básico de la tecnología RFID es la radiofrecuencia, sensible a degradaciones causadas por interferencias presentes en el entorno. Los orígenes de dichas interferencias se pueden deber a la proximidad o la presencia de los siguientes elementos:

- Líquidos, como por ejemplo el agua.
- Metales como el aluminio u otros.
- Alta humedad en el ambiente.
- Temperaturas extremas (muy bajas o muy altas).
- Cercanía a motores en funcionamiento.
- Dispositivos inalámbricos o redes *wifi* presentes en el entorno.

El mayor o menor grado en que afectan estos elementos a un sistema RFID depende principalmente de la frecuencia de operación del mismo, especialmente en el caso de las etiquetas pasivas. La capacidad de controlar los problemas debidos a interferencias es un aspecto a tener muy en cuenta a la hora de conseguir un funcionamiento adecuado de cualquier sistema RFID. Por esta razón, es necesario realizar una serie de pruebas durante la instalación, analizar la correcta localización de los lectores RFID, considerar las características del entorno donde se va a implantar el sistema y poder así garantizar un funcionamiento adecuado de la aplicación que se pretende desarrollar.

## **2.4 LECTOR RFID RI-K2A-001A**

Hasta ahora, se han visto de forma resumida las principales variantes de los sistemas RFID, los tipos de etiquetas existentes en el mercado y los posibles rangos de frecuencia. No obstante, se debe de tener muy en cuenta que la tecnología RFID continúa evolucionando<sup>3</sup>, y algunas de las limitaciones que se han comentado pueden dejar de serlo con nuevos diseños de etiquetas y métodos de comunicación.

En esta sección se describen las principales características del lector RFID utilizado en esta tesis. Se muestra, de forma resumida, el método empleado para controlare al lector RFID (mediante el desarrollo de una placa de circuito impreso descrita en el apartado 2.6), y se justifican las razones de su elección como candidato inicial para el desarrollo de un equipo basado en radiofrecuencia, que aporte capacidades innovadoras en el campo de la seguridad industrial.

### **2.4.1 Justificación de su elección**

A la hora de realizar el prototipo se decidió elegir un equipo RFID similar al kit de evaluación *Series 2000 Low Frequency RFID Evaluation Kit*, RI-K2A-001A, formado por un módulo de control y otro de radiofrecuencia. En este kit finalmente se utilizó un módulo de radiofrecuencia de gama superior (esto se explica más adelante), aunque sus modos de configuración son similares. También se realizaron algunas pruebas con el equipo ALR-8800 de Alien Technology, que opera en la banda (UHF), a 866 MHz. Su adquisición permitió comprobar la mayor degradación del rendimiento de los sistemas

---

<sup>3</sup> <http://www.rfidjournal.com>, aunque el contenido de esta web no trata, como normal general, aspectos de rigor científico de la tecnología RFID, sí contiene noticias sobre desarrollos y aplicaciones innovadoras que resultan de interés.

UHF pasivos ante líquidos (como el propio cuerpo humano) en comparación con sistemas RFID de baja frecuencia, permitiendo así centrar el estudio en estos últimos. La elección del equipo RI-K2A-001A se debe a que es el que mejor cumple los requisitos que a priori se consideran imprescindibles en el tipo de aplicación que se ha pretendido desarrollar, y que se resumen en los siguientes puntos.

a) Baja susceptibilidad ante la presencia de metales

Este factor es uno de los más importantes en la determinación del equipo a elegir. Como ya se ha visto, en principio, los equipos RFID menos susceptibles a entornos con materiales metálicos son los de baja frecuencia (ver Tabla 2.2). Es indudable que la presencia de metales, en mayor o menor grado, va a afectar al rendimiento global de cualquier sistema RFID, tratándose por tanto de uno de los aspectos a considerar cuando se implementa cualquier estrategia que utiliza tecnología por radiofrecuencia, y si cabe aún más para la aplicación aquí propuesta, ya que cualquier máquina industrial estará formada por componentes metálicos. En cualquier caso, la elección de la baja frecuencia (134.2 kHz) para sistemas pasivos RFID, se consideró como buena opción de partida.

b) Interfaz de comunicación serie

Este lector es controlable mediante un puerto serie RS-232. Esta interfaz de comunicación es ideal para su uso a partir de microcontroladores, por la simplicidad del cableado (se pueden usar incluso tan sólo tres cables: transmisión, recepción y tierra) y porque una gran parte de los microcontroladores del mercado disponen de una UART integrada. La placa de circuito impreso desarrollada para controlar el lector RFID se comunica mediante esta interfaz.

c) Diseño específico de antenas

Las ecuaciones que modelan una antena de baja frecuencia (la cual se comporta como una bobina, y cuya principal característica es la inductancia) sugieren que sí es factible diseñar antenas de distintas geometrías para su acople en máquinas. Por tanto esta característica también es totalmente relevante, ya que sin esta posibilidad se pierde la capacidad de adaptación de antenas para las máquinas industriales. Las características anteriores por tanto justifican la elección de este equipo como punto de partida.

El lector RFID consta de dos módulos:

- Módulo de control RI-CTL-MB2A con interfaz RS232:

Este módulo se encarga principalmente de hacer de interfaz entre la parte de radiofrecuencia y el control del equipo, es decir, transmite y recibe los datos de las etiquetas en función de un control (por ejemplo mediante un ordenador con el que está conectado) decodificando las señales de radiofrecuencia y obteniendo los números de identificación de las etiquetas. Además de validar los datos y, en este caso, realizar una conversión al estándar serie RS232. La Figura 2.8 muestra dicho módulo:

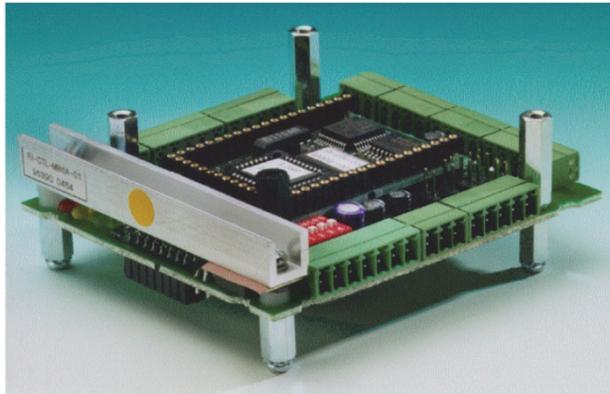


Figura 2.8. Módulo de control RI-CTL-MB2A (Texas Instruments, 2002b)

- Módulo de radiofrecuencia RI-RFM-007B (Texas Instruments, 2002c):

Las principales funciones de este módulo consisten en enviar la energía necesaria a la etiqueta a través de la antena (las etiquetas que funcionan con este equipo son pasivas), demodular la señal de identificación recibida de la etiqueta, y escribir en la misma (en el caso de que sea programable). Para obtener el máximo rendimiento es fundamental que la antena se sintonice con este módulo, es lo que se denomina sintonía en resonancia (Texas Instruments, 2002c).

#### 2.4.1.1 Principales características del lector RFID

Si bien el funcionamiento de este equipo se encuentra ampliamente documentado en (Texas Instruments, 2002a, 2002b, 2002c, 2000), a continuación se realiza un breve resumen de las características más relevantes, que han servido de punto de partida para la realización de las pruebas. Las características a destacar de este equipo son:

a) Alimentación

Existen varias posibilidades de alimentar al equipo. El módulo de control y el módulo de radiofrecuencia se pueden alimentar conjuntamente a partir de un conector denominado ST22. Con esta conexión el equipo ya dispone de la alimentación necesaria para funcionar. La configuración utilizada se muestra en la Figura 2.9.

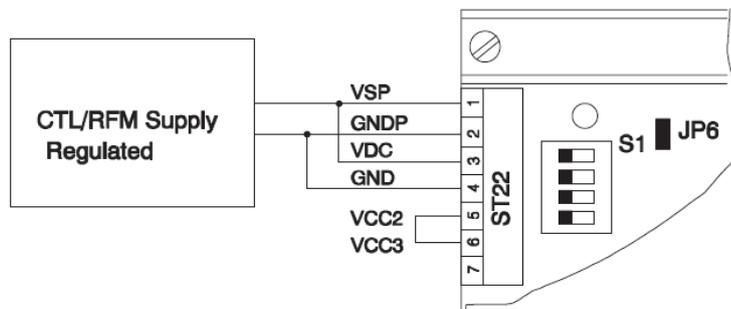


Figura 2.9. Alimentación utilizada con el equipo RFID (Texas Instruments, 2002b)

b) Indicadores

En la parte del módulo de control hay 3 indicadores tipo LED con el siguiente significado:

- Led rojo: parpadea constantemente cuando el equipo está funcionando.
- Led naranja: cuanto mayor sea su intensidad indicará un mayor nivel de ruido presente en el ambiente.
- Led verde: parpadea cuando se está detectando una etiqueta.

c) Opción de *reset* por hardware y activación remota

El módulo de control permite un *reset* externo; esta posibilidad puede ser importante cuando por ejemplo el equipo no esté controlado por ningún ordenador. También dispone de un *jumper* (JP5) para que el dispositivo se active remotamente, es decir, si controlamos el lector mediante PC o microcontrolador, hasta que éste no se encuentre alimentado y no mande una señal por la interfaz serie, el lector no entrará en funcionamiento. Esta opción se ha utilizado para que el lector no funcione mientras el microcontrolador que hace de *host* no esté alimentado.

d) Modos de funcionamiento

En la Tabla 2.3 se muestran los modos de funcionamiento del lector para la transmisión de datos captados (número identificativo). Estos modos se configuran a partir del envío de caracteres ASCII a través del puerto serie del lector.

**Tabla 2.3. Modos del lector RFID** (modificada de Texas Instruments, 2002b)

Modo	Descripción
<i>Normal</i>	En este modo el lector transmite cada nuevo número leído por la interfaz RS232. Un número ya leído no se transmitirá.
<i>Line</i>	Se trata de un modo continuo de lectura. Cada identificación, sea o no el mismo número, se envía a través del puerto serie. Si no se está recibiendo ninguna lectura correcta, el lector envía constantemente el carácter “L”. <i>Ej: LR 4095 4503599627370495&lt;CR&gt;&lt;LF&gt;</i> *CR y LF son caracteres ASCII no imprimibles ( <i>carry return y line feed</i> ).
<i>Executive</i>	En este modo cuando se recibe una identificación correcta el lector lo envía a través del puerto serie precedido del carácter “X”. Una vez enviado el código el lector permanece en un bucle esperando un nuevo comando. <i>Ej: XR 4503 599627370495&lt;CR&gt;&lt;LF&gt;</i> *CR y LF son caracteres ASCII no imprimibles ( <i>carriage return y line feed</i> ).
<i>Gate</i>	En este último modo es similar al modo <i>normal</i> , sólo que cada nuevo número se va almacenando en memoria además de transmitirse vía puerto serie.

Las características más relevantes del lector (considerando la aplicación propuesta en este capítulo) son las siguientes:

- Soporta etiquetas LF (134.2 kHz HDX/FSK).
- Configuración a partir de un protocolo ASCII: el lector es controlable a partir de un protocolo basado en el envío de caracteres ASCII, siendo capaz también de mandar y recibir datos a través del puerto serie.
- La transmisión es de tipo 8N1 (8 bits de datos, sin bit de paridad y un bit de parada) con *handshake* (“acuerdo mutuo” o método para el paro de la transmisión) por software Xon/Xoff.
- Funcionamiento en modo *normal* por defecto.
- Capacidad de sincronización con otros lectores.
- 8 entradas/salidas de propósito general.
- Hardware RS232 integrado.

e) Comunicación serie

Merece especial atención comentar el modo de comunicación del lector. Si el ordenador que hace de *host* (típicamente un PC aunque en esta tesis se ha diseñado una placa basada en un microcontrolador) se encuentra a una distancia del lector menor de 20 m, se puede utilizar la interfaz RS232-C. Como ya se ha dicho, este equipo utiliza por defecto una transmisión serie de tipo 8N1. Para el *handshake* por software que utiliza se tienen los siguientes caracteres:

- $X_{ON}=17_{DEC}$ : enviando este carácter se comienza la transmisión.
- $X_{OFF}=19_{DEC}$ : enviando este carácter cesa la comunicación serie.

Para la conexión serie el lector se conecta mediante un cable serie con el conector ST21 tal y como se muestra en la Figura 2.10.

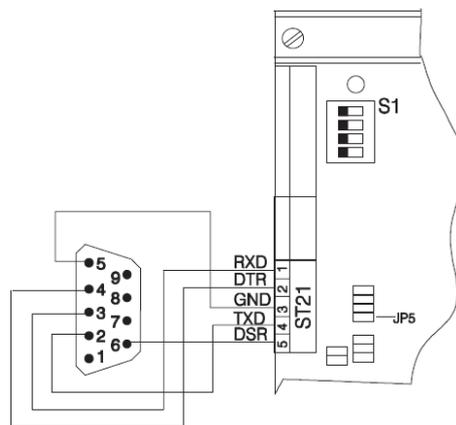


Figura 2.10. Conexión serie mediante el conector ST21 del lector (Texas Instruments, 2002b)

Como se puede observar, se utilizan las siguientes señales:

- RXD: entrada por la que se reciben los datos (desde el *host* al lector).
- TX: salida por la cual envía el lector datos al *host*.
- GND: Referencia o tierra para la interfaz de comunicación.
- DTR: *Data Terminal Ready*: esta señal necesita estar activa para realizar la transmisión, a no ser que se cierre el *jumper* JP5 (Texas Instruments, 2002b).
- DSR: *Data Set Ready*: tiene la misma función que la señal anterior, indicándole al *host* que el lector se encuentra disponible.

A partir de estas señales es posible establecer una comunicación con el lector, pudiendo configurarlo en alguno de los modos descritos en la Tabla 2.3, además de almacenar datos, reprogramar etiquetas o seleccionar el modo de funcionamiento. Es

posible además utilizar un software de prueba que realiza la conexión serie, pero con una interfaz gráfica que facilita al usuario las opciones de programación existentes. En la Tabla 2.4 se muestran los caracteres ASCII que se han considerado de mayor relevancia, así como las respuestas que da el lector, y que son suficientes para configurar el equipo para el tipo de aplicación aquí propuesta. En una de las guías del equipo (Texas Instruments, 2000) se explica en detalle el funcionamiento del protocolo ASCII (programación de las etiquetas, almacenamiento de datos, comandos de configuración del lector, etc).

Tabla 2.4. Principales comandos ASCII(Texas Instruments, 2000)

Carácter	Descripción
<i>L</i>	El lector entra en modo <i>line</i> enviando constantemente el carácter “L” si no se detecta el código de identificación de alguna etiqueta
<i>G</i>	El lector entra en modo <i>gate</i>
<i>X</i>	El lector entra en modo <i>executive</i> .
<i>Esc</i>	Mediante este comando el lector se reinicia a su configuración por defecto
<i>C</i>	Borra la memoria EEPROM de los códigos almacenados
<i>N</i>	Muestra los números ID almacenados en memoria (éstos los almacena el lector en modo <i>Gate</i> )
<i>F</i>	Cambia el formato de envío de los números de identificación de decimal a hexadecimal.
<i>P</i>	Mediante este comando y un posterior envío del código de identificación se pueden programar las etiquetas R/W

Otro protocolo soportado por el lector es el *Tiris Bus Protocol*, adecuado para la comunicación entre lectores. Este protocolo no se ha utilizado en el desarrollo del prototipo.

## 2.5 DISEÑO DE ANTENAS DE ACOPLAMIENTO INDUCTIVO

**Objetivo:** *Diseño de antenas de acoplamiento inductivo para el lector RFID.*

**Resultados obtenidos:** *a partir de estas especificaciones se pudo establecer un primer marco de aplicación y adaptabilidad del equipo.*

Una vez comprobado el funcionamiento del lector RFID y su interfaz de comunicación, se ha establecido una metodología para el diseño de antenas de acoplamiento inductivo. Se pretende de este modo poder establecer los parámetros necesarios para fabricar antenas a medida para su acople a una máquina industrial específica ya que, de lo contrario, sin tener una cierta flexibilidad en la geometría y dimensiones de la antena, la aplicación del prototipo quedaría muy restringida. En los siguientes apartados se establecen: a) las características y requisitos básicos de las antenas de acoplamiento inductivo para el lector RFID utilizado, b) el modelado y construcción de antenas, c) una guía de diseño y sintonización de las mismas para conseguir un rendimiento óptimo.

### 2.5.1 La antena del lector RFID

Como ya se ha comentado, la antena es el dispositivo encargado de transmitir y recibir los datos, así como de proporcionar la energía necesaria para que las etiquetas (pasivas) puedan enviar su código de identificación. El lector funciona por acoplamiento inductivo, generando un campo magnético. La geometría de la antena (circular, cuadrada, *stick* o focalizada, rectangular, en espiral...) determina el patrón de campo generado. El campo magnético es un campo vectorial, por lo que la orientación relativa entre las antenas de la etiqueta y del lector afecta a la cantidad de energía transmitida, existiendo una posición máxima y una posición nula, para la cual la etiqueta no recibe energía alguna (esto ocurre cuando la superficie de la antena de la etiqueta, suponiéndola por simplificación una espira, no es atravesada por ninguna línea de campo magnético). En la Figura 2.11 se muestran las líneas de campo magnético generadas por una antena cuadrada, y la orientación de máxima inducción de energía de una etiqueta según su posición en el campo magnético generado por la antena.

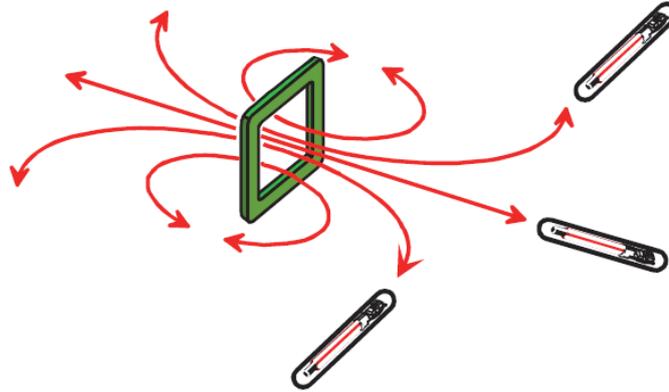


Figura 2.11. Líneas de campo magnético generadas

Suponiendo la antena de la etiqueta como un conjunto de  $N$  espiras de cable conductor apiladas de espesor despreciable respecto a su radio, la ley de *Faraday* o ley de inducción sigue la siguiente ecuación:

$$u = -N \frac{\partial \psi}{\partial t}, \quad (2.1)$$

donde

$u$ : tensión inducida en la antena de la etiqueta (fuerza electromotriz, en voltios)

$N$ : número de espiras de la antena de la etiqueta

$\psi$ : flujo magnético (en webers).

El signo negativo de la ecuación (2.1) indica que la tensión inducida varía de forma opuesta a la variación del flujo magnético (lo que se conoce como ley de *Lenz*). El flujo magnético  $\psi$  de la ecuación (2.1) representa la suma total del campo magnético que atraviesa el área encerrada por la antena,  $S$ , representada por la integral de superficie de la siguiente ecuación:

$$\psi = \int_S B \, dS, \quad (2.2)$$

donde:

$B$ : vector de campo magnético (en Teslas).

$S$ : superficie encerrada por la espira que representa la antena de la etiqueta, y cuyo vector asociado es perpendicular al plano que contiene a ésta (en metros).

Tanto  $S$  como  $B$  son magnitudes vectoriales. El producto escalar de la ecuación (2.2) muestra cómo el valor del flujo magnético que pasa a través de la antena de la etiqueta

va a depender de la orientación relativa de ésta con la antena del lector. Este producto escalar se hace nulo cuando el ángulo formado entre  $B$  y  $S$  es de  $90^\circ$ , y se hace máximo cuando el ángulo es de  $0^\circ$  (en este último caso los planos de las superficies que contienen las espiras que representan las antenas de etiqueta y lector estarán en paralelo, tal y como se muestra en la Figura 2.12).

La ley de *Faraday* establece que un campo magnético variante en el tiempo, cuyas líneas de campo atraviesan una superficie limitada por un conductor, induce una tensión sobre el mismo. Cuando la etiqueta de la antena y del lector se encuentran próximas, el campo magnético generado por la antena del lector induce una tensión en la antena de la etiqueta (representada en la Figura 2.12 por una simple espira) denominada fuerza electromotriz o simplemente EMF (*electromotive force*) y que se corresponde con la tensión  $u$  de la ecuación (2.1). Esta tensión inducida provoca un flujo de corriente.

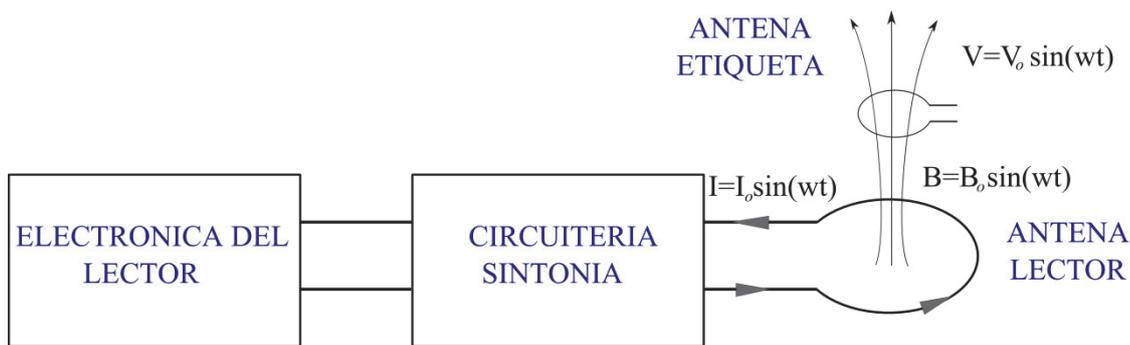


Figura 2.12. Inducción de tensión en la etiqueta (modificada de Microchip Technology, 2003)

Por tanto, lo que se consigue es inducir una tensión que permite alimentar al chip de la etiqueta. La antena del lector, por ejemplo la de la Figura 2.12, está formada por espiras de cable conductor rectangulares por las que circula una corriente variante en el tiempo. Este conjunto de espiras dan lugar a una inductancia. De la teoría del electromagnetismo (Finkenzeller, 2003), se puede afirmar que cualquier conductor por el que circula una corriente variante en el tiempo genera un campo magnético también variante. De acuerdo con la ecuación (2.1) antes enunciada, parte de las líneas de flujo de campo magnético atravesarán la antena de la etiqueta, induciendo una tensión variante en el tiempo, que será rectificadada en la propia etiqueta para alimentar al chip que contiene, siendo éste el principio básico de transmisión de energía que se utiliza en el acoplamiento inductivo.

La antena del lector RFID considerado forma parte de un circuito resonante<sup>4</sup>, y cuyo punto de trabajo debe ser aquél con el que se consigue que circule una corriente máxima, y de este modo, generar el campo magnético de mayor intensidad; siendo en este caso a la frecuencia de trabajo, 134.2 kHz (frecuencia de resonancia). Si la antena no se encuentra sintonizada, el rendimiento del equipo disminuirá, lo que se traduce en un rango de lectura menor (las etiquetas tendrán que estar más cerca de la antena del lector para poder enviar su código de identificación).

Existen diferentes expresiones matemáticas que permiten modelar la inductancia total de una antena en función de su geometría (circular, cuadrada, espiral, de una o varias capas, etc). En la Figura 2.13 se muestran algunas formas geométricas de antena. Como referencia, en cada una de las geometrías se indican los parámetros de los que depende la inductancia final, y cuyos modelos se detallan en (Microchip Technology, 2003).

---

<sup>4</sup> En términos generales este tipo de circuitos se definen como aquellos formados por inductancias y condensadores en los que a ciertas frecuencias sus impedancias se cancelan, siendo la corriente que circula máxima y dependiente exclusivamente de la componente resistiva del circuito.

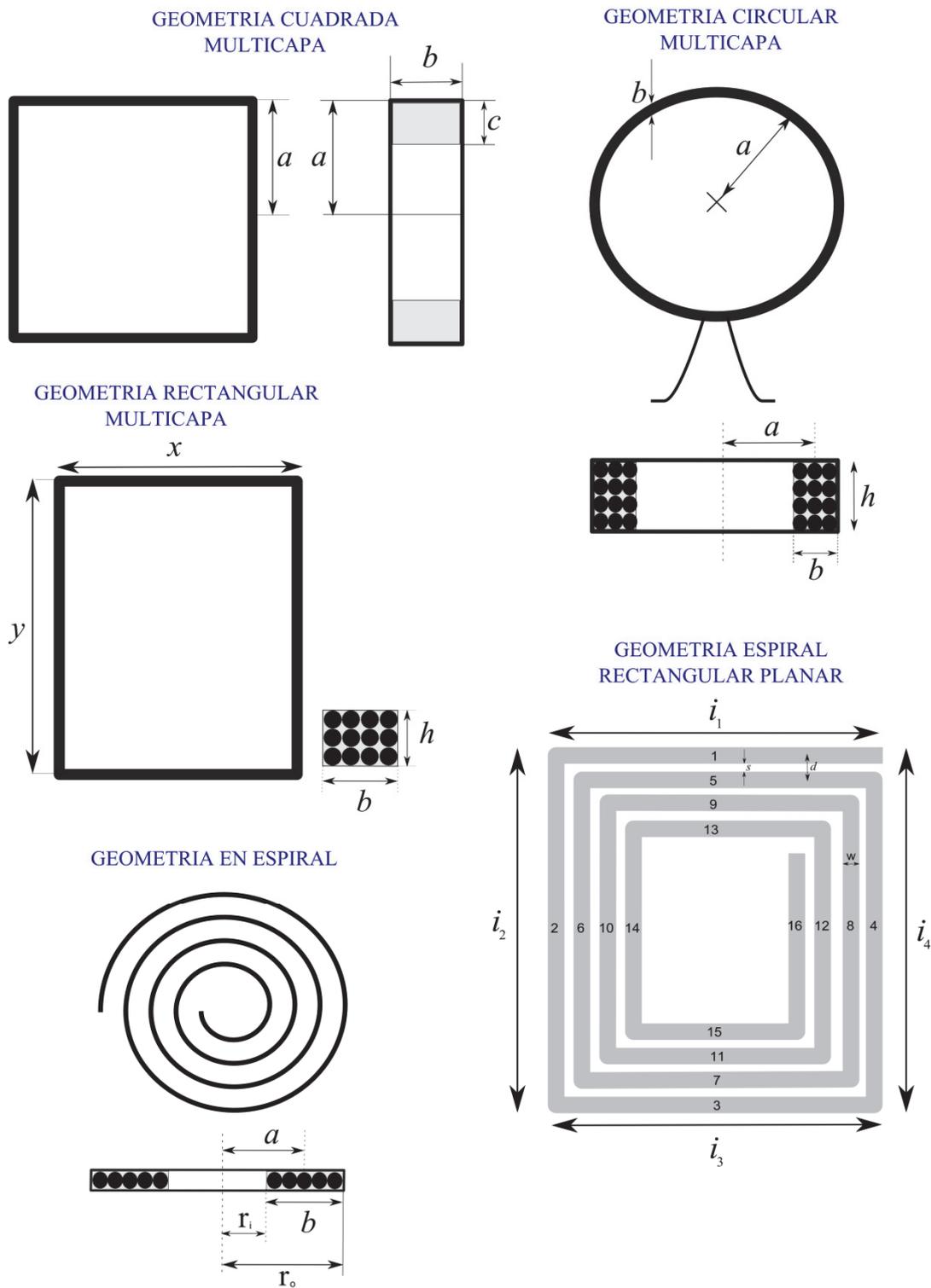


Figura 2.13. Posibles geometrías de antenas de acoplamiento inductivo (creada a partir de Microchip Technology, 2003)

### 2.5.1.1 Requisitos específicos de la antena del lector RFID

Una vez explicado cómo proporciona la antena energía a la etiqueta, los principales requisitos que se deben cumplir para un rendimiento óptimo en el equipo RFID utilizado son:

a) Conseguir una inductancia de la antena entre 25.5  $\mu$ H y 28.5  $\mu$ H

Dentro de este rango es posible sintonizar el equipo utilizando unos *jumpers* que conectan y desconectan un conjunto de condensadores disponibles en el módulo de radiofrecuencia, concretamente el módulo RI-RFM-007B (Texas Instruments, 2002c). En un modelo del módulo de radiofrecuencia anterior, concretamente el modelo RI-RFM-104B (Texas Instruments, 2002a) que también se utilizó en las pruebas, en lugar de condensadores se disponía de una bobina regulable. En cualquiera de los dos casos se debe conseguir una inductancia dentro del rango comentado (Texas Instruments, 2002d) y el procedimiento de sintonía que se explica en este capítulo es similar.

- El valor del punto de resonancia es de 27  $\mu$ H. Alcanzar este valor es determinante en el rendimiento del equipo.

b) Factor de calidad elevado (100)

- Un factor de calidad elevado aumenta el alcance y la transmisión de energía, tal y como se ilustra en la Figura 2.14. El fabricante recomienda un factor de calidad para este equipo mayor o igual a 100 (Texas Instruments, 2002d).
- Se consigue además mayor inmunidad al ruido.
- El factor de calidad de una antena viene dado por la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{2\pi fL}{R}, \quad (2.3)$$

donde:

$f$ : 134200 Hz (134.2 kHz)

$L$ : inductancia de la antena (en Henrios)

$R$ : resistencia del cable a la frecuencia de trabajo (134.2 kHz)

Aunque la resistencia del cable debería medirse a 134.2 kHz debido al efecto piel<sup>5</sup>, el cálculo del factor de calidad  $Q$  con la resistencia medida en corriente continua (DC) da una buena aproximación. La profundidad del conductor a la que la densidad de corriente cae un 37% (esto es,  $1/e$ ) de su valor respecto a la densidad de corriente en la superficie se le denomina “profundidad de la piel” (*skin depth*) y depende de la frecuencia de la corriente, entre otros factores. El efecto global es una disminución en el área de la sección transversal del conductor, lo que por tanto aumenta la impedancia del cable y disminuye el factor de calidad  $Q$ . La ecuación (2.4) proporciona un cálculo aproximado de la profundidad de la piel  $P$  (en mm) para nuestro equipo, donde  $f_{res}$  representa la frecuencia de resonancia:

$$P = \frac{0.064}{\sqrt{f_{res}(Hz)}} \rightarrow \frac{0.064}{\sqrt{134200}} = 0.17 \text{ mm}, \quad (2.4)$$

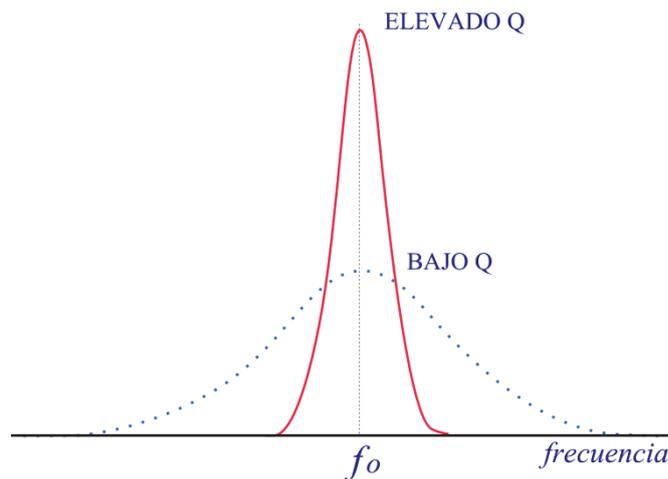


Figura 2.14. Influencia de un elevado  $Q$  en la transmisión de energía

c) Baja resistencia del cable ( $0.3 \Omega$ )

En relación a lo anteriormente comentado, la resistencia del cable afecta al rendimiento de la antena. Un valor resistencia elevado disminuye el factor de calidad  $Q$ . Para que éste no baje de 100 o se mantenga cercano a este valor, la resistencia del cable no debe superar  $0.3 \Omega$ . Esto se puede comprobar en la ecuación (2.3).

<sup>5</sup> En DC, las cargas transportadas se distribuyen de forma equitativa a lo largo de la sección del cable conductor. Conforme la frecuencia aumenta, también lo hace el campo magnético en el centro de conductor, aumentando la reactancia en la zona central del cable, lo que resulta en una mayor impedancia para el flujo de corriente en esa zona, desplazando las cargas de la parte central del cable a las zonas más externas, disminuyendo la densidad de corriente en el centro y aumentando en sus extremos, esto es lo que se denomina efecto piel.

d) Sintonización del equipo en el punto de resonancia

El módulo de radiofrecuencia del equipo utiliza la antena como transmisor de energía. Las antenas de acoplamiento inductivo se comportan como bobinas que generan un campo magnético en función de la corriente que circula por ellas. A mayor corriente, mayor será el campo magnético generado por la antena, y mayor será la transmisión de energía de la antena a las etiquetas. El máximo valor de corriente se consigue cuando el circuito trabaja en lo que se denomina punto de resonancia, y dado que el lector RFID trabaja a 134.2 kHz, el valor de la inductancia de la antena será determinante para conseguir que, a esa frecuencia, el circuito se encuentre trabajando en dicho punto de resonancia.

Sólo si la antena está sintonizada en resonancia se alcanzará un rendimiento óptimo del equipo RFID.

### 2.5.2 Patrón de lectura de la antena

La distancia de lectura, además de la intensidad de campo magnético generada por la antena del lector, depende de la orientación de la etiqueta respecto ésta. Además, los patrones de lectura dependen de la geometría de la antena (Texas Instruments, 1996). En la Figura 2.15 se muestra la diferencia entre los patrones de lectura de las antenas rectangulares frente a las antenas tipo *stick* (con forma de bastón).

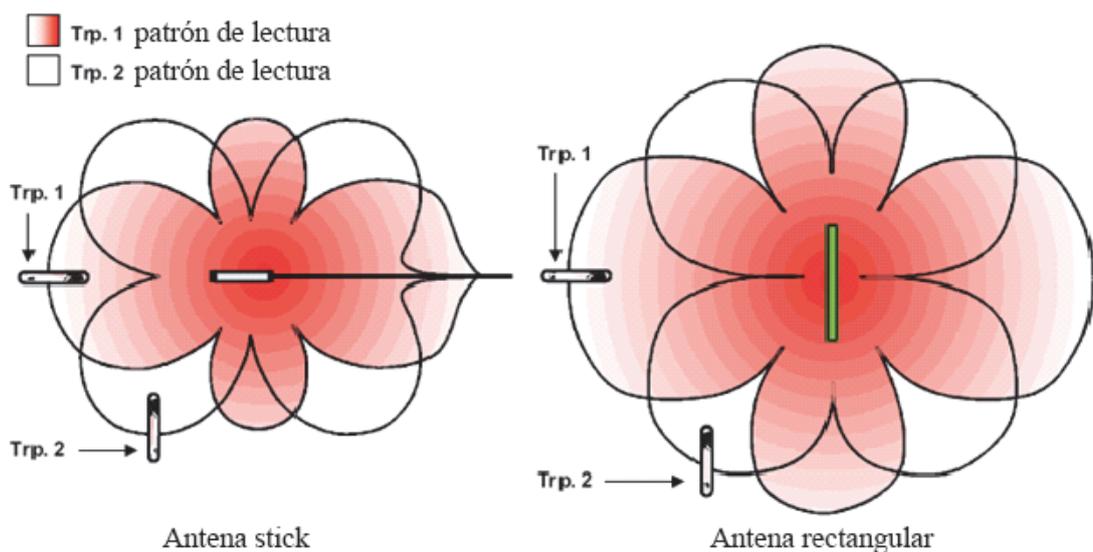
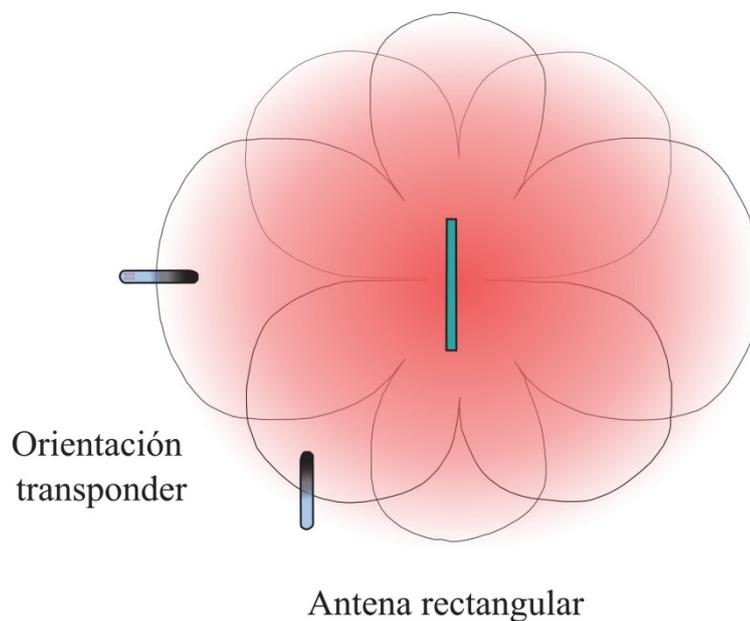


Figura 2.15. Patrón de lectura según la antena y la orientación de la etiqueta (Texas Instruments, 2002e)

La dependencia del alcance en función de la orientación es un handicap para la aplicación aquí propuesta, pues, suponiendo que se quisiera detectar la presencia de una parte del operario como puede ser la mano, en la cual se ha acoplado una etiqueta (bien en una muñequera, en un anillo o un guante convenientemente adaptado), la orientación con la que introduzca la mano, y por tanto la etiqueta, dará lugar a una dependencia de la distancia de lectura. Una posible solución consiste en la utilización de varias etiquetas con una orientación constante entre ellas, de este modo los patrones de lectura de la Figura 2.15 se solapan y teóricamente no va a existir, en estas condiciones, una posición en la que una de las dos etiquetas no se detecte. La Figura 2.16 ilustra lo comentado.



**Figura 2.16. Solape de patrones de lectura (modificada de Texas Instruments, 2002c)**

Como se puede observar, el patrón de lectura ahora sería, en condiciones ideales, muy semejante al de una circunferencia respecto al punto central la antena. Sin embargo, para que esto sea posible es necesario que el lector RFID posea la capacidad de detectar varias etiquetas de forma simultánea, no siendo éste el caso. En el apartado de conclusiones se comenta explícitamente esta dificultad.

Por último, en la Figura 2.17 se muestran las etiquetas que son compatibles con el equipo RFID empleado y con las que puede trabajar cualquier antena que cumpla las características comentadas y se conecte al equipo. En las pruebas realizadas se han utilizado las etiquetas de cristal de 32 mm de longitud, debido principalmente a su facilidad de acople.



Figura 2.17. Etiquetas compatibles con el equipo RFID utilizado<sup>6</sup>

### 2.5.3 Metodología de diseño

En base a los dos apartados anteriores y a la información contenida en (Texas Instruments, 2002c, 2002d, 1996) acerca del diseño de antenas de acoplamiento inductivo, se necesitan estudiar los siguientes aspectos:

- Sintonía de la antena al punto de resonancia (27  $\mu$ H)
  - o Factor Q
- Selección de cable de baja resistencia
- Cola de la antena
- Resintonía de la antena ante la presencia de metal cercano

Se ha utilizado la geometría rectangular, de modo que este tipo de antena funcione de forma similar a una “cortina invisible” y cubra la zona a través de la cual el operario trabaja, pretendiéndose de esta manera que se detecte una posible situación de riesgo elevado, y se realice con suficiente antelación el paro de emergencia.

A continuación se explican detalladamente las etapas que se llevaron a cabo para la construcción y sintonización de antenas de acoplamiento inductivo.

---

<sup>6</sup> <http://www.tirfid.com>. En esta página se puede consultar la gama de etiquetas RFID compatibles con el lector utilizado en esta tesis.

a) Sintonía de la antena al punto de resonancia (27  $\mu$ H)

Si la inductancia de la antena no está dentro del rango especificado por el lector RFID, esto es, entre 25.5 y 28.5  $\mu$ H, el rendimiento de la transmisión de energía de la antena a la etiqueta será bajo, por lo que el alcance disminuirá de forma drástica, pudiendo incluso no detectarse etiqueta alguna. Se elaboró un programa en Matlab mediante el cual se estima el número de vueltas de cable necesarias para conseguir la inductancia requerida, considerándose la geometría y dimensiones de la antena. El resultado obtenido es una primera aproximación que posteriormente se ajusta. Para una antena rectangular multicapa como la de la Figura 2.13 (geometría rectangular multicapa), la ecuación de la inductancia es la siguiente (Microchip Technology, 2003):

$$L = \frac{0.0276 \cdot (CN)^2}{1.908C + 9b + 10h}, \quad (2.5)$$

donde:

$L$ : valor de la inductancia (en  $\mu$ H)

$N$ : número de vueltas

$x$ : ancho de la antena (cm)

$y$ : largo de la antena (cm)

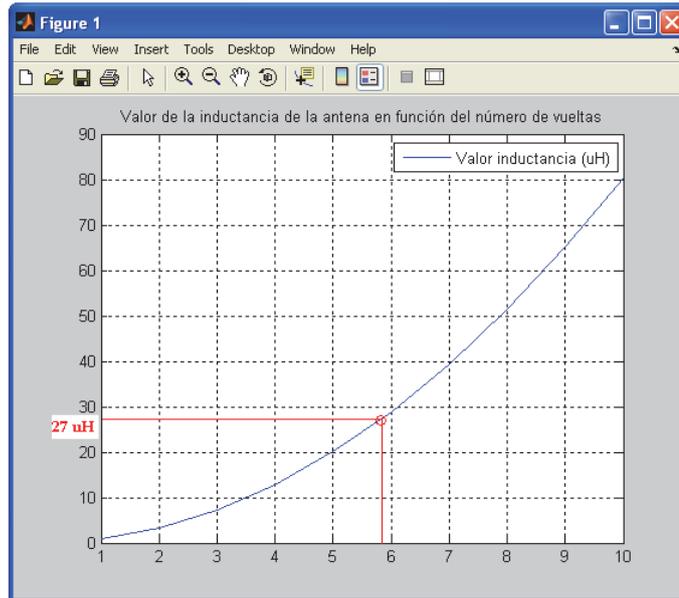
$C = x + y + 2h$  (cm)

$b$ : anchura de la sección transversal (cm)

$h$ : altura de la sección transversal (cm)

Observando la ecuación y la sección transversal de este tipo de antena, se puede considerar una aproximación para una antena monocapa (el cable se enrolla de forma que no se monte sobre sí mismo) con varias vueltas de cable haciendo considerando  $h$  muy pequeño y midiendo la anchura  $b$ . Se especificaron los valores de 0.03 cm para  $h$  y 1.5 cm para  $b$ . Hay que tener en cuenta que el objetivo de este cálculo es el de obtener una aproximación del valor final de la inductancia de la antena.

Suponiendo una antena rectangular de 28 cm de ancho y 34 de largo, utilizando la ecuación (2.5), e iterándola para valores enteros de  $N$  con los demás valores constantes, se obtiene el valor de la inductancia de la antena en función dicho parámetro, tal y como se muestra en la Figura 2.18.



**Figura 2.18.** Valor de la inductancia de una antena rectangular en función del número de vueltas

En el eje de ordenadas se tiene el valor de la inductancia en  $\mu\text{H}$ , en función del número de vueltas (representadas en el eje de abcisas). De este modo, el valor entero que más se aproxima a los  $27 \mu\text{H}$  requeridos es 6, para el cual se tiene un valor teórico de  $28.945 \mu\text{H}$ . Ya que esto no deja de ser un valor teórico, se utilizó un medidor de inductancia para conocer el valor real. Como primera prueba se utilizó el marco de una antena para equipos de radio de 15 cm de lado, tal y como se muestra en la Figura 2.19. Introduciendo los valores de las dimensiones en el programa creado en Matlab, se obtuvo que la mejor aproximación a los  $27 \mu\text{H}$  es  $N = 8$ . Para este valor, a partir de la ecuación (2.5) se obtiene un resultado de  $27.8 \mu\text{H}$ . Una vez construida la antena se obtuvo un valor real de  $28.6 \mu\text{H}$ , por lo que los cálculos teóricos se pueden dar por válidos, ya que la aproximación es suficiente para posteriormente realizar un ajuste al punto de sintonía de la antena ( $27 \mu\text{H}$ ).



**Figura 2.19.** Antena y medidor de inductancia

Como primera prueba, se conectó esta antena con el lector RFID, los resultados fueron satisfactorios, pues era posible detectar y programar etiquetas con el lector.

b) Factor  $Q$

A pesar de que los resultados fueron satisfactorios, se utilizó un cable de cobre aislado de 0.3 mm de diámetro y no uno de baja resistividad, por lo que aún es factible mejorar el rendimiento de la antena. El valor de la resistencia influye en el valor final de  $Q$ , de modo que una elevada resistencia hará que la transmisión de energía del lector a la etiqueta sea pobre; esto se puede comprobar en la ecuación (2.3), donde la resistencia del cable está en el denominador y por tanto conforme aumenta su valor disminuye  $Q$ . Así, para la construcción de antenas que verdaderamente consigan un alcance máximo con el equipo, es indispensable la utilización de un cable de baja resistencia. Para ello se utilizó un tipo de cable denominado *litze wire*.

En corriente alterna (AC) la corriente que fluye por un cable conductor circula por su parte más externa, ya que la parte central se encuentra distorsionada por corrientes remolino (*eddy currents*). A mayor frecuencia, mayor impedancia del cable, por lo que, observando la ecuación (2.3), es evidente que disminuirá el valor de  $Q$ . Para mantener un valor elevado de  $Q$  es importante mantener baja la resistencia del cable a la frecuencia de funcionamiento. El cable *litze wire* consigue esto ya que está compuesto de varios cables aislados y no de uno, reduciendo el efecto piel descrito en el apartado 2.5.1.

Para los prototipos de antenas fabricadas a partir del programa creado en Matlab se consiguieron valores de resistencia (en DC) en torno a los 0.1 y 0.2  $\Omega$ , lo que asegura un factor de calidad suficiente para un rendimiento adecuado de las antenas.

c) Cola de la antena

Es importante que la cola de la antena mantenga los dos cables juntos, de este modo, el campo magnético generado se cancela en esa zona (Texas Instruments, 2002d). Por lo general, la cola de la antena debe ser tan corta como sea posible ya que la resistencia extra que agrega disminuye el factor  $Q$  (y por tanto el rendimiento). De forma aproximada cada metro de cable de cola supone 0.5  $\mu\text{H}$  más al total. La Figura 2.20 muestra diferentes posibilidades para mantener los cables de la antena juntos en la cola. En las tres primeras opciones se utiliza un cable protector termo-retráctil o una malla de

plástico flexible. En la casuística aquí planteada, ya que el lector RFID está cerca de la antena, esto no supone un problema importante, así que para realizar las pruebas simplemente se decidió entrecruzar el cable.

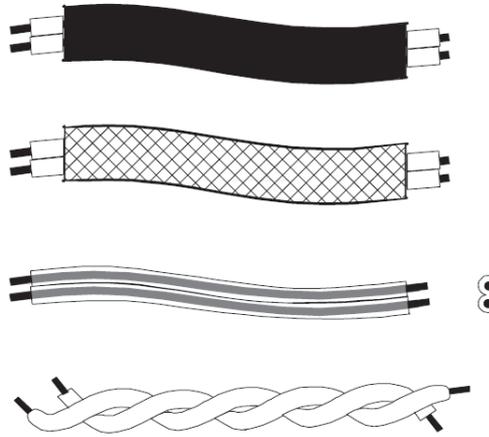


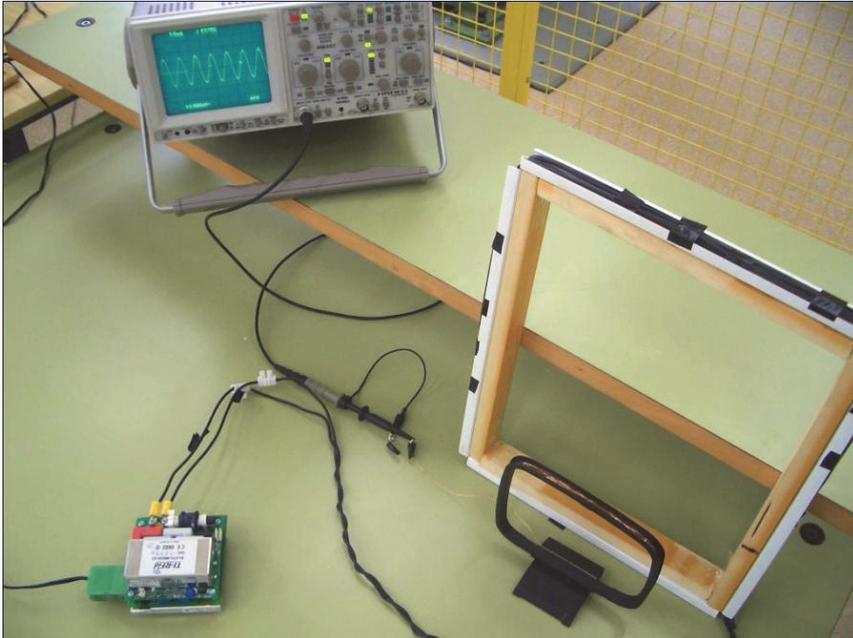
Figura 2.20. Cola de la antena que conecta con el lector RFID (Texas Instruments, 2002d)

### 2.5.3.1 Ajuste al punto de resonancia

Una vez creados los prototipos cumpliendo las especificaciones básicas que requiere el lector RFID, como son la utilización de un cable de baja resistencia para obtener un factor de calidad elevado, y una primera aproximación de la inductancia al valor de  $27 \mu\text{H}$ , es necesario establecer un procedimiento para el ajuste al punto de resonancia y de este modo asegurar que la antena funcione a pleno rendimiento (máxima transmisión de energía y por tanto máximo alcance). Si el valor de la inductancia de la antena se encuentra relativamente cercano a los  $27 \mu\text{H}$ , dentro del intervalo  $25.5 - 28.5 \mu\text{H}$ , el fabricante asegura que, a partir de un conexionado de los condensadores del módulo de radiofrecuencia RI-RFM007B (o una inductancia regulable en un modelo anterior que se utilizó, RI-RFM-104B), es posible alcanzar el punto de resonancia.

Se consideran dos métodos de ajuste: el primero consiste en utilizar una antena como si fuera una etiqueta, ponerla a una distancia concreta respecto a la antena que se está utilizando con el lector, y conectarla al osciloscopio para medir la tensión inducida en la misma. En esta situación se van conectando los distintos condensadores de los que consta el módulo de radiofrecuencia RFID (o se va modificando la inductancia regulable para el modelo anterior que se utilizó) a la vez que se observa cómo aumenta o disminuye la tensión inducida en la antena conectada al osciloscopio. Este proceso se realiza hasta que se observa la máxima amplitud de la tensión inducida, y será entonces

cuando se haya alcanzado el punto de resonancia. La Figura 2.21 muestra lo anteriormente comentado, donde se utilizó la antena de la Figura 2.19 como receptora de la energía generada por la antena conectada al lector RFID, que como se puede observar se realizó en un marco de plástico y madera.



**Figura 2.21. Método de ajuste al punto de resonancia**

El otro método consiste en conectar un equipo de sintonía compatible con el lector RFID. En este caso, con tan solo ir conectando los condensadores del módulo de radiofrecuencia (o modificando la bobina regulable en el caso del modelo previo utilizado), el propio equipo irá indicando mediante un conjunto de *leds* cuándo el lector está sintonizado. Si bien este método es más sencillo, el primero posibilita realizar la sintonización sin la necesidad utilizar este hardware adicional.

### *2.5.3.2 Cercanía de metales y proceso de sintonía*

Si bien con las pruebas realizadas hasta ahora se consiguen unos resultados satisfactorios ante la presencia de metales, como por ejemplo una barra de hierro cercana o incluso un marco metálico alrededor de la antena, no ocurre lo mismo si existe una superficie plana de metal, y de dimensiones considerables, en la periferia de la antena del lector. Con la antena sintonizada y funcionando a máximo rendimiento (es decir, en el punto de resonancia) se realizó el primero de los métodos comentados en el apartado anterior (Figura 2.21). Se pudo comprobar que con el acercamiento de una plancha metálica a la antena del lector, la tensión inducida en la antena conectada al

osciloscopio disminuye. Esta disminución es aproximadamente proporcional a la cercanía de la chapa metálica con respecto a la antena transmisora. Además, el alcance de lectura de las etiquetas disminuía en más de un 70 %. Una vez comprobado este comportamiento, se midió la inductancia de la antena con la plancha metálica cercana a ésta, a unos 5 cm; observándose una disminución de su inductancia en hasta 10  $\mu\text{H}$ . La chapa metálica y la antena empleada se muestran en la Figura 2.22.

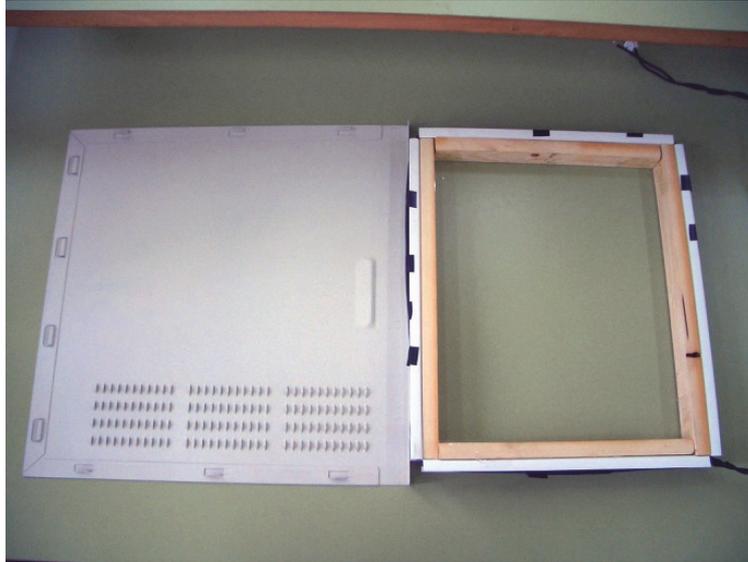


Figura 2.22. Antena y chapa de metal empleadas

El efecto de materiales de metal en aplicaciones de radiofrecuencia siempre existe, y si la antena está acoplada muy cerca de material metálico la inductancia disminuirá, sobre todo si dicho bloque metálico es de grandes dimensiones. Al disminuir la inductancia de la antena, el equipo trabaja fuera de su rango, y no es posible conseguir que funcione en su punto de resonancia con tan sólo los condensadores de los que dispone el lector (o la inductancia regulable según el modelo empleado).

Para los casos en los que la inductancia de la antena no se encuentra en el rango de los 25.5 – 28.5  $\mu\text{H}$  el fabricante propone la conexión de condensadores extra en serie o en paralelo con la antena, dependiendo de la inductancia de ésta (Texas Instruments, 2002d). De este modo se obtiene un circuito LC y es posible conseguir que el equipo vuelva a estar dentro del rango admisible para que sea sintonizado. La frecuencia de resonancia del circuito LC formado entre la antena y el lector se puede calcular a partir de la ecuación (2.6):

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.6)$$

Como se puede observar en la ecuación anterior, modificando  $L$  y  $C$  es posible ajustar la frecuencia de resonancia (en el caso del lector utilizado ésta es de 134.2 kHz). Si la inductancia de la antena es muy elevada, añadiendo, además de los condensadores o la bobina regulable de los que consta el módulo de radiofrecuencia, un condensador en serie se podrá alcanzar la frecuencia de resonancia; por el contrario si la inductancia es muy baja, se añadirá un condensador en paralelo. Los valores del condensador a añadir en función de la inductancia de la antena se muestran en la tabla siguiente:

**Tabla 2.5. Valores de los condensadores en función de la inductancia de la antena**  
(Texas Instruments, 2002f)

Inductancia (μH)	Capacitancia (μF)	Inductancia (μH)	Capacitancia (μF)
54.0	0.061	25.5	0.003
51.0	0.060	25.0	0.004
48.0	0.067	24.5	0.005
45.0	0.076	24.0	0.007
43.0	0.089	23.5	0.008
41.0	0.100	23.0	0.009
40.0	0.110	22.5	0.010
39.0	0.120	22.0	0.012
38.0	0.130	21.5	0.013
37.0	0.140	21.0	0.015
36.0	0.160	20.5	0.017
35.0	0.180	20.0	0.018
34.0	0.200	19.5	0.020
33.5	0.220	19.0	0.022
33.0	0.230	18.5	0.024
32.5	0.260	18.0	0.026
32.0	0.280	17.5	0.028
31.5	0.310	17.0	0.031
31.0	0.350	16.5	0.033
30.5	0.400	16.0	0.036
30.0	0.470	15.5	0.038
29.5	0.560	15.0	0.042
29.0	0.700	14.5	0.045

CONEXIÓN EN SERIE

CONEXIÓN EN PARALELO

Los condensadores utilizados deben soportar corrientes relativamente elevadas, del orden de 12 A, pues trabajando en el punto de resonancia la intensidad que circula por la antena es máxima, y su valor tan sólo depende de la resistencia del circuito, la cual es relativamente baja. El fabricante recomienda condensadores de polipropileno.

Se dispusieron condensadores de 0.22, 0.33, 0.56, 0.68  $\mu\text{F}$  en una placa perforada, tal y como se muestra en la Figura 2.23.

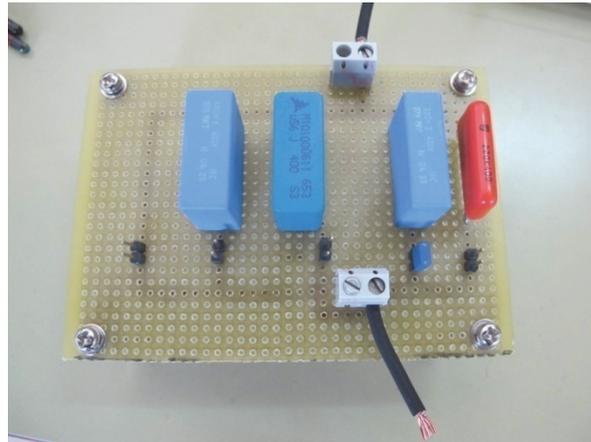


Figura 2.23. Placa perforada de condensadores para sintonía de la antena

Con los valores comentados es posible cubrir un rango desde 25 a 35  $\mu\text{H}$  aproximadamente, el cual es suficientemente amplio para tener una cierta flexibilidad en la construcción de antenas a partir de los cálculos teóricos realizados en Matlab, y que proporcionan una aproximación del número de vueltas de cable necesarias para obtener 27  $\mu\text{H}$  especificando las dimensiones y geometría de la antena.

Como regla general, en el diseño de la antena, la inductancia total tiende a ser mayor, del orden de los 35  $\mu\text{H}$ , pues el número de vueltas ha de ser obviamente un número entero y el crecimiento no es lineal, tal y como se mostró en la Figura 2.18, además de que la propia cola de la antena añade algo más de inductancia.

Realizando la prueba de ajuste de resonancia con la chapa metálica cercana a la antena, ya se ha comentado que la tensión máxima inducida en la antena conectada al osciloscopio disminuía, sin embargo conectando la placa de condensadores, seleccionando el condensador adecuado y volviendo a realizar un ajuste, es posible conseguir valores mucho más elevados de tensión, es decir, el circuito de la antena del lector trabaja en su punto de resonancia, aumentando considerablemente el rendimiento del equipo.

El motivo de este procedimiento se debe a que cuando la antena se instala en una máquina industrial el efecto es similar, disminuyendo la inductancia (aunque menos que en el caso de una chapa metálica) de la antena y requiriéndose utilizar alguno de los condensadores de la Figura 2.23 para resintonizar el equipo.

Podría pensarse entonces que cada vez que se acerque un objeto de material metálico habría que resintonizar la antena. Si bien es cierto que la inductancia va a variar ligeramente con la presencia o no de un metal, en las pruebas de laboratorio se ha podido comprobar que el efecto que tiene un gran bloque metálico es mucho más drástico en el rendimiento del equipo que por ejemplo el efecto una barra metálica. Además, la situación de la máquina respecto a la antena es permanente, entendiéndose por situación la distancia relativa entre la antena y la máquina, y es por ello que, dado que el equipo trabaja siempre bajo esta circunstancia, es necesario que trabaje a su máximo rendimiento bajo esta situación, es decir, en su punto de resonancia.

#### *2.5.3.3 Guía de diseño de antenas de acoplamiento inductivo*

A partir de las pruebas realizadas es posible establecer una guía de diseño de construcción de antenas de acoplamiento inductivo. En este apartado se resumen las fases explicadas en el apartado 2.5. Inicialmente, mediante programa se estima el número de vueltas necesarias para obtener un valor de inductancia cercano a los 27  $\mu\text{H}$  (valor en el que el equipo trabaja en el punto de resonancia). Por último, se sintoniza la antena en función de dónde se acople ésta, haciendo uso si es necesario de la placa construida de condensadores, cuando la antena ha de acoplarse cerca de una masa de metal considerable. La metodología de construcción e instalación de antenas de acoplamiento inductivo se resume en los siguientes puntos:

a) Diseño mediante el programa elaborado con Matlab

A partir de programa se especifican las dimensiones y forma de la antena (ancho y largo, geometría rectangular, circular, espiral, etc.) y se obtiene una estimación del número de vueltas de cable para la geometría de la antena especificada.

b) Construcción de la antena

Mediante un marco no metálico, por ejemplo de material plástico, y mediante guías o regletas, se enrolla cable del tipo *litze wire* (o equivalente, siempre y cuando tenga

baja resistencia) con el número de vueltas obtenido anteriormente, de tal modo que dicho número se corresponda con una inductancia mayor o igual a 27  $\mu\text{H}$ .

c) Entrecruzado de la cola de la antena

Se entrecruzan los cables de la cola o se utiliza otra de las opciones de la Figura 2.20. El tamaño de la cola deberá ser lo suficientemente largo para conectar la antena con el lector RFID, intentándose siempre utilizar la menor longitud posible.

d) Acople de la antena

Se instala la antena en la zona de trabajo que se pretende monitorizar. Puede acoplarse mediante algún tipo de fijación con el marco, mediante taladros, o incluso mediante el uso de cinta adhesiva especial para pegado en zonas metálicas si se requiere, o algún soporte diseñado específicamente.

e) Ajuste al punto de resonancia

Una vez instalada la antena y en las condiciones con las que va a trabajar, se mide su inductancia, y si ésta se encuentra fuera del rango de 25.5 – 28.5  $\mu\text{H}$  se conecta la placa de condensadores de la Figura 2.23. Una vez comprobado esto, se realiza el ajuste al punto de resonancia explicado en el apartado 2.5.3.1 y, en el caso de haber conectado la placa de condensadores, se realiza el mismo procedimiento con el condensador cuyo valor se corresponda con el de la Tabla 2.5 (si la placa no tiene el valor exacto del condensador especificado en la tabla, se escogerá aquél con el valor más próximo).

La Figura 2.24 muestra el diagrama de flujo de los pasos explicados anteriormente.

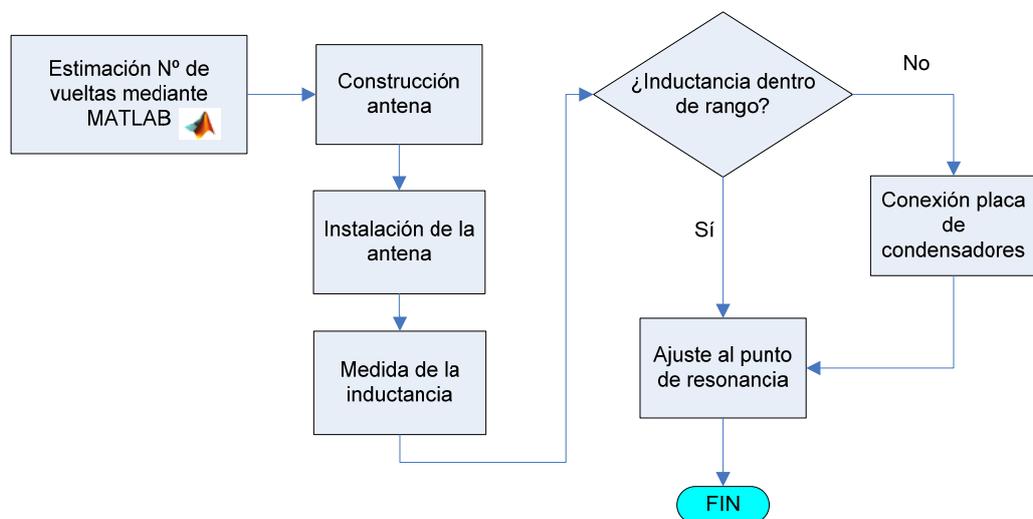


Figura 2.24. Fases para el diseño e instalación de antenas de acoplamiento inductivo

Siguiendo esta metodología es posible acoplar la antena a una máquina industrial. En la Figura 2.25 se muestra un prototipo de antena acoplada en una prensa hidráulica y una muñequera con el tipo de etiqueta RFID que se ha utilizado, de 32 mm de longitud.

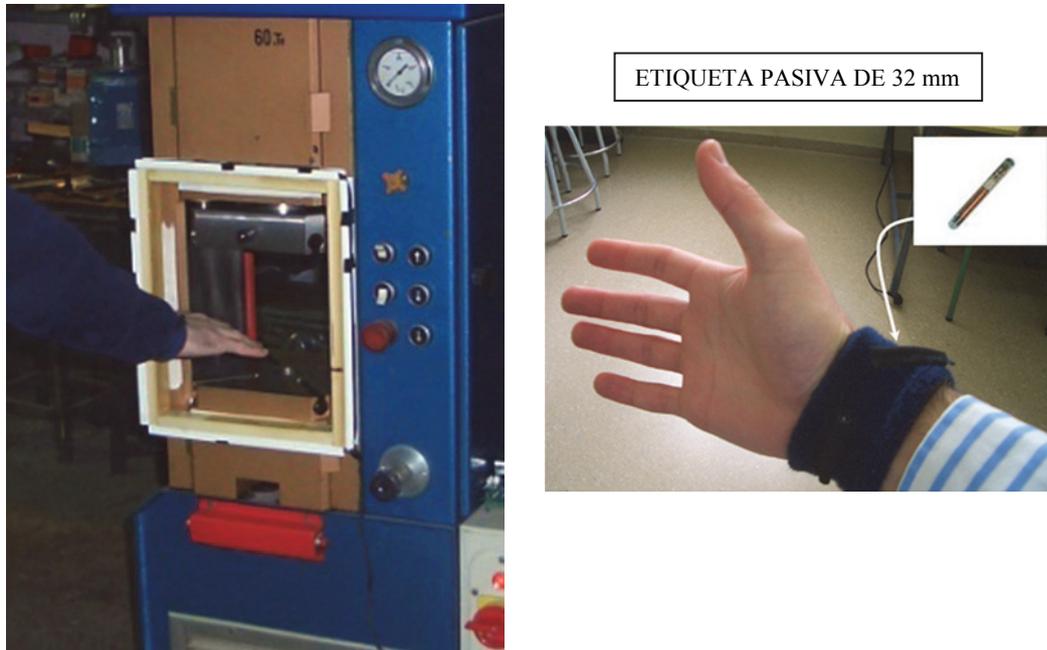


Figura 2.25. Prototipo de antena acoplada y muñequera con etiqueta RFID

## 2.6 INTERFAZ DE CONTROL CON EL LECTOR RFID

**Objetivo:** desarrollo de la interfaz. Se plantearon las especificaciones necesarias para desarrollar una interfaz adecuada entre el sistema y los elementos a controlar.

**Resultados obtenidos:** diseño de la interfaz necesaria para actuar sobre el equipo a controlar.

Una vez estudiada la interfaz de comunicación mediante la que funciona el lector RFID (conexión serie y protocolo basado en caracteres ASCII), y establecida una metodología del diseño y acople de antenas de acoplamiento inductivo, se diseñó un hardware específico para llevar a cabo la tarea de la detección y paro de una máquina. Para ello, se desarrolló una placa de circuito impreso basada en microcontrolador. En los siguientes apartados se describen: a) justificación del microcontrolador seleccionado, b) software y hardware empleado para su programación, c) desarrollo de la placa de circuito impreso.

### 2.6.1 Elección del microcontrolador

Por definición, un microcontrolador es un circuito integrado que contiene toda la estructura (arquitectura) de un computador, es decir, CPU, RAM, ROM, además de varios circuitos periféricos integrados como convertidores analógico/digital, temporizadores, contadores, sistemas para permitir la conexión serie y paralelo y otros más según la especialización del microcontrolador, permitiendo aplicaciones muy diversas. Se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos a la hora de seleccionar el microcontrolador:

- Capacidad de comunicación serie para el control del lector RFID, siendo en este caso 8N1.
- Disponer de, al menos, una salida de control para activar/desactivar la máquina.
- Bajo coste por unidad del microcontrolador, en vista a una posible producción en serie y con el objetivo de optimizar los recursos del mismo.
- Capacidad de reprogramabilidad para futuras modificaciones y ampliaciones.

En base a estas características se decidió elegir el microcontrolador 16F628A (Microchip Technology, 2006). Los programas y hardware empleados para la depuración y programación del microcontrolador fueron los siguientes:

- MPLAB<sup>®</sup> IDE 7.51: este entorno de programación se ha utilizado para la edición del programa del microcontrolador y para una primera simulación de reconocimiento de caracteres ASCII, en la transmisión serie del microcontrolador.
- Proteus<sup>®</sup> 6 de Labcenter Electronics: este software se utilizó para emular el comportamiento del microcontrolador mediante un PC, lo cual ha servido como etapa previa para realizar las pruebas de comunicación con el lector RFID, antes de pasar a la realización de una placa prototipo. El software permite una comunicación virtual serie con el circuito del microcontrolador realizado en el programa (tal y como se muestra en la Figura 2.26). A partir de la creación del circuito en Proteus, se ha conectado un PC con el lector RFID para así verificar que el programa realizado en MPLAB funcionaba correctamente.



integrado MAX232, comúnmente empleado para realizar comunicaciones serie entre microcontroladores y otros dispositivos que utilicen la interfaz RS232.

Una vez verificado el correcto funcionamiento del microcontrolador se implementó la circuitería necesaria para la apertura y cierre de un circuito externo, lo que permite realizar un paro abriendo o cerrando una salida conectada a un autómatas o un cuadro de contactos, típicamente empleado en máquinas industriales. Se utilizó una salida del microcontrolador (concretamente la RB5, Microchip Technology, 2006) y que se activa una vez detectado un código de identificación. Dicha salida se conecta a un transistor conectado a un relé, siendo de esta manera posible actuar sobre circuitos externos además de tener un aislamiento eléctrico. La Figura 2.27 muestra el esquema básico para controlar un relé mediante un transistor y la salida del microcontrolador.

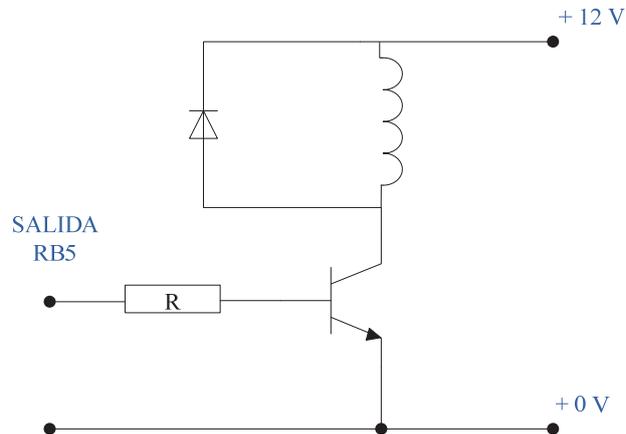


Figura 2.27. Control de un relé a partir de la salida de un microcontrolador

El microcontrolador 16F628A proporciona una corriente máxima de salida de 25 mA (Microchip Technology, 2006); como transistor se eligió el modelo BC547B con una ganancia  $h_{FE}$  entre 200 y 450 (Fairchild Semiconductor, 2002). Para la elección del valor de la resistencia se eligieron las condiciones más desfavorables, como son la mínima ganancia establecida (200) y un consumo de corriente del relé de 200 mA. Este valor da suficiente margen de error ya que los relés de 12 y 24 V no suelen consumir más de dicho valor de corriente (Palacios et al., 2004).

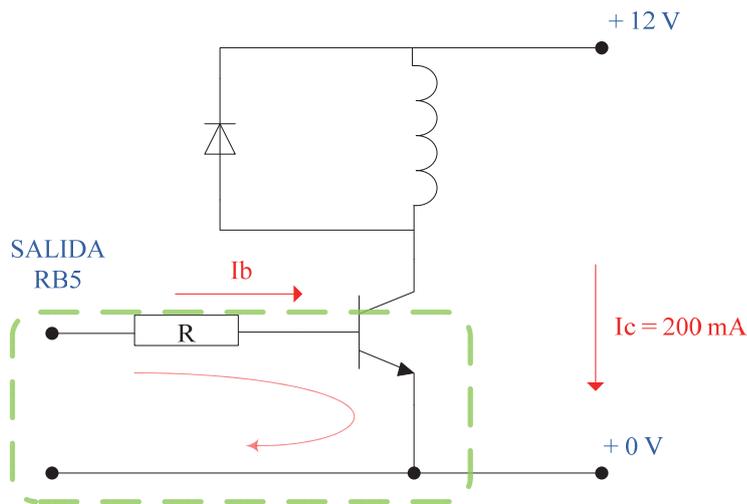


Figura 2.28. Cálculo de la resistencia a la salida del microcontrolador

Analizando la salida RB5 (Figura 2.28) y la corriente que tiene que circular por el emisor del transistor, suponiendo que éste se encuentra en saturación y por tanto la salida RB5 está activada, se tienen las siguientes características:

- $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$  (caída de tensión típica en saturación entre base y emisor Fairchild Semiconductor, 2002).
- $V_{RB5} = 5 \text{ V}$  (nivel TTL alto que proporciona el microcontrolador a su salida).
- $I_{RB5max} = 25 \text{ mA}$  (corriente máxima que puede suministrar la salida RB5)

Las ecuaciones que rigen la malla anterior son:

$$V_{RB5} = I_B \cdot R + V_{BE} \rightarrow R = \frac{V_{RB5} - V_{BE}}{I_B} \quad (2.7)$$

$$I_C = h_{FE} \cdot I_B \quad (2.8)$$

Sustituyendo en (2.8) los valores anteriores  $I_C = 200 \text{ mA}$  y  $h_{FE} = 200$ , se obtiene que  $I_B = 1 \text{ mA}$ . Finalmente, utilizando este valor en la ecuación (2.7), se obtiene un valor de  $R = 4.3 \text{ k}\Omega$ . Como el límite de suministro de corriente de la salida del microcontrolador son  $25 \text{ mA}$ , es posible utilizar una resistencia de  $2.2 \text{ k}\Omega$ , y sustituyendo este valor en las ecuaciones anteriores se puede comprobar que ahora la corriente de base ( $I_B$ ) tendrá un valor cercano a los  $2 \text{ mA}$ , y la corriente de emisor será por tanto mayor, de modo que, utilizando este valor, se cumplen las condiciones necesarias para un correcto funcionamiento sin tener que poner ninguno de los dispositivos en un régimen de trabajo comprometido. Una mala elección de la

resistencia puede hacer que la tensión de la salida del microcontrolador no se mantenga a los 5 V debido a una demanda excesiva de corriente, pudiendo por tanto no proporcionar los niveles de tensión suficientes e incluso dañar el microcontrolador.

También se tuvieron en cuenta otras consideraciones, como la atenuación del ruido provocado por las conmutaciones del relé en la alimentación al microcontrolador. Para ello se conectaron dos condensadores electrolíticos de desacoplo a la entrada y salida del regulador que lo alimenta, uno de 1000  $\mu$ F a la entrada y otro de 100  $\mu$ F a la salida

### 2.6.2.1 PCB y programa para el microcontrolador

Tras la verificación del correcto funcionamiento del prototipo en *protoboard*, se optó por la elaboración del mismo en PCB. El diseño, como ya se ha comentado, se realizó mediante el software OrCAD 10. El aspecto de la placa se muestra en la Figura 2.29.

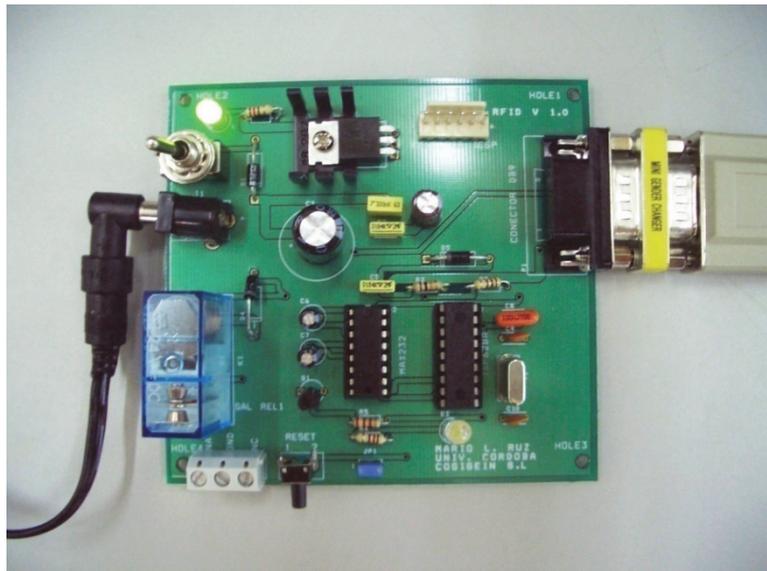


Figura 2.29. Placa de circuito impreso

Mediante MPLAB<sup>®</sup> 7.51 se elaboró el programa necesario para la comunicación entre el lector RFID y el microcontrolador 16F628A. El código del programa consta básicamente de las siguientes partes:

- Configuración de la USART
- Código de identificación a detectar
- Acción ante una detección
- Condición de *reset*

Se comentan todas ellas a continuación:

a) Configuración de la USART:

El microcontrolador 16F628A dispone de una serie de registros que permiten configurar la USART que lleva integrada. Existen un conjunto de registros involucrados en la configuración de la USART y cuyas funciones se explican detalladamente en (Microchip Technology, 2001). Básicamente, lo que se ha hecho ha sido habilitar la transmisión y recepción para una comunicación serie tipo 8N1 y especificar la velocidad (9600 *bps*) mediante un registro, denominado SPBRG. Activando el bit BRGH de otro registro, denominado TXSTA, el valor del registro SPBRG determinará la velocidad de la transmisión serie conforme a la siguiente ecuación:

$$SPBRG = \frac{F_{osc}}{16 \cdot velocidad(bps)} - 1, \quad (2.9)$$

donde:

$F_{osc}$ : frecuencia de oscilación del microcontrolador (4 MHz)

Ya que el microcontrolador va a trabajar a 4 MHz y 9600 *bps*, el valor que se obtiene es:

$$SPBRG = \frac{4000000}{16 \cdot 9600} - 1 = 25.04 \rightarrow 25$$

Se elige el valor entero más cercano, pues el registro emplea un sistema binario entero.

b) Código a detectar

El programa activará o no una salida dependiendo de si se detecta un cierto código. El lector transmite los códigos identificados, por ejemplo en el modo línea la secuencia de caracteres ASCII para una etiqueta reprogramable tiene una estructura de la forma "LW 0127 4503599627370495". Se puede optar por detectar tan sólo la secuencia "0127", y obviar los caracteres LW para hacer la detección independiente de la configuración del lector y del tipo de etiqueta.

La extensión del programa para realizar diferentes acciones (como puede ser activar una salida u otra) en función de varios códigos de identificación no supondría ningún problema de diseño y sí una repetición o ampliación a partir del código ya elaborado.

c) Acción ante una detección

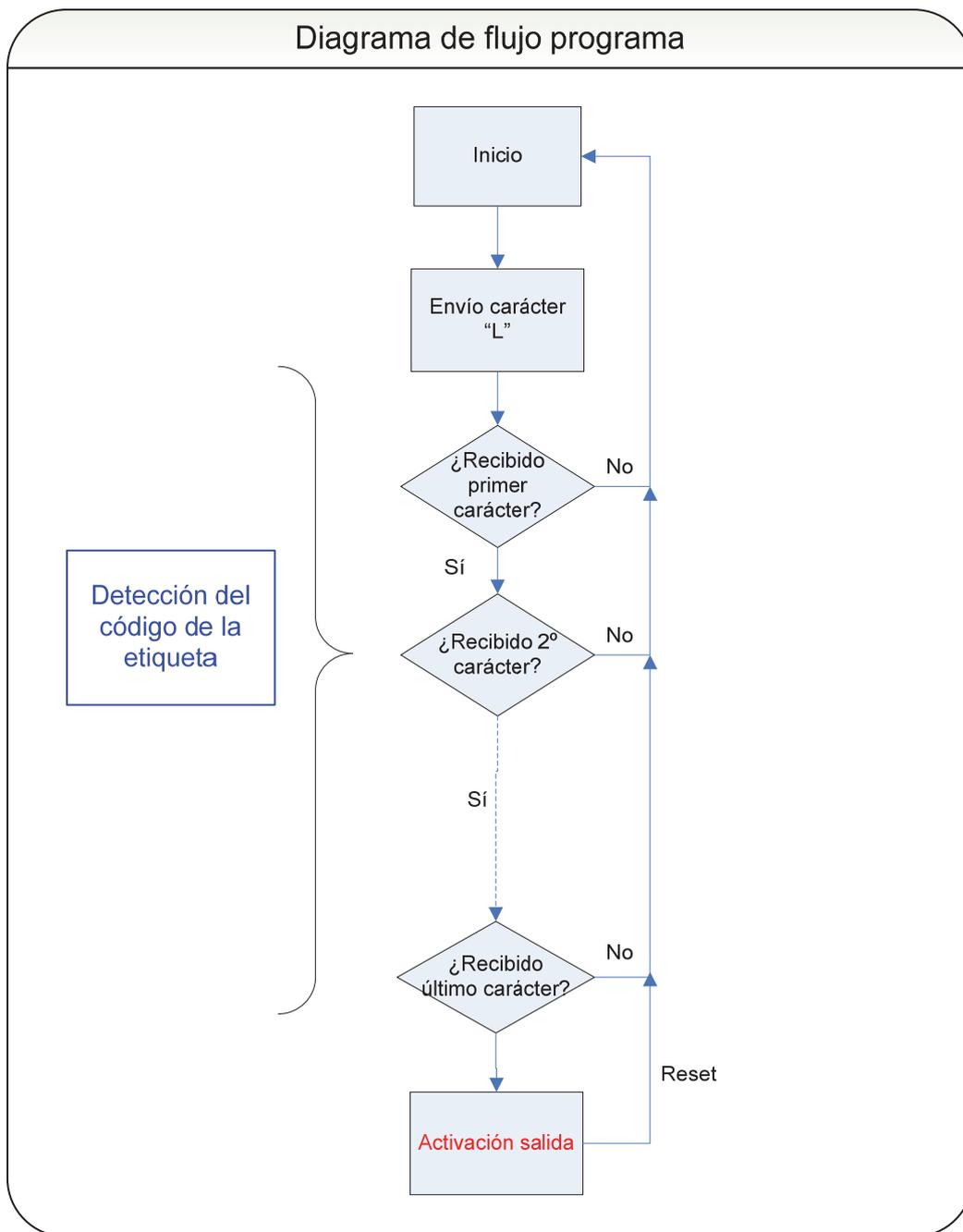
Como ya se ha comentado en más de una ocasión, la acción ante la detección de una etiqueta con un código específico debe activar una salida del microcontrolador de forma que produzca una parada de emergencia.

En el caso que nos ocupa se ha elegido la salida RB5 del microcontrolador (Microchip Technology, 2006). El motivo de la elección de esta patilla como salida se debe a que no está multiplexada con ninguna otra función, con lo que se ahorran algunas líneas de código para la configuración. No obstante, esto no tiene ningún efecto sobre el rendimiento del programa, pudiéndose utilizar las otras salidas en el caso de modificar el programa para futuras aplicaciones.

d) Condición de *reset*

Ya que la acción de la detección supone un paro de emergencia, será necesario un rearme de la máquina una vez que la situación de posible accidente esté controlada. Esto se traduce para el programa como una desactivación de la salida, y sucede cuando se activa un pulsador, que simplemente lo que hace es un *reset* del microcontrolador, volviéndose a ejecutar sus primeras líneas de código.

La secuencia de acciones del programa elaborado en ensamblador responde al diagrama de flujo de la Figura 2.30. En la Figura 2.31 se muestra el funcionamiento general del sistema.



**Figura 2.30. Diagrama de flujo del programa de comunicación**

En el diagrama de flujo de la Figura 2.30, la flecha discontinua indica que el número de caracteres a detectar es arbitrario, pudiéndose elegir todo o parte del código de identificación de la etiqueta. El envío del carácter “L” simplemente configura el lector poniéndolo en modo línea, de modo que cada vez que detecta un código de etiqueta el lector lo envía continuamente a través de la interfaz serie. De esta forma se activará la salida cuando se detecte una etiqueta dentro de la zona de lectura, independientemente del código que transmita.

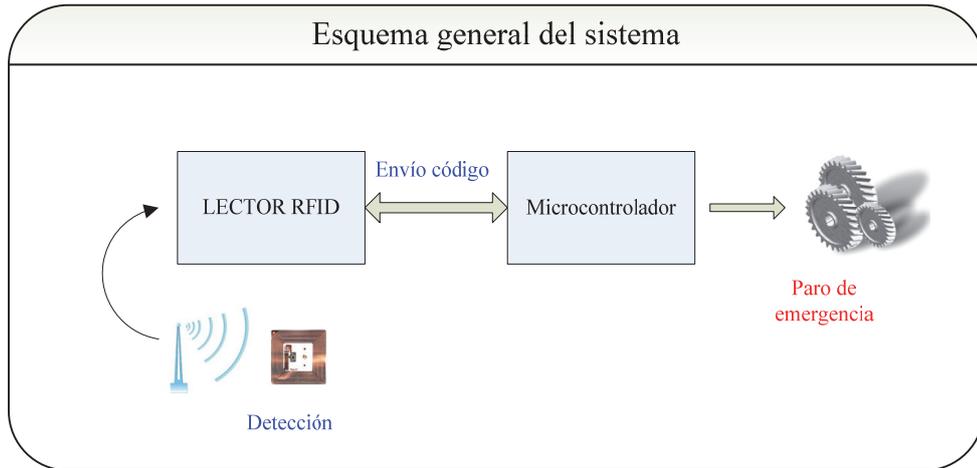


Figura 2.31. Esquema general del sistema

## 2.7 PROTOTIPO RFID

**Objetivo:** en base a las etapas anteriores, acoplar la interfaz de control diseñada junto con el lector RFID.

**Resultados obtenidos:** obtención de un primer prototipo con el que poder realizar pruebas.

La Figura 2.32 muestra el prototipo RFID. El módulo de radiofrecuencia, acoplado con el módulo de control, y la placa de circuito impreso se han integrado en una caja industrial con un grado de protección IP-65 (ANSI/IEC 60529, 2004). El equipo dispone de una entrada para el conexionado de la antena, y de una salida para la señal de paro, pudiendo utilizarse el relé en modo “normalmente cerrado” o “normalmente abierto”, dependiendo de cuadro de mandos de la máquina en la que se vaya a utilizar. Asimismo el prototipo dispone de un botón de *reset*, de manera que cuando se produzca un paro de emergencia sea posible realizar un rearme.

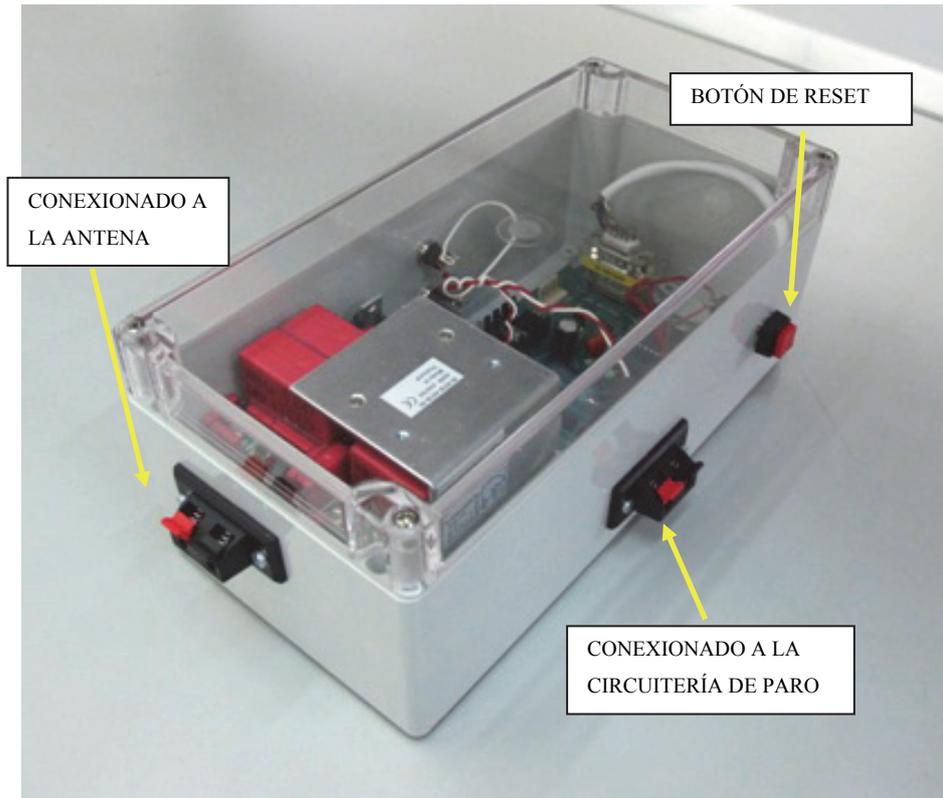


Figura 2.32. Prototipo RFID

Adicionalmente, y cuando sea necesario, se conectará en serie con la antena uno de los condensadores de la Figura 2.23 para así conseguir que el equipo trabaje en el punto de resonancia. En las pruebas realizadas en el laboratorio, el conexionado de algún condensador adicional suele ser necesario.

En cuanto a la integración de las etiquetas en el operario, para trabajos con prensas hidráulicas o maquinaria similar, las partes del cuerpo del operario expuestas a riesgos de amputación o atrapamientos son las manos, mediante las cuales se colocan las piezas a procesar en trabajos manuales. Existen varias posibilidades de integración de las etiquetas, como por ejemplo su acople mediante guantes o anillos, que además permiten situar las etiquetas en los extremos de la mano y ganar distancia de detección respecto a la zona de peligro. Sin embargo, el uso de guantes puede ser un tanto molesto, por lo que al final se decidió integrar etiquetas de 32 mm de longitud en una muñequera, tal y como se mostró en la Figura 2.25.

El rendimiento del prototipo de la Figura 2.32, junto con las etiquetas RFID de 32 mm y la muñequera mostradas en la Figura 2.25, se ha evaluado mediante el banco de

pruebas basado en robot que se describe en el capítulo 3, donde se simula la entrada a la zona de peligro de un modelo real de prensa hidráulica.

## 2.8 CONCLUSIONES

En este capítulo se ha estudiado la tecnología RFID con equipos convencionales y su aplicación a la seguridad industrial. A partir de una revisión bibliográfica previa se ha optado por el uso de equipos RFID de baja frecuencia (134.2 kHz).

Los requerimientos básicos de diseño de antenas de acoplamiento inductivo permiten la construcción y acople de antenas a diferentes tipos de máquinas, con una cierta flexibilidad en el tamaño y la geometría de éstas. La principal característica de este tipo de antenas es su inductancia. Se ha establecido una metodología para el diseño de antenas de acoplamiento inductivo, considerándose las dimensiones de la antena y su instalación cercana a materiales metálicos, generalmente presentes en maquinaria de trabajo. Aunque en la bibliografía aparecen diversas geometrías posibles (circular, rectangular, en espiral, etc.), la empleada para la aplicación objeto de estudio ha sido la rectangular. No obstante, se han elaborado un conjunto de programas en código Matlab que permiten, a partir de las especificaciones geométricas y dimensiones de la antena, estimar la longitud de cable necesaria para alcanzar el principal parámetro de la antena lector RFID utilizado, que es la inductancia.

Una vez establecido el diseño básico de antenas y tras comprobar el funcionamiento de algunos prototipos, se ha abordado la elaboración de un programa en código ensamblador para el microcontrolador 16F628A, y cuya función es configurar al lector RFID y realizar una acción de emergencia mediante la activación de una de sus salidas. En base a ello, para dicho microcontrolador se ha diseñado una placa de circuito impreso que hace de interfaz con el lector RFID y dispone de una salida a relé para su conexionado con la circuitería de paro de una máquina industrial. Se integraron todos los componentes en una caja de policarbonato con un grado de protección IP65, de forma que la placa de circuito impreso y el lector RFID estuvieran interconectados entre sí, constituyendo el primer prototipo RFID.

El prototipo diseñado presenta principalmente dos problemas a priori: su incapacidad para la detección simultánea de etiquetas, existiendo la posibilidad de que no se detecte ninguna etiqueta cuando existen varias dentro de la zona de lectura; y la

carencia una metodología de calibrado precisa en distancia de detección, especialmente debido a la dependencia de la orientación de las etiquetas con respecto a la antena. En el siguiente capítulo se describe un banco de pruebas basado en robot con el que se estudia de forma cuantitativa esta problemática, extensible a otros equipos con similares propósitos. Por otra parte, en el capítulo 4 se describen algunos modelos para el cálculo de distancias mediante radiofrecuencia, y que también pueden ser de aplicación en el desarrollo de dispositivos de seguridad *wireless* como el prototipo RFID descrito en este capítulo.

---

## **Capítulo 3: Banco de ensayos basado en robot para dispositivos de seguridad industrial**

---

En este capítulo se propone el diseño de un banco de ensayos, basado en robot, para evaluar el rendimiento de dispositivos de seguridad que utilizan tecnología de radiofrecuencia. En este caso, la configuración aquí mostrada caracteriza dispositivos de seguridad diseñados para salvaguardar áreas relativamente pequeñas, como, por ejemplo, los puntos de operación (zonas de entrada de piezas) de maquinaria similar a las prensas hidráulicas. Como ejemplo de análisis, se estudia el prototipo RFID descrito en el capítulo anterior, cuyo objetivo principal es la prevención de accidentes mediante el disparo de un paro de emergencia cuando se presenta una situación de riesgo.

Se utiliza un robot ABB IRB 2400L como sistema de referencia; el controlador de este sistema proporciona una precisión del orden del milímetro en el posicionado del extremo del manipulador. En dicho extremo se ha acoplado una mano fabricada en polietileno con una muñequera que contiene al menos una etiqueta RFID. Esta configuración pretende emular el comportamiento del brazo de un trabajador que está colocando piezas en una zona peligrosa. Con el uso del robot, es posible analizar diferentes trayectorias con diferentes velocidades y orientaciones del extremo del manipulador, lo que permite el estudio de diferentes situaciones de riesgo asociadas al uso de maquinaria. Se presentan una serie de experimentos realizados con el prototipo RFID, aportando finalmente un conjunto de datos estadísticos que caracterizan la

capacidad de detección del sistema analizado. Para el caso estudiado, se ha considerado como región de entrada (por donde el operario introduce y coloca las piezas) la definida mediante un plano, típica de las prensas hidráulicas. También, para la obtención de datos estadísticos, se propone un enfoque matricial cuyo objetivo es analizar la robustez de dispositivos de seguridad, diseñados para prevenir de forma automática la entrada de operarios en zonas de riesgo, diferenciándose puntos de entrada en la región de riesgo analizada. Los resultados de este estudio ponen de manifiesto los beneficios que el desarrollo de este tipo de dispositivos pueden aportar en la seguridad industrial, así como las principales dificultades que deben resolverse para una implementación en escenarios reales de trabajo.

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

La seguridad industrial es un campo en constante evolución y desarrollo, y como tal, existen aspectos que requieren una mejora. En particular, la importancia de reducir el riesgo de accidente en el sector de la maquinaria industrial queda destacada en varias regulaciones, como por ejemplo la directiva relativa a las máquinas (EC, 2006). La protección del trabajador debe asegurarse en cualquier circunstancia, pero especialmente cuando existe una situación de riesgo alto, como sucede en el uso de maquinaria peligrosa. Así viene impulsado desde la propia Directiva Marco de la UE sobre Seguridad y Salud Laboral (89/391/EEC, 1989), continuando por la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales (INSHT, 1995).

Existe una variedad de situaciones en las que el trabajador necesita manejar piezas que sobresalen de la zona de operación de la máquina o que requieren una colocación específica y precisa en la misma. En algunas ocasiones, la flexibilidad necesaria en algunos procesos de la industria metalúrgica hace que la utilización de dispositivos de protección (como por ejemplo barreras físicas o cortinas fotoeléctricas) no sea posible, o cuanto menos práctica. En estos casos, la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de EEUU (OSHA, *Occupational Safety and Health Administration*) permite el uso de la distancia como medida de seguridad. Bajo esta recomendación, el trabajador no debe aproximarse al punto de operación (zona de peligro) más de lo necesario y en ningún caso más de 4 pulgadas (10.16 cm) (OSHA, 1997). Sin embargo, esta medida de seguridad consiste únicamente en un conjunto de procedimientos que

siguen una política de distanciamiento respecto a la zona de peligro, no tratándose de ninguna manera de una medida de seguridad intrínseca, como marcan las prioridades en materia de protección contra accidentes. La seguridad del operario no debe depender, siempre que sea posible, de una correcta actuación por su parte, sino que el sistema debe estar diseñado y fabricado para proporcionar protección en cualquier circunstancia, incluso cuando se produzca un error por parte del operario.

En caso de accidente, podría darse el caso de que el propio trabajador tenga que participar en la parada de emergencia, y con frecuencia dicho paro se produce después de que haya ocurrido una lesión. Es por ello que se requiere de la investigación y desarrollo de nuevos dispositivos que mejoren la seguridad en situaciones como la comentada.

En particular, los resultados mostrados en este capítulo están enfocados a la investigación de dispositivos basados en radiofrecuencia que permitan mejorar la seguridad de trabajos que se realizan a poca distancia de zonas de peligro, proporcionando una protección adecuada en todo caso, independientemente de que la actuación del trabajador sea la correcta o no.

Para la prueba y estudio de dispositivos como el aquí desarrollado, se propone un banco de ensayos que permita estudiarlos de forma cuantitativa. En este caso, los dispositivos de interés son aquéllos que han sido diseñados para proteger al trabajador en áreas de un tamaño relativamente pequeño, como los definidos por prensas hidráulicas. El prototipo RFID descrito en el capítulo 2 (Ruz & Vázquez, 2009) se diseñó con el objetivo de producir un paro de emergencia automático cuando se presenta una situación de riesgo, tal como la introducción de la mano de un trabajador en la zona de peligro. Se pretende con este tipo de dispositivo asegurar que el accidente no ocurra, o al menos disminuir sus probabilidades. De este modo, el sistema actúa como una barrera de seguridad y como medida de prevención, desempeñando una función que puede definirse como “paro de máquina ante situación de emergencia”. Existe además normativa donde se establecen las regulaciones relativas a los paros de emergencia en máquinas (UNE-EN ISO 13850:2008, 2008), y bibliografía relativa a la clasificación de los diferentes tipos de barreras de seguridad (Sklet, 2006).

El banco de ensayos que a continuación se describe se utiliza para estudiar el grado de cumplimiento de la función comentada del prototipo desarrollado. También se

presenta una revisión bibliográfica sobre técnicas basadas en radiofrecuencia que, o bien podrían emplearse para la mejora de la seguridad en los trabajadores, o bien podrían beneficiarse del banco de ensayos propuesto.

Este capítulo se organiza de la siguiente forma. Inicialmente, se realiza un resumen de los sistemas de protección generalmente utilizados en maquinaria para el punto de operación<sup>1</sup>. Se presentan también una serie de antecedentes relacionados con la tecnología de radiofrecuencia, los sistemas de proximidad y su aplicación en el campo de la seguridad industrial. En el apartado 3.3 se describe el banco de ensayos diseñado basado en robot. Se explica la metodología aplicada para automatizar los experimentos y se muestra un diagrama general con los principales bloques que conforman el banco de pruebas. En el apartado 3.4 se resumen las principales características del prototipo RFID, en este caso relacionadas con el conexionado necesario con el banco de ensayos. En la sección 3.5 se explican de forma detallada los experimentos realizados. Se destacan las ventajas del uso de un enfoque matricial para el estudio de dispositivos de seguridad diseñados para prevenir accesos no autorizados en áreas de peligro. En el apartado 3.6 se evalúa el rendimiento del prototipo RFID. Para ello, se simula la entrada de la mano de un operario en la zona de peligro de una prensa hidráulica. Por último, se resaltan las principales ventajas del banco de ensayos propuesto, así como las limitaciones actuales del prototipo RFID estudiado (apartado 3.7).

## **3.2 ANTECEDENTES**

En esta sección se realiza una revisión de los principales métodos de protección en el punto de operación. Posteriormente, se describen aquellas situaciones donde los métodos tradicionales de seguridad no son prácticos. Por último, se mencionan algunas de las técnicas basadas en radio así como compañías especializadas en técnicas de posicionamiento. El objetivo de este último apartado no es el de entrar en detalle sobre cada una de las estrategias que proponen diferentes grupos de investigación, sino el de recopilar las técnicas más recientes que puedan contribuir a la mejora de la seguridad industrial.

---

<sup>1</sup> El punto de operación (*point of operation*) se define como la zona de la máquina donde se encuentra el material o pieza a procesar. Por ejemplo, en una prensa hidráulica es el área donde se realizan las operaciones de estampado u otro tipo.

### 3.2.1 Métodos de protección estándar para el punto de operación

La maquinaria incrementa la productividad de los trabajadores y posibilita la fabricación de piezas que, de otro modo, (por ejemplo únicamente con herramientas manuales) no sería viable. No obstante, de la misma manera que la industria necesita de la maquinaria para procesar materiales (cortar, taladrar, prensar, etc.), en multitud de ocasiones los operarios quedan expuestos a sus partes móviles, suponiendo esta situación una serie de peligros que deben identificarse y cuyos riesgos asociados deben eliminarse o al menos minimizarse en la medida de lo posible. Algunos de los accidentes más graves suelen ocurrir en la zona de operación, por ejemplo, en el área de trabajo de una prensa hidráulica. El Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI, *American National Standards Institute*) publica una serie de normas de seguridad en máquinas. Concretamente, en la denominada serie B11 se tratan los requisitos de seguridad para la construcción, diseño y uso de maquinaria industrial específica. La serie B11 está actualizada, incluyendo el uso de las técnicas desarrolladas más recientes. Por otra parte, en la normativa establecida por OSHA se establecen las reglas que se deben observar para lograr un entorno industrial seguro, abordándose los riesgos más comunes y los métodos de protección en el punto de operación (Hamelund, 2007).

El principal cometido de la protección de maquinaria es el de proteger a los trabajadores que operan con ella y a las personas que se encuentran en el área de trabajo. OSHA contempla varios métodos de protección para el punto de operación (OSHA, 2001). De hecho, existen diferentes normas UNE<sup>2</sup> al respecto donde se definen los métodos de protección para maquinaria industrial específica, como prensas hidráulicas (UNE-EN 693:2001, 2001), prensas mecánicas (UNE-EN 692:2006+A1:2009, 2009), cizallas y guillotinas (UNE-EN 13985:2003+A1:2009, 2009), máquinas rectificadoras (UNE-EN 13218:2003+A1:2008/AC:2010, 2010), tornos (UNE-EN ISO 23125:2011/A1:2012, 2012), máquinas transfer y máquinas especiales (UNE-EN 14070:2004+A1:2009, 2009), o prensas plegadoras hidráulicas (UNE-EN 12622:2011, 2011). Algunos de estos métodos son las barreras físicas (resguardos), dispositivos sensibles optoelectrónicos como las denominadas cortinas de luz (también denominadas “barreras inmateriales”), dispositivos de mando a dos manos,

---

<sup>2</sup> Las normas UNE son normas de la UE adoptadas por el organismo de normalización español, AENOR

etc. Existe bastante bibliografía que trata los diferentes dispositivos de protección; en los trabajos (Burlet-Vienney et al., 2010; Hamelund, 2007; OSHA-eTools, 2011) se realiza una extensa revisión sobre medidas generales de protección de maquinaria. En la Tabla 3.1 se resumen los métodos básicos de protección de maquinaria en el punto de operación. Por otra parte, en la Tabla 3.2 se muestran las normas armonizadas que guardan mayor relación con el contenido de este capítulo, y que dan presunción de conformidad con los requisitos esenciales de seguridad, descritos en las directivas o legislación traspuesta de cada Estado Miembro.

Evidentemente, la supervisión de buenas prácticas en el trabajo y educación de los operarios, inspecciones periódicas del estado de las máquinas, así como el uso de sistemas de señalización y advertencia, también incrementan la seguridad de los trabajadores. Sin embargo, la efectividad de estas medidas depende del comportamiento de los operarios, no siendo por tanto técnicas intrínsecas de seguridad.

Con todo ello, existen casos donde la “protección absoluta” de los trabajadores no es posible. Por ejemplo, en la industria metalúrgica se ensamblan y fabrican una amplia variedad de piezas (chapas de metal, tuberías, cubiertas, etc.) donde intervienen prensas hidráulicas. En un día normal de trabajo, un operario de prensa hidráulica puede trabajar piezas de metal de diferentes formas, tamaños y tipo. Debido a la flexibilidad necesaria en el proceso de fabricación de piezas tan diversas, los métodos de protección mostrados en la Tabla 3.1 pueden no ser aplicables (o prácticos debido a restricciones de productividad). Por ejemplo un proceso de fabricación de planchas metálicas de diferente tamaño, forma y espesor que puede requerir uno o varios tipos de prensado (SMACNA, 1997). Los procesos de manufactura con piezas con mayor anchura que la máquina o situaciones donde el operario tiene que introducir materiales con una geometría compleja pueden también imposibilitar el uso de dispositivos de protección (Burlet-Vienney et al., 2010). De hecho, OSHA reconoce que, para esta casuística, el uso de dispositivos electrosensibles<sup>3</sup> o barreras físicas puede no ser aplicable y permite como método de protección la aplicación de una “distancia segura”, descrito en la instrucción CPL 02.10.025 (OSHA, 1997). Este método se aplica manteniendo una

---

<sup>3</sup> El término “electrosensible” no está incluido en la Real Academia Española. Sin embargo, se utiliza en normativa y por organismos oficiales directamente relacionados seguridad en maquinaria, como por ejemplo la norma UNE-EN 999 o el INSHT. Por ello, se ha utilizado en este documento.

distancia de 4 pulgadas (10.16 cm) respecto de la zona de operación. Como ya se comentó anteriormente, este método es más una guía recomendada o política de protección, y su eficacia depende de los propios operarios. Además, en caso de accidente el operario tiene que intervenir en la parada de emergencia.

A la fecha de redacción de esta tesis doctoral, se desconoce la existencia de un dispositivo estándar de seguridad que tenga la capacidad de *discriminar* si lo que entra en la zona de peligro es una pieza o una parte del cuerpo del trabajador. “La maquinaria no distingue entre el producto y las personas; hará el mismo trabajo con ambos” (Hamelund, 2007). Es por ello que se requiere investigar y desarrollar dispositivos de seguridad que sean capaces de hacer tal distinción.

**Tabla 3.1. Métodos básicos de protección en el punto de operación de maquinaria**

Método	Acción	Ventajas	Limitaciones
<b>Barreras físicas</b>			
Resguardos fijos, móviles, regulables y de cierre automático	Protegen al operario del punto de operación (o en la zona de peligro donde estén instalados)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Previenen que el operario pueda alcanzar el área de peligro</li> <li>- Existe una amplia gama en el mercado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pueden dificultar la visibilidad del operario en ciertos tipos de trabajos</li> <li>- Generalmente, las operaciones de calibrado y reparación de la máquina requieren desmontar las barreras físicas</li> <li>- En ocasiones, el operario podría hacer inefectivo este tipo de dispositivos de forma intencionada</li> <li>- Puede ocurrir que su aplicación no sea práctica, por ejemplo, una barrera fija tendría que cambiarse para cada tipo de pieza dependiendo de las dimensiones de ésta y del tipo de trabajo que se esté realizando <sup>a</sup></li> </ul>
Apertura reducida a 6 mm (prevención intrínseca)	El acceso a la zona de peligro se reduce a 6 mm. Con esta configuración, no existe la posibilidad de que ninguna parte del cuerpo del operario entre en dicha zona.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fácil de implementar</li> <li>- Solución barata (depende del propio diseño de la máquina)</li> <li>- Protege a todos los operarios del acceso a la zona de peligro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solución no aplicable en numerosas ocasiones, limitada a producciones específicas (por ejemplo chapas de metal de poco espesor, con forma y tamaño similar, y en las cuales se realiza generalmente el mismo tipo de operación o similar)<sup>a</sup></li> </ul>
<b>Dispositivos de protección</b>			
Dispositivos fotoelectrónicos (barreras inmateriales)	Crean una "barrera invisible o inmateriales". Si una parte del cuerpo del operario atraviesa uno o	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El operario puede moverse con libertad (no hay una barrera física entre el operador y el punto de operación).</li> <li>- La parada o acción de seguridad se realiza de forma automática.</li> <li>- Generalmente no restan visibilidad al operario</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Las cortinas de luz y los dispositivos basados en láser pueden requerir un recalibrado con cierta frecuencia</li> <li>- Estos dispositivos también pueden no ser prácticos en ciertas ocasiones. Por ejemplo, en las prensas hidráulicas, las cortinas de luz pueden representar un obstáculo cuando la pieza que se está trabajando tiene una anchura mayor que la zona de entrada de la máquina o no sean aplicables cuando el troquel es complejo (por ejemplo con diferentes alturas)<sup>a</sup></li> <li>- Determinados procesos pueden ensuciar los emisores y/o receptores, dando lugar a múltiples paradas</li> </ul>
Dispositivos basados en radiofrecuencia (capacidad/capacitancia) <sup>b</sup>	generalmente se produce un paro de emergencia.		
Dispositivos sensibles a presión (tapiz sensible o alfombrilla)	A partir de un peso preestablecido, el dispositivo proporcionará una señal de parada.	Visibilidad completa en el área de trabajo. Se suelen instalar para establecer un perímetro de protección o en toda una zona.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ciertos agentes químicos pueden degradar el material de la alfombrilla.</li> <li>- Puede no ser aplicable para ciertos trabajos. Por ejemplo, cuando las manos del operario tienen que estar cerca del punto de operación <sup>a</sup></li> </ul>
Dispositivos retráctiles ( <i>pullback</i> )	Mediante cuerdas conectadas a muñequeras se impide que el operario acceda al punto de operación durante el ciclo de ejecución de la máquina.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite que las manos entren en el punto de operación para la introducción y extracción de piezas.</li> <li>- Protege al operario cuando se producen eventos de forma repetida (por ejemplo, varios ciclos de prensado donde el operario ha de extraer una pieza e introducir otra)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limita la movilidad del operario</li> <li>- Puede obstruir el espacio de trabajo.</li> <li>- Requiere una supervisión exhaustiva para su correcto funcionamiento.</li> <li>- El operario puede hacerlo inefectivo de forma sencilla.</li> <li>- Solo protege a un operario</li> <li>- Pueden crear a su vez otras zonas de peligro</li> <li>- Estos dispositivos solo son funcionales si el operario se encuentra en una posición estática. Es decir, los dispositivos <i>pullback</i> pueden no ser aplicables cuando se requiere cierta movilidad de los operarios <sup>a</sup></li> </ul>
Dispositivos de restricción ( <i>restraint</i> )	Similar a los dispositivos de retirada, pero en este caso las manos del operario nunca pueden alcanzar la zona de peligro (las cuerdas están conectadas a un punto fijo).	- Previene que el operario pueda acceder a la zona de peligro en todo momento	Generalmente suponen los mismos problemas que los dispositivos de tipo <i>pullback</i>
Dispositivos de acción mecánica ( <i>trip controls</i> ) (barra sensible, cables de parada)	Dispositivo localizado en la periferia de la zona de peligro	- Mediante estos equipos se pretende prevenir o minimizar las consecuencias de un accidente mediante una parada de la máquina lo más rápido posible.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El operario debe ser capaz de alcanzar el dispositivo para realizar el paro de emergencia.</li> <li>- No previenen el acceso del operario a la zona de peligro. Además, éste ha de intervenir para realizar la parada de emergencia.</li> </ul>
Dispositivos de mando a dos manos	Requiere como mínimo una maniobra simultánea ( <i>two-hand trip</i> ) y puede que además mantenida ( <i>two-hand control</i> ) mientras existe una situación de peligro.	- Obligan a que en un momento determinado las manos del operario tengan que estar en una zona específica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El operario puede inhabilitar este tipo de dispositivos que no tienen función <i>anti-tie down</i> (que obliga a una pulsación simultánea)</li> <li>- Protege solamente a un operario</li> <li>- Pueden no ser aplicables para ciertas situaciones, por ejemplo, en la manufactura de metales, donde a veces es necesario que el operario tenga que sujetar la pieza <sup>a</sup></li> </ul>

Fuentes: (Burllet-Vienney et al., 2010), (Hamelund, 2007), (Rockford Systems, 2013) (SMACNA, 1997)

<sup>a</sup> Principal limitación que puede hacer a la protección/dispositivo problemática o poco práctica, considerando casos muy específicos.

<sup>b</sup> Este dispositivo para la máquina si varía la capacitancia del campo por encima de un límite establecido. Esta variación puede deberse a la presencia de un objeto o parte del cuerpo del operario. Por el contrario, en el tipo de dispositivos propuestos en esta tesis sí se pretende hacer tal distinción.

**Tabla 3.2. Normas UNE relacionadas con los requisitos esenciales de seguridad en maquinaria**

### **Principales normas UNE relacionadas con el banco de ensayos propuesto**

- (UNE-EN ISO 13849-1:2008., 2008). Seguridad de las máquinas. Partes de los sistemas de mando relativas a la seguridad Parte 1: principios generales para el diseño. (ISO 13849-1:2006)
  - (UNE-EN ISO 13849-2:2008, 2008). Seguridad de las máquinas. Partes de los sistemas de mando relativas a la seguridad. Parte 2: Validación. (ISO 13849-2:2003)
  - (UNE-EN ISO 13850:2008, 2008). Seguridad de las máquinas. Parada de emergencia. Principios para el diseño. (ISO 13850:2006).
  - (UNE-EN ISO 13857:2008, 2008). Seguridad de las máquinas. Distancias de seguridad para impedir que se alcancen zonas peligrosas con los miembros superiores e inferiores (ISO 13857:2008).
  - (UNE-EN 1005-1:2002+A1:2009., 2009). Seguridad de las máquinas. Comportamiento físico del ser humano. Parte 1: Términos y definiciones.
  - (UNE-EN 1005-2:2004+A1:2009, 2009). Seguridad de las máquinas. Comportamiento físico del ser humano. Parte 2: Manejo de máquinas y de sus partes componentes.
  - (UNE-EN 1005-4:2005+A1:2009, 2009). Seguridad de las máquinas. Comportamiento físico del ser humano. Parte 4: Evaluación de las posturas y movimientos de trabajo en relación con las máquinas.
  - (UNE-EN 349:1994+A1:2008, 2008). Seguridad de las máquinas. Distancias mínimas para evitar el aplastamiento de partes del cuerpo humano.
  - (UNE-EN 842:1997+A1:2008, 2008). Seguridad de las máquinas. Señales visuales de peligro. Requisitos generales, diseño y ensayos.
  - (UNE-EN 999:1999+A1:2008, 1998). Seguridad de las máquinas. Posicionamiento de los dispositivos de protección en función de la velocidad de aproximación de partes del cuerpo humano.
  - (UNE-EN 953:1998+A1:2009, 2009). Seguridad de las máquinas. Resguardos. Requisitos generales para el diseño y construcción de resguardos fijos y móviles.
- 
-

### **3.2.2 La tecnología de radiofrecuencia en la seguridad industrial**

Los dispositivos basados en radiofrecuencia podrían mejorar la seguridad de los operarios desempeñando la función “parada de emergencia” o alertando a los trabajadores cuando se producen situaciones de riesgo. Mediante estrategias que permitan determinar la posición de un conjunto de transmisores acoplados en los operarios (como podrían ser pequeños módulos integrados de forma ergonómica en la indumentaria de trabajo o en guantes, de un tamaño lo suficientemente pequeño para no dificultar las tareas del operario) se podrían desarrollar diversas aplicaciones relacionadas con la detección de situaciones de riesgo y la toma de decisiones de forma automática, como por ejemplo acciones preventivas tales como la parada de una máquina específica. No obstante, los niveles alcanzables de robustez y precisión<sup>4</sup> de los sistemas de posicionamiento van a ser determinantes y decisivos para según qué tipo de aplicación. Deben considerarse los niveles de precisión alcanzables por el sistema, tanto en movimiento como estático, el alcance, el coste global del sistema, las principales fuentes de error y el efecto de las condiciones del entorno sobre el rendimiento global en el posicionamiento. Teniendo en cuenta todos estos factores, se podrían emplear los dispositivos basados en radiofrecuencia para la búsqueda de nuevas medidas de prevención y protección de seguridad en máquinas, considerando especialmente las principales causas de accidentes y riesgos relacionados con la utilización de máquinas y equipos de trabajo (riesgos mecánicos tales como atrapamientos, cortes o seccionamientos, aplastamientos, riesgos térmicos, etc).

Los sistemas basados en radio también se pueden utilizar para detectar la intrusión de personas en zonas peligrosas, y definir un perímetro de seguridad en torno a éstas. La Figura 3.1 muestra un ejemplo general de manufactura dividido en tres fases (corte, prensado y ensamblado). Algunas compañías, como (Decawave, 2013; Ekahau, 2013; Time Domain Corporation, 2013; Ubisense, 2013) han desarrollado sistemas de posicionamiento basados en radiofrecuencia que podrían emplearse para desempeñar algunas de las funciones mostradas en la figura.

---

<sup>4</sup> Por precisión se entiende alguna medida o índice que permita cuantificar el error total de la posición o posiciones estimadas de una serie de sensores respecto a las posiciones verdaderas.

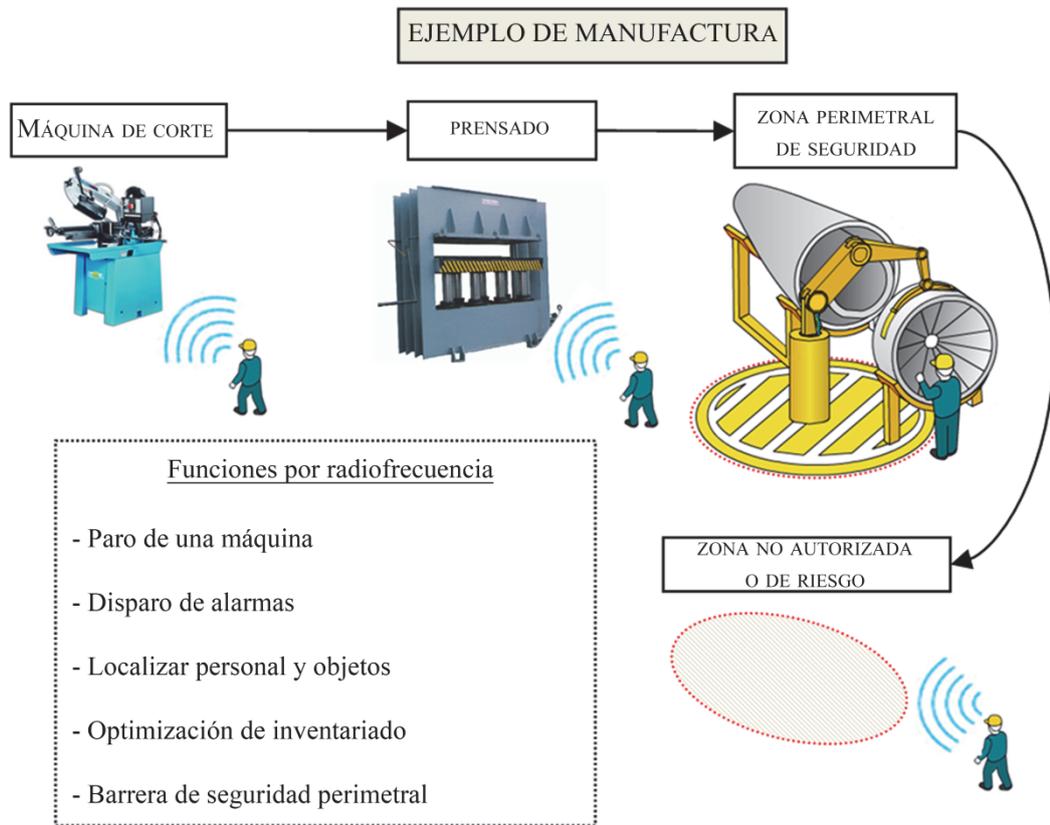


Figura 3.1. Posibles aplicaciones de sistemas basados en radiofrecuencia en entornos industriales

### 3.2.2.1 El significado general del término RFID

Dentro del contexto de las telecomunicaciones, RFID es un término general utilizado para designar cualquier tipo de tecnología que utiliza ondas de radio para detectar, monitorizar, y administrar un conjunto de objetos. Con el avance de esta tecnología, en los últimos años se han ido implementando nuevas capacidades que permiten además proporcionar información sobre la posición (absoluta o relativa) de los objetos. Éste es el punto de convergencia entre los sistemas RFID como tales (donde simplemente se identifican los objetos etiquetados al pasar por la región de lectura de un lector RFID) con los sistemas de posicionamiento en tiempo real, que siguen cumpliendo las funciones de identificación pero que, además, incorporan diferentes estrategias que permiten, entre otras capacidades, funciones de posicionamiento. En los trabajos realizados por Want (2006) e Ilie-Zudor et al. (2011) se realiza un estudio sobre los principios básicos de funcionamiento de RFID y las aplicaciones más comunes. No obstante, existen algunos estudios que aplican esta tecnología específicamente a la seguridad industrial de los trabajadores. Por ejemplo, (Chae & Yoshida, 2010) proponen el uso de un sistema RFID para la prevención de colisiones

por accidente entre personal laboral y maquinaria pesada, tales como excavadoras o grúas. En este trabajo los autores recopilaron datos de diferentes lectores RFID situados en zonas estratégicas, dentro de un entorno real de trabajo. Los autores concluyen que para una aplicación práctica del sistema es necesario un método más preciso en la estimación de las zonas de detección, es decir, un sistema RFID que proporcione más precisión en la localización de los trabajadores en relación con las máquinas.

En (Teizer et al., 2010) se propone un sistema de alertas mediante sensores de proximidad inalámbricos para mejorar la seguridad de los trabajadores en obras de construcción. Se pretende que el sistema desarrollado alerte a los trabajadores (tanto aquellos que están trabajando con maquinaria como los que se encuentran en la zona de obra) cuando existe una situación de accidente grave e inminente. Los autores realizaron varios experimentos en situaciones reales. Para la estimación de la proximidad, el sistema se basó en la intensidad de la señal recibida (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*). Se recopilaron las distancias entre transmisores y receptores en el momento de activación de las alarmas. Los autores concluyen que, si bien el sistema propuesto muestra resultados alentadores para una implementación real, es necesario resolver una serie de aspectos, tales como un calibrado específico según las características del dispositivo inalámbrico utilizado, y más ensayos de campo teniendo en cuenta los tiempos de reacción, además de considerar otras técnicas de posicionamiento. En otro estudio, realizado por (Ko, 2010), se propone el uso de un sistema RFID para localización 3D a partir de un algoritmo basado en el método del gradiente descendente y que utiliza medidas RSSI. En los experimentos realizados, se localiza una etiqueta a partir de otras nueve de referencia y cuatro lectores RFID. Los tests de prueba del algoritmo propuesto se realizaron en un espacio de 926 cm de longitud, 535 cm de anchura y 211 cm de altura, mostrándose una convergencia del algoritmo hacia la posición real de la etiqueta. Sin embargo, en este estudio no se especifica la precisión alcanzada por el sistema de forma explícita, ni situaciones donde la etiqueta a localizar se encuentre en movimiento. En (Kim & Kim, 2012) se describe otro ejemplo de aplicación, en este caso para la mejora de la seguridad en grúas de carga. La obtención de la posición de los trabajadores se basó en medidas de tiempo.

En general, la mayoría de las investigaciones que estudian el uso de sistemas de posicionamiento basados en radiofrecuencia concluyen que es necesario realizar más

pruebas en instalaciones reales, especialmente respecto a la influencia de factores como la humedad, temperatura, y características del entorno que degradan la precisión en el posicionamiento (Teizer et al., 2010).

### 3.2.2.2 Estrategias basadas en radio para posicionamiento

En los últimos años se está investigando cómo reducir el error en los sistemas de localización por radio con el fin de habilitar nuevas aplicaciones. Para ello, se proponen y estudian nuevas técnicas y métodos de posicionamiento. Existe además un creciente interés, tanto académico como industrial en aplicaciones de posicionamiento *indoor* (zonas interiores), donde sistemas que ya llevan tiempo implantados en el mercado de forma comercial no funcionan adecuadamente, como por ejemplo el sistema GPS (*Global Positioning System*). Algunos grupos de investigación afirman haber desarrollado prototipos que alcanzan precisiones del orden del decímetro o incluso del milímetro (Mahfouz et al., 2008; Zetik et al., 2004; Zhang et al., 2009, 2006). En el trabajo realizado por (Zhang et al., 2010) se presenta un resumen de sistemas comerciales y grupos de investigación que han desarrollado sistemas de posicionamiento de alta precisión (entendiéndose “alta precisión” aquellos sistemas cuyo error medio en el posicionamiento es menor de 20 cm, si bien sería necesario especificar en qué condiciones se consigue dicho error). Dichos sistemas se basan en las tecnologías de radio UWB (*Ultra-Wide Band*) o FMCW (*Frequency Modulated Continuous Wave*). También, en (Zhang et al., 2010) se propone un sistema de posicionamiento UWB con un error de posicionamiento en 3D estático y dinámico de 2 y 5 mm, respectivamente, en un rango de 5 m. Las precisiones obtenidas en entornos *indoor* se encuentran en el rango desde milímetros hasta los 20 cm. Tales niveles de precisión pueden permitir nuevas aplicaciones *wireless*, incluyendo control de robots, seguimiento de objetos, posicionado de herramientas, o incluso aplicaciones médicas de cirugía (Merkl, 2008). Como se puede intuir de lo comentado hasta ahora, existen diferentes técnicas para estimar la posición de un objeto. Una revisión de las diferentes técnicas para llevar a cabo la tarea del posicionamiento se realiza en (Vossiek et al., 2003), (Sahinoglu et al., 2008) y (Patwari et al., 2005); realizándose en este último trabajo una introducción de los diferentes métodos de procesado, incluyendo modelos estadísticos de varias técnicas de posicionamiento existentes en la literatura, como las basadas en tiempo de llegada (*Time of Arrival*, ToA), el ángulo de llegada (*Angle of*

*Arrival*, AoA), RSSI, la diferencia de tiempos de llegada (*Time Difference of Arrival*, TDoA), o el tiempo de ida y vuelta (*roundtrip-time-of-flight*, RTT). Además, se discuten las diferentes fuentes de error que pueden degradar el rendimiento del sistema, tales como el ruido aditivo, problemas de calibración o diferentes tipos de interferencias en el entorno.

Este tipo de sistemas y métodos, si bien se pueden considerar sistemas RFID con capacidades avanzadas, son equipos diseñados específicamente para tareas de posicionamiento, y que también se han investigado para uso en aplicaciones de seguridad industrial. Entre ellos, UWB se considera una tecnología emergente para la localización, con niveles elevados de precisión. Por ejemplo, en (Cheng et al., 2011) se evalúa un sistema comercial UWB para el seguimiento de equipos móviles en obras de construcción. Los autores llevaron a cabo un conjunto de experimentos para la evaluación del error de posicionamiento del sistema. Para la cuantificación de dicho error se utilizó una estación total robótica (*Robotic Total Station*, RTS). En otro trabajo realizado por NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*) (Li et al., 2012) se investiga el uso de sistemas de proximidad en seguridad industrial, en este caso basados en generadores de campo magnético. Se describe y propone un sistema de proximidad basado en sensores magnéticos para detección de vehículos en minería. Mediante dicho sistema se pretende localizar a los trabajadores y la distancia a la que se encuentran respecto a diferentes partes de la maquinaria. En este estudio, los autores recopilaron los datos capturados por sensores magnéticos acoplados en los trabajadores. Estos sensores miden el flujo magnético de generadores de campo magnético emplazados estratégicamente en diferentes localizaciones de maquinaria. También se presenta un modelo teórico tridimensional y bidimensional de la distribución de flujo magnético producido por los generadores. Como complemento de este estudio, sería conveniente proporcionar los errores de localización en caso de movimiento (es decir, la velocidad con la que una máquina se acerca a un operario o éste a una región peligrosa), o en qué posiciones se produce el máximo error.

Existen además, desde el punto de vista teórico, una serie de herramientas matemáticas que resultan de interés general a la hora de diseñar un sistema de posicionamiento y establecer unas pautas iniciales. Una de ellas es la cota inferior de Cramér-Rao (*Cramér-Rao Lower Bound*, CRLB). El CRLB proporciona una cota

inferior para la varianza de un estimador no sesgado. Es decir, el CRLB da respuesta a la pregunta “¿existe una varianza mínima que no pueda rebajar un estimador no sesgado de un parámetro?”. Este concepto es aplicable a estimadores no sesgados basados en RSSI, TOA, AOA o una combinación de ambos (Patwari et al., 2005). Este límite se suele utilizar como una medida de evaluación para un conjunto de estimadores, por ejemplo, aquéllos que estiman la distancia entre un transmisor y un receptor. En (Wang et al., 2009) se deriva el CRLB para la estimación de distancias considerando RSSI (a partir de la amplitud de la señal recibida) y TOA, donde los autores afirman que es posible utilizar dicho CRLB con tanto señales UWB como señales con anchos de banda menores. En (Tüchler et al., 2005) se estudia la precisión alcanzable de un sistema UWB utilizando técnicas basadas en TDOA. Los autores afirman la obtención de precisiones del orden del centímetro en distancias de hasta 40 m y bajo condiciones LOS. En el diseño de las características del sistema se utiliza el CRLB para predecir la menor varianza posible en la estima del tiempo de llegada de un pulso. La cota CRLB sirve por tanto para predecir las expectativas de precisión alcanzables por el sistema, y qué características habría que modificar para que ésta aumente o disminuya (SNR mínimo, periodo de muestreo de la señal recibida, etc.). El CRLB se estudia con mayor grado de detalle en el capítulo 4.

En definitiva, existen líneas de investigación activas relacionadas con los sistemas de localización basados en radiofrecuencia, desde la aplicación de sistemas de identificación RFID a la implementación de estrategias específicamente diseñadas para localización. Recientemente, se han propuesto otras estrategias que también podrían emplearse para aplicaciones de seguridad. Por ejemplo, en los trabajos de (Zhang et al., 2011) y (Zhang et al., 2008) se han desarrollado métodos para lo que denominan “distinción de localización” (*location distinction*), término que define la capacidad del sistema para determinar cuándo un transmisor ha modificado su posición. A diferencia del posicionamiento como tal, la distinción de localización no tiene como objetivo determinar dónde se encuentra un transmisor concreto, sino detectar cuando su localización ha cambiado respecto a una posición anterior. La detección de movimiento también es una aplicación potencial para la distinción de localización que podría aplicarse en seguridad industrial. Como consecuencia de estos trabajos, en (Zhang et al., 2011) se han elaborado un conjunto de estrategias complementarias denominadas “distinción de perímetros” (*perimeter distinction*). A diferencia de la distinción de

localización, en este caso se pretende detectar si un transmisor se encuentra en una zona u otra, separadas por algún límite, como paredes. De este modo, esta estrategia podría emplearse para separar zonas de peligro de zonas seguras, distinguir áreas interiores o externas a un edificio, o localizar si un transmisor se encuentra en una habitación u otra. Los autores afirman alcanzar una probabilidad de acierto de hasta el 98% en la distinción de perímetros.

Además de la componente técnica del dispositivo de protección, otro de los aspectos a tener en cuenta en la eficacia es el grado de aceptación por parte de los trabajadores de los nuevos dispositivos. El nivel de aceptación puede ser muy dependiente de la tasa de falsas alarmas. Por ejemplo, un elevado número de falsas alarmas por parte del dispositivo puede causar que, finalmente, los trabajadores ignoren nuevas alarmas o reaccionen de forma lenta a una emergencia real. En (Swets et al., 2000) se estudia este problema mediante reglas de predicción y haciendo uso de las denominadas curvas ROC (*Receiver Operating Characteristic*). Las curvas ROC se pueden utilizar para encontrar una solución de compromiso (en términos de probabilidad) entre verdaderas y falsas alarmas, considerando diferentes algoritmos. El análisis basado en ROC puede servir de ayuda para elegir un límite específico (valor de un parámetro como puede ser el RSSI) para activar una alarma y tomar la decisión de ejecutar una parada de emergencia u otro evento. El establecimiento de límites muy estrictos limitará las falsas alarmas a costa de no detectar algunas que sí sean verdaderas. Por el contrario, un límite menos restrictivo maximizará la detección de estas últimas (alarmas verdaderas) aumentando también las falsas. Qué límite es el adecuado es una cuestión que va a depender de varios factores, como el coste de las falsas alarmas y la gravedad en caso de accidente. En algunas de las estrategias comentadas anteriormente (localización por distinción, y distinción de perímetros) los autores utilizan las curvas ROC como criterio cuantitativo para evaluar el rendimiento de los diferentes algoritmos propuestos.

### **3.3 DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE ENSAYOS**

Como se mencionó al inicio de este capítulo, el banco de ensayos que se describe pretende servir como una herramienta que permita analizar de manera cuantitativa dispositivos de seguridad electrosensibles y basados en radiofrecuencia. Para ello se ha utilizado un robot ABB IRB 2400L, disponible en el laboratorio de automática de la

Universidad de Córdoba. El controlador asociado al robot permite posicionar el extremo del manipulador con una precisión inferior al milímetro (ABB Robotics AB, a). En dicho extremo se ha integrado una mano de material plástico (polietileno) y una muñequera con al menos una etiqueta RFID. La adaptación de la mano al robot se ha realizado mediante el diseño de un soporte que permite acoplarla. Esta configuración simula el acercamiento de la mano de un operario a la zona peligrosa.

Los movimientos del robot se han programado de manera que la mano se introduce de forma automatizada en la zona de peligro, repitiéndose esta acción a través de diferentes puntos previamente definidos. Cuando una de las etiquetas RFID es detectada por el lector, el microcontrolador de la placa de circuito impreso envía una señal a una de las entradas del robot, almacenándose entonces la posición donde se ha producido el paro en un archivo de texto, en la memoria del controlador del robot. Este experimento se itera un número determinado de veces. A partir de los datos almacenados se obtiene un conjunto de parámetros estadísticos para cada uno de los puntos de entrada, utilizando los datos almacenados con un software desarrollado bajo Matlab y que se comenta más adelante.

Mediante esta configuración es posible definir diferentes áreas de peligro. Se pueden especificar una serie de parámetros que caracterizan el tipo de ensayo a realizar. Por ejemplo, por programa se puede determinar el número de veces que el manipulador va a repetir una determinada trayectoria, y pueden compararse las posiciones obtenidas mediante el equipo de radiofrecuencia analizado, tomando como referencia la trayectoria programada y descrita por el robot. El robot ABB puede cubrir aproximadamente un volumen de 2.6 m·2.6 m·1.6m (largo, ancho, alto) (ABB Robotics, a). El controlador también permite estudiar otras características, como la dependencia de la velocidad del transmisor (acoplado en el extremo del manipulador) con el grado de desempeño del equipo analizado, la degradación del sistema por la presencia de diferentes materiales en el entorno (metales o líquidos), o su comportamiento en situaciones LOS y NLOS. En definitiva, mediante esta configuración es posible llevar a cabo una serie de experimentos que permiten obtener parámetros estadísticos y caracterizar el dispositivo analizado mediante un análisis off-line. Todas estas características hacen que este banco de ensayos sirva de complemento para la evaluación de algunas de las técnicas de localización comentadas anteriormente. Por

ejemplo, la metodología empleada en (Teizer et al., 2010) utilizada para calibrar las distancias de disparo podría valerse de este banco de ensayos, específicamente en las alertas que necesitan dispararse cuando la distancia entre el transmisor y el receptor es de menos de 2 m. Lo mismo sucede para la evaluación de estrategias similares a la de “distinción de localización” descrita en (Zhang et al., 2008) y (Patwari & Kasera, 2011).

El robot utilizado soporta programación punto a punto mediante el lenguaje RAPID (ABB Robotics AB, b). En este trabajo el robot se ha programado específicamente para simular los movimientos del brazo de un operario y su acercamiento a la zona peligrosa de una prensa hidráulica. El extremo del manipulador se introduce de forma automatizada en la zona de peligro, repitiéndose esta acción a través de diferentes puntos previamente definidos. Para cada punto de entrada se obtiene la desviación típica, la distancia media de paro y los valores máximos y mínimos. De esta forma se ha caracterizado la robustez del prototipo RFID en la detección de un transmisor (etiqueta RFID) que se acerca a un plano. La Figura 3.2 muestra un diagrama general con los principales componentes que conforman el banco de ensayos.

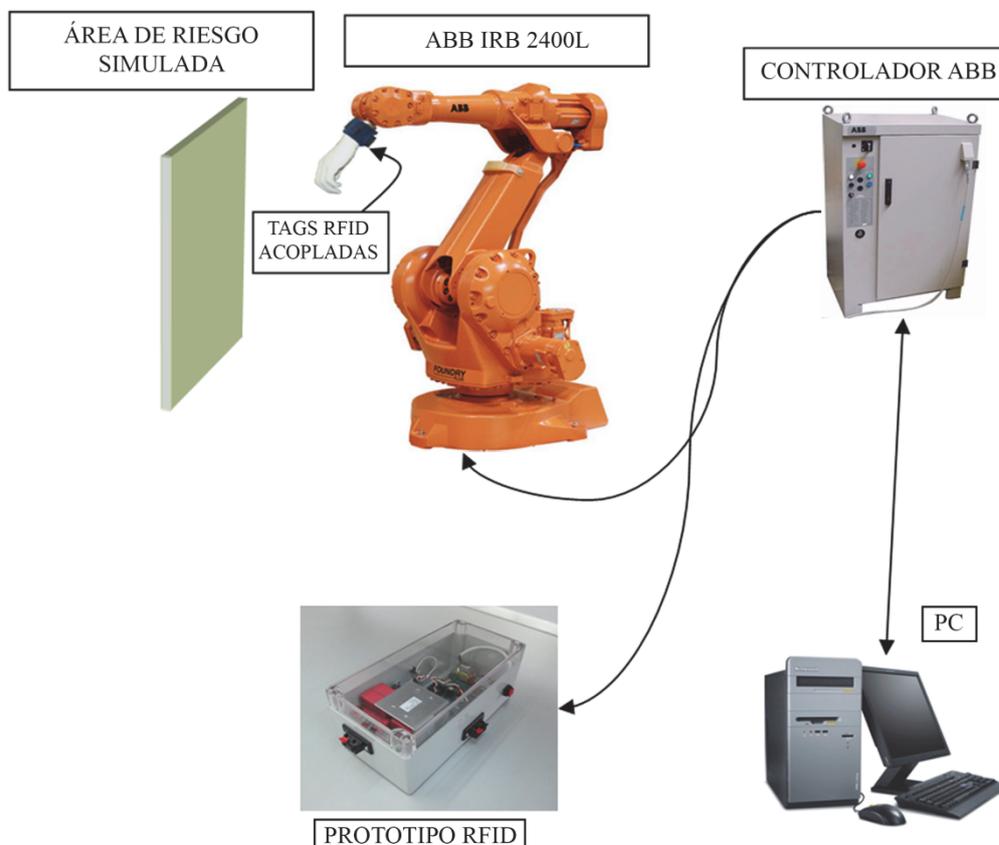


Figura 3.2. Principales componentes del banco de ensayos

Con esta configuración, el uso del robot posibilita la definición de diferentes zonas de riesgo. Dicha definición se puede realizar mediante el lenguaje RAPID soportado por el controlador. La configuración mostrada en la Figura 3.2 simplemente necesitaría redefinir los puntos de entrada, que es una modificación software y no condiciona el banco de ensayos a nivel de hardware. Esta flexibilidad posibilita la simulación de diferentes áreas de peligro para distintas máquinas.

El equipo a estudiar es independiente del banco de ensayos. La única condición necesaria es que se active una salida (conectada a la entrada digital del controlador del robot ABB) durante un periodo de tiempo determinado. Durante este tiempo, el extremo del robot (y por tanto el/los transmisores acoplados) se mueve automáticamente fuera de la zona de riesgo a un punto donde se garantice que el dispositivo de seguridad no se activa; esto se realiza mediante una rutina asociada a la interrupción por programa. Una vez fuera, se realiza una espera hasta que la salida del equipo de seguridad mencionada anteriormente se desactiva. El tiempo de activación de la salida debe de ser lo suficiente para permitir que el robot finalice el movimiento y el extremo salga de la zona de riesgo. Bajo estas condiciones es posible automatizar movimientos a través de diferentes puntos a lo largo de la zona de peligro. La circuitería que permite mantener activada la salida del equipo no es compleja, un temporizador es suficiente. En este caso, el temporizador se ha programado por software en la placa diseñada para controlar el prototipo RFID (explicada en el capítulo anterior).

Como ya se ha comentado, en los ensayos realizados en laboratorio, cada vez que se activa la salida RFID, se almacena la posición generada por el controlador del robot. Los puntos por los que el extremo del manipulador entra en la zona de peligro están programados en el controlador ABB, y definen la zona de riesgo. Para este trabajo, se ha acoplado al extremo del manipulador una mano fabricada en polietileno y al menos una etiqueta RFID. La distancia entre el punto más extremo de la mano y las etiquetas es de 180 mm, tal y como se muestra en la Figura 3.3.

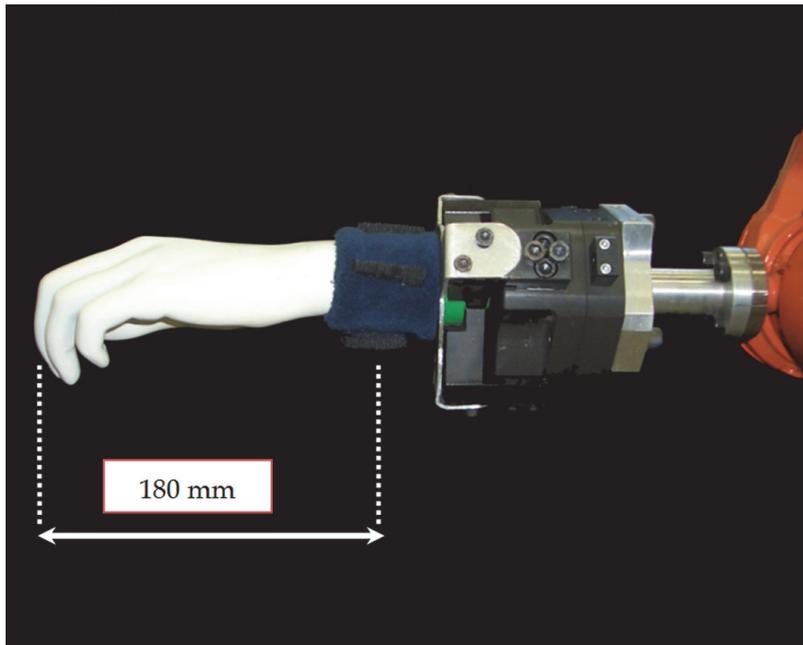


Figura 3.3. Distancia entre las etiquetas RFID y el extremo de la mano

El equipo de protección aquí propuesto podría clasificarse como una barrera de seguridad electrosensible, con la capacidad añadida de *distinguir* si el objeto que está entrando en la zona de peligro es una pieza a procesar o una parte del cuerpo del operario (en la cual se encontraría un transmisor acoplado bien en la indumentaria o en guantes). Aunque no hay estándares específicos para los dispositivos de seguridad basados en radiofrecuencia (OSHA, 1987), existe una relación importante con el banco de ensayos propuesto y los requisitos generales y ensayos de validación de dispositivos de protección (UNE-EN 61496-1:2004/A1:2008, 2004; UNE-EN 999:1999+A1:2008, 1998), así como la normativa que aborda la aplicación de dispositivos de protección en prensas hidráulicas (UNE-EN 693:2001, 2001). Esta normativa se comenta en detalle en el Apéndice I. Además, en (Sklet, 2006) se realiza una extensa clasificación de dispositivos que actúan como barreras de seguridad. Una posible definición es la siguiente: “las barreras de seguridad son medios físicos y no físicos diseñados para prevenir, controlar o mitigar eventos no deseados o accidentes”. Esta definición incluye los dispositivos SIS (*Safety Instrumented Systems*), definidos en el estándar (IEC 61508, 1998) y la norma correspondiente UNE-EN 20324:1993 (UNE-EN 20324:1993, 1993), y que contempla cualquier dispositivo eléctrico, electrónico o programable, compuesto por cualquier combinación formada por sensores, lógica digital y elementos actuadores (como por ejemplo relés para activar/desactivar una salida). En el trabajo realizado por (Leveson, 1995) se define la función *lockout* como aquella que “previene de la

ocurrencia de un evento peligroso o previene que alguien o algo entre en una zona de peligro o riesgo”. De acuerdo con la clasificación realizada por (Sklet, 2006), el tipo de sistema analizado en este capítulo es un SIS. Se trata de un dispositivo activo, y su función principal requiere una acción, definida en este caso como “parada de emergencia”. El equipo de protección también aumenta la seguridad de los trabajadores con respecto a un riesgo específico, desempeñando por tanto la función *lockout*.

### 3.4 PROTOTIPO RFID Y CONEXIONADO CON EL BANCO DE ENSAYOS

En la Figura 2.31 se mostró el prototipo RFID. Para los ensayos se ha conectado la salida de conexionado del prototipo RFID con una entrada digital del robot ABB. Se programó un retardo en el microcontrolador del prototipo RFID para que cuando la señal de paro se active tarde un tiempo en volver a desactivarse. La antena que se ha utilizado tiene una geometría rectangular y se ha emplazado en la región de peligro que se quiere monitorizar. El botón de *reset* no se ha utilizado en los experimentos.

Como ya se comentó en el capítulo anterior, el lector RFID utiliza las denominadas etiquetas pasivas. Este tipo de etiquetas reciben la energía generada por el campo magnético de la antena del lector RFID. La intensidad de campo magnético generado va a determinar, entre otros factores, la distancia a la que la etiqueta se puede comunicar. A mayor intensidad de campo magnético, mayor distancia respecto a la antena a la que la etiqueta puede recibir la energía mínima para comunicarse. En el caso que nos ocupa, y en base a los principios de acoplamiento inductivo, el límite para tomar una decisión (realizar o no una parada de emergencia) va a depender de la intensidad de campo magnético generada por la antena del equipo RFID. La máxima distancia de lectura se obtiene mediante la sintonía de la antena al punto de resonancia. Para el prototipo desarrollado en particular, a partir del conexionado de un conjunto de condensadores es posible conseguir que el prototipo trabaje en su punto de resonancia. El procedimiento de sintonía está descrito en el capítulo 2 y en (Ruz & Vázquez, 2009).

El equipo RFID también da la posibilidad de reducir el campo magnético generado. Esto es posible conectando una resistencia de un determinado valor entre dos pines del lector RFID. A menor valor de la resistencia conectada, menor intensidad de campo (cortocircuitar los pines haría que se generara la mínima intensidad de campo magnético

posible). En los experimentos realizados no se conectó ninguna resistencia, generando la antena RFID la máxima intensidad de campo magnético posible.

### **3.5 DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS**

Para estudiar el rendimiento del prototipo RFID se realizaron varios experimentos. Utilizando la configuración comentada anteriormente, se simuló la zona de peligro de la prensa hidráulica mostrada en el capítulo anterior (Figura 2.25). Las piezas a procesar se introducen por esa zona, siendo ésta una zona de riesgo de atrapamiento para el operario, si no está adecuadamente protegida. En este caso, cuando se detecta alguna de las etiquetas acopladas al extremo del robot, la placa de circuito impreso envía una señal al controlador del robot ABB. Después de un retardo de cinco segundos, se desactiva la señal. Este retardo es suficiente para permitir que el extremo del robot salga de la zona de peligro. Al terminar este retardo, el robot inicia un nuevo movimiento, entrando en este caso por otro punto de entrada definido en el programa.

El banco de ensayos con el prototipo se muestra en la Figura 3.4. La antena RFID cubre un área de 28 cm de alto por 34 de ancho. Se han llevado a cabo varios experimentos, modificando las velocidades de entrada y el número de etiquetas RFID acopladas al extremo del manipulador (una o dos). Se utilizaron tres velocidades diferentes (250, 500 y 1600 mm/s) para mostrar la dependencia de la velocidad de entrada y el paro de emergencia (distancia de detección). Además, 1600 mm/s es una de las velocidades de aproximación de partes del cuerpo humano utilizada para validar dispositivos de seguridad (UNE-EN 999:1999+A1:2008, 1998).

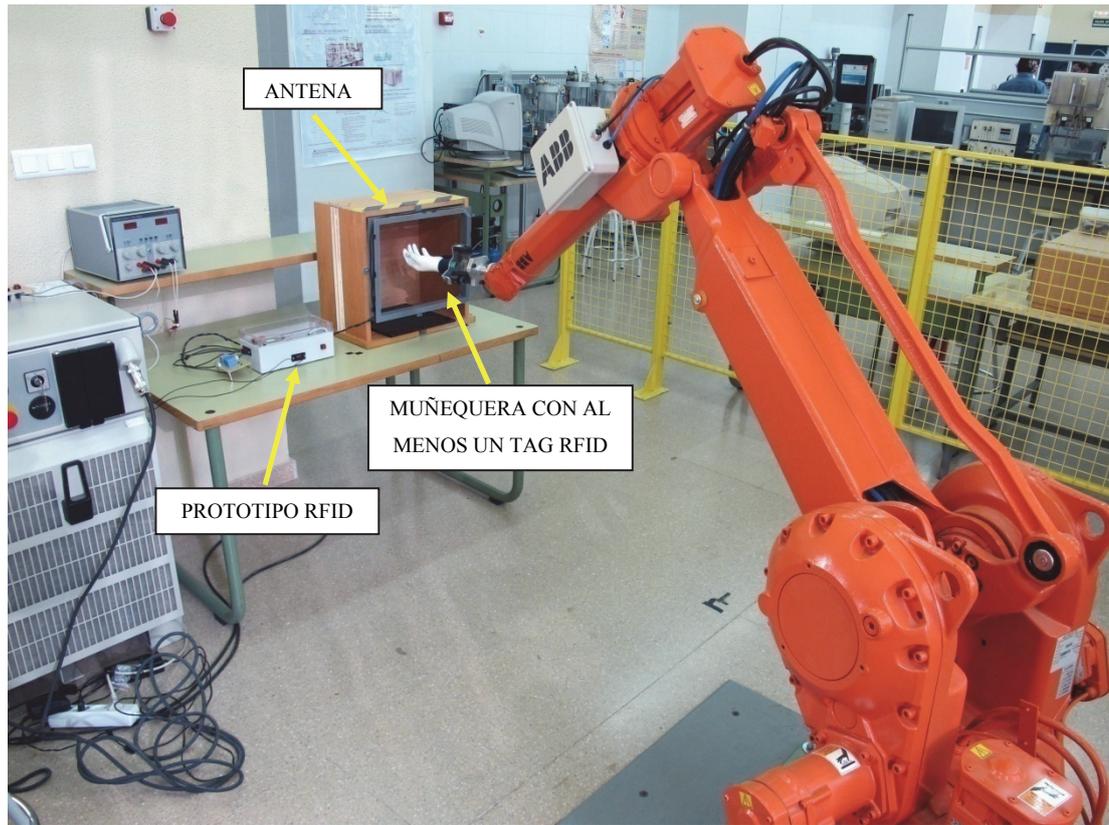


Figura 3.4. Banco de ensayos en el laboratorio de automática

Para la situación analizada, la antena del lector RFID (diseñada utilizando la metodología descrita en el capítulo anterior) cubre un área por donde se simula la entrada de piezas en una prensa hidráulica. A continuación se definen las características comunes de los experimentos. Se ha utilizado un *grid* de 24 puntos que cubre la zona de peligro simulada, estructurado en 3 filas de 8 puntos, entrando la mano de forma lineal y perpendicular al plano formado por la antena. Las filas están separadas a una distancia de 60 mm, cubriendo toda la región de peligro. Se han utilizado etiquetas RFID pasivas de 32 mm de longitud, insertadas en una muñequera, mostrada en la Figura 3.3. También se ha modificado la orientación de las mismas y utilizado más de una al mismo tiempo, para mostrar así los principales problemas del lector RFID utilizado para esta aplicación, concretamente la dependencia de la orientación de las antenas explicada en el capítulo anterior y la incapacidad de leer varias etiquetas al mismo tiempo (Ruz & Vázquez, 2009).

### 3.5.1 Enfoque matricial

Para el cálculo de los parámetros estadísticos de cada punto de entrada se desarrolló un enfoque matricial respecto al área de riesgo definida. De esta forma, se distinguen los datos almacenados según el punto de entrada, siendo posible obtener parámetros estadísticos para cada uno de ellos. Esta capacidad es clave para evaluar dispositivos basados en radiofrecuencia, ya que la presencia de metales y otros materiales en el entorno pueden modificar las zonas de detección del sistema (Li et al., 2012), y los errores en la localización se hacen dependientes de los puntos de entrada.

El enfoque matricial se basa en una correspondencia unívoca de cada punto de entrada con un elemento de la matriz, permitiendo de esta manera la definición de una matriz según el escenario considerado. Las matrices “*Means*” (medias) y “*Stds*” (desviaciones estándar) de la Figura 3.6 representan los valores medios y las desviaciones típicas obtenidas para cada punto de entrada. Estos valores se calculan en función del número de iteraciones, es decir, el número de veces,  $N$ , que el robot cubre toda la zona de peligro. Las distancias de detección almacenadas se reorganizan por programa de forma matricial. Por cada iteración se genera una matriz  $D_k$ , tal y como se muestra en la ecuación (3.1). Cada elemento de la matriz  $D_k$  está relacionado con un punto de entrada. Los parámetros estadísticos se obtienen mediante la combinación de las matrices  $D_k$ . Las siguientes ecuaciones y la Figura 3.5 clarifican la estructura matricial que se utiliza.

$$D_k = \begin{pmatrix} D_{k(1,1)} & D_{k(1,2)} & \dots & D_{k(1,n)} \\ D_{k(2,1)} & D_{k(2,2)} & & D_{k(2,n)} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ D_{k(m,1)} & D_{k(m,2)} & \dots & D_{k(m,n)} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

$$Means = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N D_k \quad (3.2)$$

$$Stds(i,j) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (D_{k(i,j)} - Means_{(i,j)})^2} \quad (3.3)$$

$\forall_{i,j} i = 1 \dots m, j = 1 \dots n$

Los parámetros estadísticos se almacenan de forma estructurada, teniendo en cuenta el punto de entrada y su posición relativa, en este caso considerando el plano que define la zona de peligro. Por ejemplo, el elemento (1,1) se corresponde con el punto de entrada de la esquina superior izquierda de la antena rectangular, el elemento (1,2) el siguiente punto de la misma línea, el (1,3), el siguiente, etc. En la Figura 3.5 se muestra un esquema que ilustra la correspondencia entre la representación matricial y cada punto de entrada definido. En cada matriz de la Figura 3.6, el valor máximo obtenido se muestra en color rojo y mediante el símbolo  $\blacksquare$ . El valor mínimo se ha representado de la misma forma, en azul y con el símbolo  $\blacksquare$ .

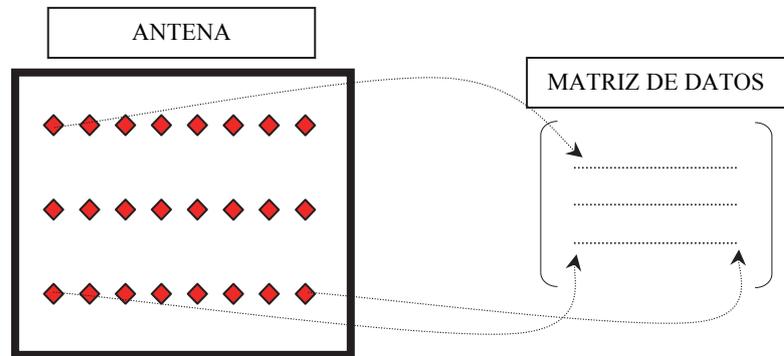


Figura 3.5. Correspondencia entre los puntos de entrada y la representación matricial

En todos los experimentos realizados, la antena funciona en el punto de resonancia, correspondiéndose con el máximo rendimiento del equipo en lo que a distancia de detección se refiere. Las posiciones representadas en los histogramas y tablas de los resultados experimentales se corresponden con el punto extremo de la mano. Para obtener la distancia de lectura habría que agregar 180 mm, tal y como se muestra en la Figura 3.3 (cuando hay dos etiquetas se acoplaron de modo que se encontraban a la misma distancia respecto al plano formado por la antena). A partir de las distancias de detección para cada punto de entrada se han generado dos superficies que definen un intervalo donde se encuentran aproximadamente el 95% de las medidas que se obtuvieron. Para realizar este cálculo, se ha asumido una distribución normal para cada punto de entrada. Se considera válida esta suposición para todos los experimentos realizados. De no ser así, se especifica en el experimento concreto. Se recopilaron un total de 1200 distancias, lo que se corresponde a que el extremo del robot entró 50 veces por cada uno de los 24 puntos de entrada definidos.

### **3.6 RESULTADOS EXPERIMENTALES**

Se muestran a continuación los resultados de los experimentos realizados para analizar la robustez del prototipo RFID. En la Tabla 3.3 se resumen las características particulares de cada experimento. En la primera columna se muestra el nombre del experimento. La segunda columna indica la velocidad de entrada con la que el extremo del manipulador penetra en la zona de peligro. Las velocidades han sido 250, 500 y 1600 mm/s. La tercera columna indica el número de etiquetas que se utilizaron (1 ó 2), acopladas en la muñequera dispuesta sobre la parte extrema del robot. Por último, la última columna indica algún dato adicional o característica especial del experimento realizado, como el acople de una barra metálica o la disposición de dos etiquetas formando 45 grados respecto al plano que forma la antena, donde se ponen de manifiesto las principales limitaciones del prototipo RFID (experimento 5).

La Figura 3.6 muestra las medias y las varianzas obtenidas para cada punto de entrada, utilizando la representación matricial mostrada en la Figura 3.5. En la Tabla 3.4 se representan los valores más significativos de cada experimento, incluyendo los valores máximo y mínimo obtenidos, desviaciones típicas máximas y mínimas, y los valores medios máximos y mínimos, así como la diferencia entre ellos. Esta tabla muestra de forma explícita la robustez del dispositivo analizado. Es importante destacar que en el experimento 5 hay ocasiones donde no se detectó ninguna etiqueta. Para estos casos, se penalizó la distancia de detección con un valor de -180 mm, que equivale a una completa introducción de la mano en la zona de peligro.

En la Figura 3.7 se muestran los experimentos más significativos, bien por representar un funcionamiento ideal del equipo o por resaltar la peor de las situaciones. En cada caso, la primera gráfica (en la parte izquierda) muestra los valores medios más y menos la desviación estándar de cada punto de entrada en particular, correspondiéndose con los datos mostrados en la Figura 3.6. En la segunda gráfica se muestran las dos superficies, en cuyo intervalo se encuentran el 95% de las distancias medidas, asumiendo una distribución normal. La Figura 3.8 muestra la distribución normal asociada a cada uno de los experimentos y basada en todos los datos, es decir, independientemente del punto de entrada. Se puede observar cómo en el experimento 5 (EXP5) los datos almacenados no pueden modelarse bien mediante una distribución normal. Como referencia, se ha incluido una distribución de tipo no paramétrico.

Tabla 3.3. Resumen de los experimentos realizados

Experimento	Velocidad (mm/s)	Nº de etiquetas	Característica del experimento
EXP 1	250	1	Orientación ideal (etiqueta perpendicular al plano definido por la antena)
EXP 2	500	1	Orientación ideal (etiqueta perpendicular al plano definido por la antena)
EXP 3	250	2	1 etiqueta perpendicular y otra paralela al plano definido por la antena
EXP 4	250	1	Barra metálica acoplada al extremo del manipulador
EXP 5	250	2	Cada etiqueta forma 45° respecto al plano definido por la antena (peor caso debido a la incapacidad de lectura simultánea de tags del lector RFID)
EXP6	1600	1	Velocidad de aproximación incluida en norma UNE-EN 999

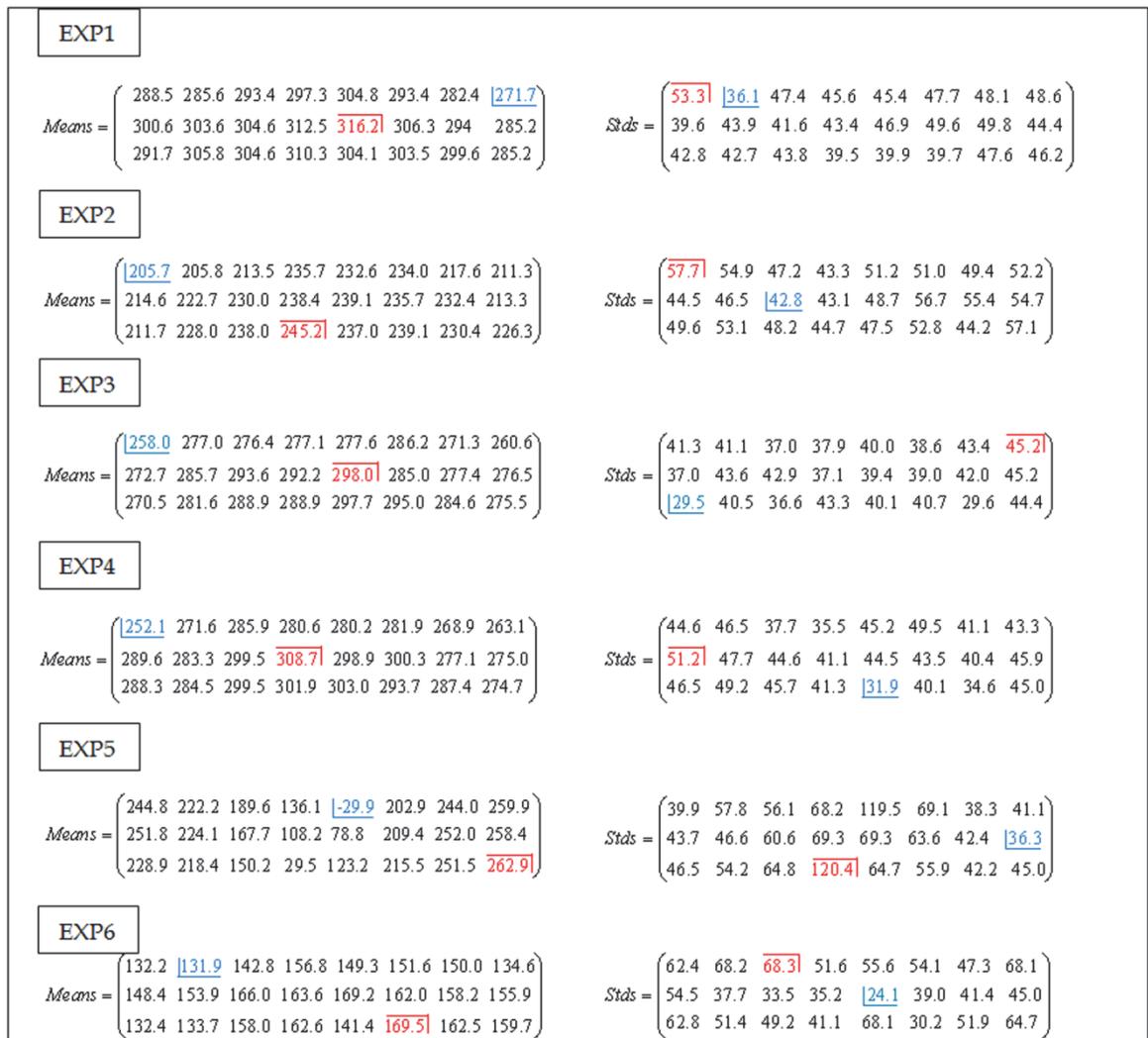


Figura 3.6. Medias y desviaciones típicas para cada punto de entrada

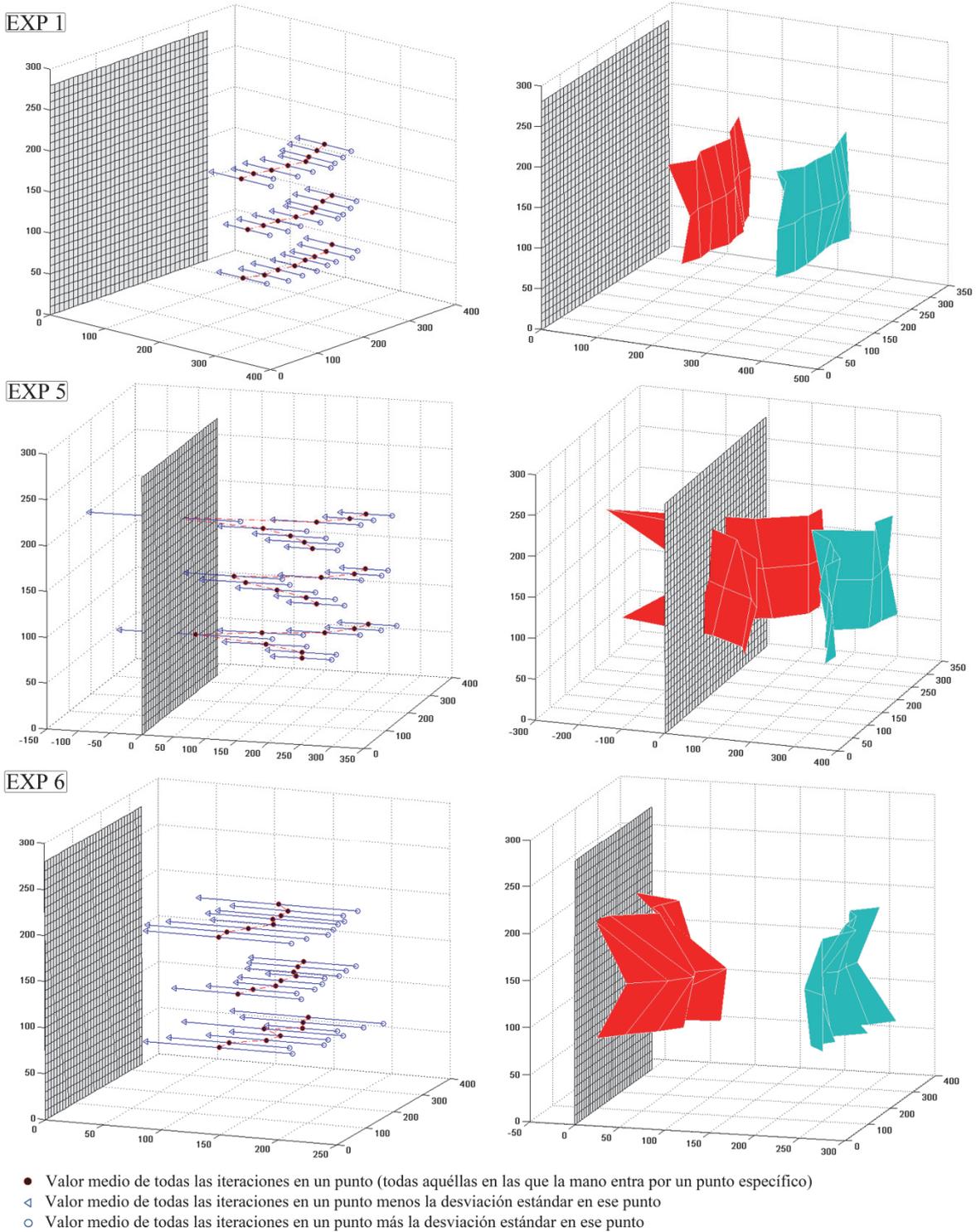


Figura 3.7. Experimentos más significativos (datos en mm)

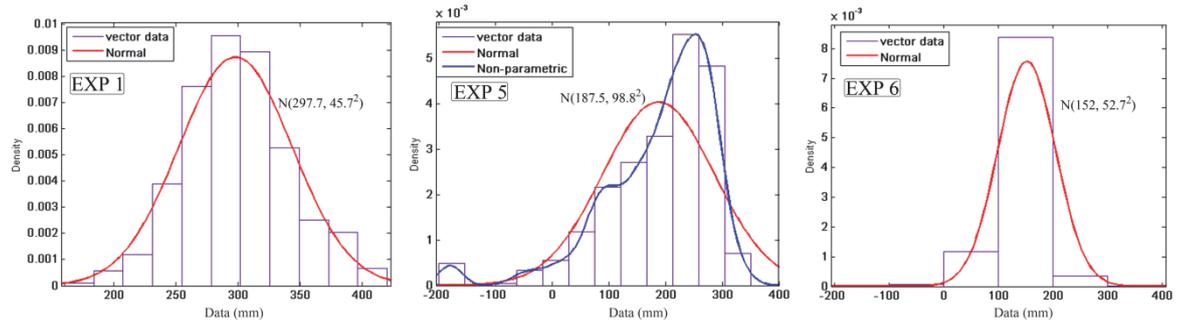


Figura 3.8. Distribuciones de las distancias de detección asociadas a los experimentos 1,5 y 6

Tabla 3.4. Valores significativos de cada experimento (en mm)

Experimento	Media	STD	Valor
<i>EXP 1</i>			
<i>Máximo</i>	316.2	53.3	418.5
<i>Mínimo</i>	271.7	36.1	170.7
<i>Diferencia</i>	44.5	17.2	247.8
<i>EXP 2</i>			
<i>Máximo</i>	245.2	57.7	350.7
<i>Mínimo</i>	205.7	42.7	61.0
<i>Diferencia</i>	39.5	15.0	289.7
<i>EXP 3</i>			
<i>Máximo</i>	298.0	45.2	394.3
<i>Mínimo</i>	258.0	29.5	152.7
<i>Diferencia</i>	40	15.7	241.6
<i>EXP 4</i>			
<i>Máximo</i>	308.7	51.2	406.4
<i>Mínimo</i>	252.1	31.9	161.5
<i>Diferencia</i>	56.6	19.3	244.9
<i>EXP 5</i>			
<i>Máximo</i>	262.9	120.4	339.9
<i>Mínimo</i>	-29.8	36.3	-180.0
<i>Diferencia</i>	292.7	84.1	519.9
<i>EXP 6</i>			
<i>Máximo</i>	169.5	68.3	328.4
<i>Mínimo</i>	131.9	24.1	-132.3
<i>Diferencia</i>	37.6	44.2	460.7

Nota: Los valores sombreados en rosa indican aquellas ocasiones donde la mano entró (total o parcialmente) en la zona de riesgo simulada.

### **3.6.1 Análisis de los resultados**

Los resultados obtenidos con el prototipo RFID son los siguientes:

- En todos los casos analizados, excepto para los experimentos 5 y 6, el prototipo RFID realiza un paro de emergencia de forma automática antes de que la mano entre en la zona de riesgo. Esta parada se realizó entre 20 y 30 cm de distancia respecto al plano formado por la antena. En el experimento 6 ha habido 10 ocasiones donde la etiqueta se detectó pero la mano estaba parcialmente dentro de la zona de peligro. Considerando los resultados almacenados para este experimento, de las 1200 distancias de detección, el prototipo RFID activó 10 veces (0.83%) su salida cuando la mano estaba parcialmente dentro de la zona de riesgo, siendo el valor mínimo de -132.3 mm, tal y como se muestra en la Tabla 3.4. Este valor ocurrió una sola vez, concretamente en el punto de entrada (3,7) de la representación matricial. Como ya se ha comentado, todas las distancias de detección se refieren al punto extremo de la mano, que se encuentra a 180 mm de la etiqueta (o etiquetas). Esto significa que la etiqueta se detectó a una distancia de  $-132.3 \text{ mm} + 180 \text{ mm} = 47.4 \text{ mm}$  respecto al plano que define la antena.
- El experimento 5 es el único donde han existido ocasiones en las que no se ha detectado ninguna etiqueta. En este ensayo, de las 1200 distancias almacenadas, en 27 ocasiones no se detectó ninguna etiqueta, y en otras 27 sí pero cuando la mano se encontraba parcialmente dentro de la zona de peligro simulada, lo que hace un total de 54 distancias negativas (4.5%), ya que cuando no se detectaba ninguna etiqueta se asignaba una penalización de -180 mm. Además, de las 27 ocasiones donde la etiqueta se detectó pero con la mano parcialmente dentro de la zona de peligro, 9 ocurrieron en el mismo punto de entrada. Esto explica por qué el valor medio del punto correspondiente al elemento (1,5) de la matriz “Means” en el experimento 5 es negativo.
- La distancia de paro depende de la velocidad de entrada. En las matrices “Means” de la Figura 3.6 se observa cómo a mayores velocidades de entrada, la detección se produce a menor distancia. Por ejemplo, los valores medios obtenidos en las distancias de detección en el experimento 1 están dentro del intervalo (270, 300) mm. Para el experimento 2, donde la velocidad de entrada

era de 500 mm/s, los valores medios se encuentran dentro del intervalo (205, 245) mm. En el experimento 6 (velocidad de 1600 mm/s) las distancias de detección se encuentran dentro del intervalo de (130, 170) mm. Por tanto, bajo un conjunto común de condiciones, el incremento de la velocidad de entrada disminuye la distancia de detección.

- La distancia de detección también depende de la orientación de las etiquetas respecto a la antena del prototipo RFID. Esta dependencia es mayor cuando hay dos etiquetas. Específicamente, el lector RFID tiene problemas al detectar etiquetas cuando éstas tienen la misma orientación respecto a la antena y se encuentran a la misma distancia de la antena. La capacidad de detección simultánea de etiquetas resolvería parcialmente este problema, permitiendo la detección simultánea de etiquetas.
- La precisión obtenida con este prototipo, en términos de repetitividad y robustez de las distancias de detección, es pobre. Eso queda claro en las matrices “Means” y “Stds” del experimento 5 (Figura 3.6), donde se muestra una dispersión mayor que en los otros experimentos realizados, con desviaciones típicas en el intervalo (35, 121) mm. Esto, unido con la incapacidad de multi-lectura de etiquetas, es una de las principales desventajas del prototipo analizado. Se deben por tanto considerar otras opciones, en particular equipos que permitan implementar estrategias de posicionamiento como las estudiadas en (Li et al., 2012) y (Zhang et al., 2011).
- La configuración basada en robot permite establecer una serie de ensayos que permiten evaluar el grado de desempeño de dispositivos diseñados para funciones de seguridad. En los ensayos realizados también se ha considerado normativa para seguridad en máquinas y la velocidad de aproximación de partes del cuerpo humano (UNE-EN 999:1999+A1:2008, 1998). Por otra parte, el enfoque matricial desarrollado permite definir diferentes áreas de peligro, permitiendo evaluar el rendimiento de equipos de seguridad en diferentes situaciones.

### **3.7 CONCLUSIONES**

En este capítulo se ha descrito el diseño de un banco experimental de ensayos basado en el robot ABB IRB 2400L. Se ha diseñado de forma específica una configuración para el estudio de sistemas de seguridad basados en radiofrecuencia. De este modo, es posible emular tareas llevadas a cabo cerca de zonas peligrosas, y con riesgos asociados para los trabajadores, tales como cortes, atrapamientos o aplastamientos que deben evitarse o reducirse mediante medidas de prevención y protección. Se ha emulado el movimiento de un brazo y su movimiento hacia una región de peligro. El banco de ensayos permite la simulación de diferentes tipos de movimientos a velocidades definidas. La definición de estos parámetros puede ser útil para la validación de dispositivos de seguridad conforme a normativa relacionada con la seguridad en maquinaria. El enfoque matricial propuesto permite la obtención de parámetros estadísticos para cada punto de entrada en la zona de peligro. Así, el banco de ensayos constituye una herramienta para el análisis de dispositivos de seguridad diseñados específicamente para prevenir la entrada de un trabajador, o una parte de su cuerpo, en zonas de peligro. En investigaciones futuras también se pretende utilizar esta configuración para el estudio de sistemas de posicionamiento *indoor* en distancias relativamente pequeñas, del orden del metro.

Respecto al prototipo RFID estudiado, los ensayos llevados a cabo muestran que las distancias de detección dependen de la orientación de las etiquetas y de la velocidad de entrada. La incapacidad de lectura simultánea de etiquetas de este equipo, así como la imposibilidad de emplear un método que permita calibrar de forma precisa una distancia de seguridad (para realizar el paro de emergencia) son los principales problemas a considerar en futuros desarrollos. De esta manera, y tras realizar los experimentos con el banco de pruebas, los principales problemas que hay que reconsiderar son los siguientes:

a) Limitaciones de la capacidad de detección con el lector RFID utilizado:

Con el equipo utilizado, pese a las ventajas que ofrece, no es posible detectar varias etiquetas de forma simultánea, siendo éste un factor limitante. El problema no es que el lector RFID sólo pueda detectar una sola etiqueta en un instante de tiempo, sino que ante la presencia de varias en la región de detección de la antena del equipo, existen situaciones en las que no detecta ninguna. Esta característica podría intentar resolverse

modificando el firmware del lector, de modo que, aunque no se detecte un número de identificación cuando hay varias etiquetas presentes, el lector RFID conozca o diferencie las situaciones de “no hay ninguna etiqueta en la región de lectura” con “existe al menos una etiqueta en la región de lectura”.

b) Precisión en la definición de la superficie de detección de las etiquetas:

Tal y como se muestra en los resultados de las pruebas realizadas, el análisis estadístico recoge unas diferencias de detección de hasta 30 cm o más (comparando con diferentes puntos de entrada y considerando todos los experimentos realizados de la Tabla 3.4). Esto dificulta la definición de un plano de detección, que sería el caso ideal. Asimismo, se necesita establecer una metodología de calibrado que sitúe dicho plano invisible a una distancia concreta de la zona peligrosa donde se pretende aplicar el mecanismo de seguridad.

c) Las velocidades de entrada disminuyen la distancia máxima de detección de la etiqueta:

Muy ligado a los dos puntos anteriores, una elevada velocidad de entrada de la etiqueta en la zona de peligro, por ejemplo 1600 mm/s, provoca que ésta se detecte algo más tarde, es decir, a una distancia más cercana a la considerada como zona peligrosa.

d) Pérdida de la capacidad de detección por interposición de obstáculos:

Los equipos RFID de baja frecuencia tienen como regla general un buen comportamiento ante la presencia de diferentes materiales, incluyendo diferentes tipos de maderas, líquidos, etc. Sin embargo, las aplicaciones con radiofrecuencia sufren ciertos tipos de degradaciones dependiendo del material que atraviesan, como reflexiones o pérdida de la potencia de la señal. Garantizar de alguna forma visibilidad directa (LOS) entre transmisores y receptores es uno de los aspectos a tener en cuenta si se consideran sistemas de posicionamiento, ya que bajo situaciones LOS, como normal general se mejora la precisión en la estima de la distancia.

e) Relación entre la seguridad del trabajador y las etiquetas

El operario debe llevar acopladas las etiquetas para poder hacer una diferenciación en la entrada de la zona de peligro entre cualquier objeto y una parte de su cuerpo. Sin embargo, es perfectamente viable establecer un protocolo de activación de la máquina,

de modo que sea necesario que el lector RFID tenga que detectar, en un intervalo de tiempo determinado, el código identificativo de las etiquetas, obligando de esta forma a que el operario los lleve puestos. También, las etiquetas RFID deberán colocarse en las partes del cuerpo del operario susceptibles de penetrar en la zona de peligro, pudiendo integrarse en la propia indumentaria, muñequeras, o guantes.

Se necesitan por tanto más estudios relacionados con el desarrollo de dispositivos basados en radiofrecuencia para los propósitos aquí considerados. Sin embargo, debido a la reciente evolución en términos de capacidades de posicionamiento de los sistemas de localización basados en UWB, su uso habilitará sin duda aplicaciones innovadoras basadas en radio para la mejora de la seguridad industrial. En el siguiente capítulo se abordan un conjunto de modelos de posicionamiento que también pueden resultar de interés para la aplicación desarrollada con el prototipo RFID, principalmente porque permiten establecer criterios de medida de distancias por radiofrecuencia.

---

## Capítulo 4: Localización cooperativa

---

En este capítulo se aborda el paradigma de la localización cooperativa. En concreto, se estudian algunos de los algoritmos de localización cuya implementación es posible en redes de sensores (WSN). En la localización cooperativa, un conjunto de dispositivos (generalmente denominados en la literatura nodos, motas o sensores) forman una WSN, se comunican entre sí y obtienen de manera conjunta información que permite conocer la estructura de la red, esto es, la localización relativa o absoluta de aquellos nodos cuyas posiciones son inicialmente desconocidas (*blind nodes*).

El conocimiento de las posiciones de los operarios en entornos de trabajo, especialmente en zonas potencialmente peligrosas, proporciona información que, si se garantiza una precisión mínima en la localización, permitiría incrementar la seguridad y desarrollar nuevas aplicaciones. En los dos capítulos anteriores se ha estudiado la aplicación de la radiofrecuencia para la mejora de la seguridad en el uso de maquinaria peligrosa. En este capítulo se considera la aplicación de equipos de radio en un entorno de trabajo completo, como obras de construcción o espacios cerrados, tales como minas o galerías. Para estos casos, la instalación de una WSN que permita posicionar tanto a operarios como equipos de obra, habilita nuevas capacidades de seguridad y acciones automatizadas como, por ejemplo, la activación de alarmas o avisos si se detecta que un trabajador se encuentra en una zona de peligro o no autorizada. También, puede ser

suficiente conocer solo las distancias y posiciones relativas entre operarios. Esta información permite obtener datos sobre la “estructura” o geometría relativa de un grupo de trabajadores, si encuentran en la zona de seguridad que deberían, o guardando una distancia mínima de seguridad respecto a una máquina en específico, o en la región de trabajo donde se había planificado una tarea, en un horario determinado de la jornada.

En relación con las aplicaciones de seguridad comentadas, los algoritmos de localización cooperativa son útiles porque permiten, a partir de información de distancias entre sensores asociados a operarios y maquinaria, obtener como mínimo mapas relativos (posiciones respecto a un sistema de coordenadas arbitrario) de los mismos. Todos estos aspectos se comentan a lo largo del capítulo. Asimismo, se comentan las principales técnicas para la medida de distancias entre transmisores. La estimación precisa de la distancia de una etiqueta RFID (o un nodo) respecto al punto de operación de una máquina o zona de peligro, es una de las líneas de investigación futuras de esta tesis. Este tipo de técnicas pueden ser de utilidad para el desarrollo de dispositivos similares al prototipo RFID, y que mejoren las limitaciones de desempeño en la acción de paro de emergencia, evaluadas en el capítulo 3.

Para comprender los requisitos necesarios en la tarea de posicionamiento, en primer lugar, se realiza una introducción al problema de la localización multiobjetivo, y se definen los conceptos fundamentales en los que se basa (nodos *anchor*, *blind*, conectividad de la red, error en la estimación de distancias, etc.). También se comentan algunas de las aplicaciones de posicionamiento referenciadas en la bibliografía consultada.

En segundo lugar, se realiza una formalización matemática del problema. La magnitud básica para posicionar un dispositivo es su distancia respecto a otros que conforman la WSN. Estas distancias se estiman mediante algún parámetro medible de la señal transmitida. La fiabilidad de estos datos (distancias medidas respecto a las exactas o reales) es determinante en la precisión final obtenida de las posiciones. Por ello, se realiza un estudio básico del estado actual del conocimiento sobre técnicas comunes para la medición de distancias entre sensores, y se describen algunos modelos estadísticos basados en las principales medidas empleadas su estimación (*ranging*). Éstas técnicas se basan en parámetros como el tiempo de llegada (TOA), ángulo (AOA)

o potencia de la señal recibida (RSSI) en un nodo, y que ha sido previamente enviada por otro nodo de la red con el que es posible establecer una comunicación. A partir de estas medidas, se obtiene un conjunto parcial de distancias (con ruido) entre pares de nodos, que constituyen la principal entrada a los algoritmos de posicionamiento. También se presenta la cota inferior de Crámer-Rao (CRLB), particularizada para AOA, TOA y RSSI. El CRLB constituye una herramienta matemática que permite conocer la precisión máxima alcanzable del posicionamiento en función de ciertos parámetros de la red, como la conectividad media o el ruido en las distancias medidas. Su cálculo puede por tanto utilizarse como *benchmark* y guía de diseño de algoritmos de posicionamiento. Por ejemplo, si un algoritmo concreto proporciona resultados cercanos al CRLB, considerando unas condiciones específicas (error medio de las distancias, conectividad de la red, etc.), el margen de mejora va a ser pequeño. Sin embargo, el CRLB también es indicativo de los parámetros que se deberían modificar para rebajar el propio límite. Por ejemplo, aumentar la densidad de nodos de la WSN puede incrementar la precisión global en la tarea de localización, y el CRLB cuantifica esta mejora.

Una vez establecidos estos fundamentos, se abordan de manera específica algunos algoritmos de localización cooperativa. En concreto, se explican de forma detallada los algoritmos basados en la técnica *multidimensional scaling* (MDS), y se presentan un conjunto de funciones que evalúan su grado de desempeño (no sólo para algoritmos MDS), como la funciones *Strain* o *Stress*<sub>1</sub>. Se describen las etapas básicas de este tipo de algoritmos, y se referencian otras propuestas, como el algoritmo ARAP. Como se ha dicho, una característica determinante en la precisión del posicionamiento final es la fiabilidad de las distancias entre pares de nodos conocidas a priori. También es objeto de investigación, y se contempla en el capítulo, la determinación de las distancias desconocidas a priori (reconstrucción de la matriz de distancias).

Finalmente, se presenta y describe *wsnLocalize*, una herramienta interactiva diseñada para simular y comparar algoritmos de localización cooperativa. Tras la descripción del funcionamiento de *wsnLocalize*, se muestran algunos resultados de simulación de diferentes topologías de redes generadas con la herramienta y bajo diferentes condiciones. *WsnLocalize* pretende reunir las herramientas matemáticas mencionadas a lo largo del capítulo y de esta forma facilitar el diseño de sistemas de

posicionamiento multiobjetivo. La aportación principal de esta herramienta es su capacidad para especificar de forma interactiva características particulares de cada uno de los nodos que conforman la red, así como las relaciones de comunicación entre los mismos. De este modo, se incorpora un modelo probabilístico en las simulaciones, lo que permite considerar un conjunto de restricciones que pueden darse en un entorno real, y obtener parámetros estadísticos referentes al posicionamiento de nodos mediante simulaciones de tipo Monte Carlo.

#### **4.1 INTRODUCCIÓN A LA LOCALIZACIÓN COOPERATIVA**

En los últimos años se han producido avances destacables en aplicaciones basadas en radiofrecuencia, lo que ha posibilitado el desarrollo de nuevas estrategias de monitorización y control de diferentes tipos de variables (temperatura, humedad, altura, caudal, etc.) de un modo inalámbrico. Dichas aplicaciones abarcan diferentes ámbitos, como el control de stock en fábricas, detección de niveles de radiación, calidad del aire en centro urbanísticos, detección de fuegos, calidad del agua o localización de animales en entornos ganaderos (Libelium, 2013; Patwari et al., 2005; Yigitler et al., 2010).

La localización automatizada de sensores en redes de comunicaciones proporciona indudablemente información que puede habilitar el desarrollo de nuevas aplicaciones. En ocasiones, es además la propia información referente a la posición de los sensores la que se quiere obtener. En otras aplicaciones donde se capturan magnitudes como temperatura, presión, humedad, etc., la localización del sensor debe conocerse para dar un contexto a los datos recogidos. En cualquier caso, para hacer estas aplicaciones viables desde el punto de vista práctico y económico, los sensores deben tener una cierta autonomía de batería antes de reemplazarla, la propia red que conforman debe poder auto-administrarse sin una intervención significativa por parte del ser humano, y el coste por unidad debe ser bajo, especialmente si la red consta de un número elevado de nodos<sup>1</sup>.

En este capítulo se consideran los algoritmos de localización cooperativa en WSN inalámbricas. Para ello, se parte de una red de nodos intercomunicados entre sí y que

---

<sup>1</sup> Los términos mota, nodos o sensor se han utilizado con el mismo significado a lo largo del capítulo, haciendo referencia a aquellos dispositivos de un coste relativamente bajo con capacidades de comunicación inalámbrica.

cooperan de forma conjunta en la obtención de parámetros que definen su localización. En el problema planteado existe un número  $m$  de nodos, denominados nodos de referencia (*anchor nodes*) cuyas coordenadas de absolutas de posición son conocidas. Las coordenadas para el resto de nodos,  $n$ , son desconocidas (denominándose *blind nodes*) y constituyen el conjunto de parámetros a estimar. La comunicación directa entre pares de sensores dependerá de su rango de cobertura, espaciado y condiciones del entorno. Generalmente, para un entorno determinado, a mayor potencia de transmisión mayor será la distancia de comunicación, y existirán más conexiones directas entre nodos, incrementándose la conectividad<sup>2</sup> media de la red. La comunicación entre un par de nodos permite el intercambio de datos, y por tanto la transmisión de diferentes magnitudes como las mencionadas anteriormente (temperatura, humedad, presión, etc), dependiendo, claro está, del tipo de magnitudes medibles por el dispositivo. Para el caso que nos ocupa, se consideran los parámetros de la señal transmitida que permiten estimar la distancia entre pares de nodos, esto es, medidas de AOA, TOA o RSSI. Esta información generalmente es parcial, es decir, no se conocen todas las distancias entre pares de nodos porque no todos los nodos pueden intercomunicarse entre sí de forma directa (por ejemplo debido a la distancia que hay entre ellos). Las distancias desconocidas se aproximan a partir de las conocidas. Como regla general, cuantas más distancias a priori se conozcan, mejor será la estimación final de la posiciones. Por supuesto, también intervienen otros aspectos, como la geometría de la WSN y la fiabilidad (en términos de error respecto a las distancias reales) de las distancias conocidas, que a su vez depende de las características del entorno y de la tecnología empleada. La Figura 4.1 muestra un ejemplo sencillo de una WSN, donde las líneas discontinuas representan la posibilidad de comunicación *wireless* entre los nodos que unen, y por tanto la posibilidad de la toma de parámetros que permitan estimar su distancia. Las líneas continuas entre nodos *anchor*, numerados alfabéticamente, representan distancias que son perfectamente conocidas, ya que se conocen sus posiciones absolutas. Tal y como se pretende ilustrar mediante esta figura, existen algunos nodos que no pueden comunicarse entre sí de forma directa, como por ejemplo

---

<sup>2</sup> La conectividad de una red es el número medio de nodos comunicados de forma directa entre sí. Dicho de otro modo, dado un nodo  $i$ , los nodos “vecinos” (*neighbors*) se definen como aquéllos con los que es posible establecer una conexión directa. La conectividad se define como el valor medio de nodos “vecinos”.

el 2 con el 9, el 1 con el 10 o el nodo *anchor* *d* con el 4. En una primera etapa, los algoritmos de localización cooperativa tratan de completar esta información de distancias a partir de las distancias conocidas. Además, en la localización cooperativa, se estiman las posiciones de los nodos de forma simultánea, en lugar de calcular la posición de cada uno de ellos de manera individual, como ocurre con otras estrategias. Como en cualquier técnica de posicionamiento, la medida básica para estimar un conjunto de localizaciones de nodos son aquellos parámetros mediante los cuales se pueden estimar distancias. Todos estos aspectos se tratan a lo largo del capítulo.

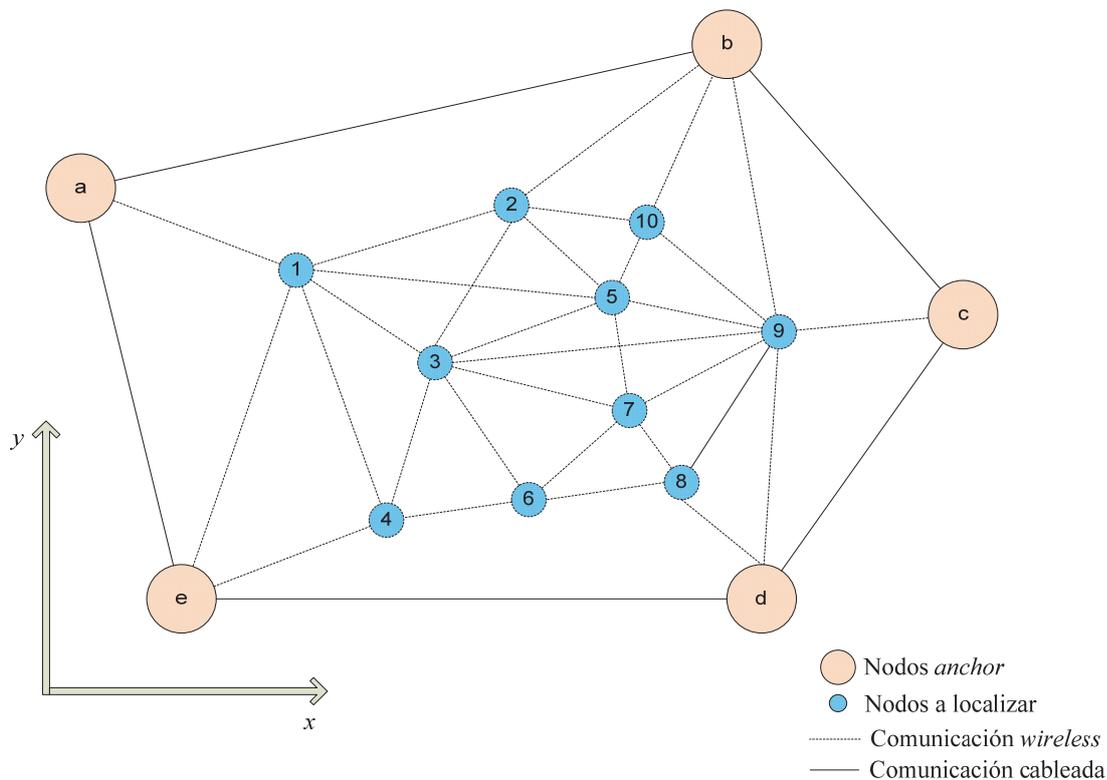


Figura 4.1. Esquema general de una WSN representada mediante un grafo

#### 4.1.1 Aplicaciones de interés basadas en localización

Si la tarea de localización se puede implementar como se ha descrito anteriormente, se pueden desarrollar aplicaciones innovadoras en diferentes ámbitos.

Como ya se ha comentado, dentro del contexto de la seguridad industrial, el desarrollo de las WSNs en espacios cerrados, como la industria minera, galerías de presas u otro tipo de instalaciones interiores, puede incrementar la seguridad de los trabajadores. Como ejemplo específico, la utilización de nodos en ciertos puntos de la

red de iluminación (que casi siempre es necesaria en este tipo de entornos) puede permitir, por un lado, monitorizar variables de la propia instalación de luminaria, realizar un apagado y encendido selectivo de los puntos de luz que se consideren oportunos y de forma automatizada, o realizar otra serie de acciones, como la actuación sobre otros dispositivos conectados a la red. Existe la posibilidad de captura de otro tipo de variables, como el consumo en tiempo real de la red de iluminación o la configuración de diferentes intensidades de luminiscencia. Además de estas posibilidades, en lo que a aplicaciones de posicionamiento se refiere, la red de sensores permitiría localizar a los operarios que lleven un sensor incorporado<sup>3</sup>. Esta última característica indudablemente incrementa el nivel de seguridad, puesto que sitúa al personal laboral dentro de la instalación. En casos extremos, como situaciones de derrumbe en minas, el conocimiento de la posición de los trabajadores puede resultar de importancia en operaciones de rescate o situaciones de desorientación.

La precisión global del sistema de localización va a ser determinante, siendo un factor limitante en el desarrollo de ciertas aplicaciones. En este aspecto, también influyen las posiciones relativas de los nodos *anchor*, la estructura general de la red (uniforme o heterogénea, nodos con capacidades similares o diferentes, densidad de nodos la red, etc) y las condiciones del entorno. Por ejemplo, las posibilidades de posicionamiento que ofrece una red de sensores con tecnología UWB (*Ultra-Wide Band*) va a ser, por lo general, mayor que una red wifi basada en el estándar 802.11, ya que las características de las señales UWB permiten capacidades de precisión mayores (Wymeersch et al., 2009). Sin embargo, el hecho de que una WSN esté diseñada para propósitos de comunicación no quiere decir que sea imposible extraer cierta información relacionada con la localización de equipos. Por ejemplo, el esquema de posicionamiento cooperativo, permite posicionar los nodos de una red a partir de información basada solo en la conectividad de los nodos (se comenta en el siguiente apartado).

En aplicaciones de logística, la instalación de una red de sensores en una planta industrial puede proveer de nuevas capacidades de monitorización de variables y control

---

<sup>3</sup>Existen métodos que incluso permiten detectar la presencia de objetos en movimiento en las zonas monitorizadas sin necesidad de que éstos porten ningún dispositivo electrónico. Esto se consigue mediante técnicas basadas en tomografía de imágenes basadas en radio (RTI)

<http://span.ece.utah.edu/radio-tomographic-imaging>

distribuido, reduciendo el coste en aquellas aplicaciones que típicamente se gestionan de forma cableada. En almacenes, diferentes sensores estratégicamente distribuidos pueden monitorizar las condiciones ambientales y proporcionar esta información a los sistemas de calor, ventilación y aire acondicionado (HVAC) instalados. Los sensores acoplados a equipos móviles pueden ayudar a su localización en caso de pérdida durante la fase inventariado, e incluso ejecutar determinados eventos si se detecta la localización de los equipos fuera del almacén.

En el campo de la investigación biológica, una posible aplicación es el *tracking* de animales. A partir de esta información es posible obtener datos de comportamiento del animal, bien respecto a sus migraciones o a su interacción con otros animales de su misma o diferente especie. Aunque existen propuestas basadas en collares GPS, éstas están limitadas por coste y limitaciones en la autonomía del propio dispositivo. La utilización de una WSN permite la obtención de información adicional. La localización cooperativa entre los sensores incrementa la autonomía respecto a la solución GPS (Patwari et al., 2005), teniendo por tanto que intervenir sobre el animal con menos frecuencia (para recargar o cambiar la batería del sensor cuando ésta se ha agotado). Además, el conocimiento de la distancia entre pares de animales puede proporcionar información acerca su interacción.

## 4.2 DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA

Se considera en este apartado el problema de la estimación de las coordenadas de los nodos que forman una WSN. Por simplicidad en el desarrollo, se parte de una configuración en el plano (dos dimensiones), como la de la Figura 4.1 anteriormente mostrada. Dados  $n$  nodos cuyas coordenadas  $(x, y)$  son desconocidas, el problema de la localización cooperativa consiste en estimar el valor de dichas coordenadas, y que se definen mediante el vector  $\theta = [\theta_x, \theta_y]$ , de modo que:

$$\theta_x = [x_1, x_2, \dots, x_n], \quad \theta_y = [y_1, y_2, \dots, y_n]. \quad (4.1)$$

Por otra parte, se definen las coordenadas de los  $m$  nodos de referencia (nodos *anchor*),  $[x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+m}, y_{n+1}, y_{n+2}, \dots, y_{n+m}]$ , que se consideran conocidas (nodos numerados alfabéticamente en la Figura 4.1). Se define también el conjunto de medidas entre pares de nodos, que forman el conjunto  $\{X_{i,j}\}$ , donde  $X_{i,j}$  representa la

medida realizada entre el nodo  $i$  y el nodo  $j$  de la red. Esta medida puede ser cualquier magnitud a partir de la cual se pueda estimar la distancia entre el nodo  $i$  y el nodo  $j$ , esto es, medidas basadas en TOA, AOA, RSSI, o sólo conectividad (si dos nodos se pueden comunicar o no entre sí). Como ya se ha comentado en el apartado anterior, no se asume el conocimiento completo de las distancias entre pares de nodos. Para una red de  $N$  nodos, de modo que  $N = n + m$ , se tienen  $N \cdot (N - 1)/2$  distancias, y el conocimiento de estas magnitudes se presupone parcial, es decir, no se conocen todas las distancias. Una primera fase de los algoritmos de localización cooperativa trata de inferir las distancias desconocidas (Drineas et al., 2007). Esto se comenta más adelante y de manera específica cuando se traten los algoritmos basados en MDS. Por último, se define el conjunto  $H(i)$  como el grupo de sensores con los que el sensor  $i$  puede tomar medidas. Además,  $H(i) \subset \{1, 2, \dots, n + m\}$  y  $i \notin H(i)$ , es decir, el propio sensor  $i$  no se incluye en su conjunto asociado.

Con esta información de partida, existen técnicas que tratan de estimar, con el mínimo error posible (definido por alguna función), las posiciones de los nodos, es decir, el vector de parámetros  $\theta$ . En el error global van a influir factores como la precisión del tipo de medida realizada y transmitida entre los nodos de la red. Aunque en esta tesis se considera la medida de distancias principalmente mediante ondas electromagnéticas, también existen otras modalidades, como por ejemplo infrarrojos o mediante señales acústicas. En cualquier caso, y debido a lo anteriormente comentado, va a existir una componente no determinista (aleatoria) en las medidas. En el siguiente apartado se discuten las diferentes caracterizaciones estadísticas para medidas de RSSI, TOA y AOA. Los modelos presentados están contrastados tanto de forma analítica como empírica mediante diferentes investigaciones, algunos de ellos referenciados en (Gezici et al., 2005; Lee & Scholtz, 2002; Patwari et al., 2005; Sahinoglu et al., 2008).

#### 4.2.1 Caracterización de las magnitudes para la tarea de localización

Las medidas de distancias entre nodos tienen una componente aleatoria que introduce un error. Las fuentes de perturbación que causan estos errores pueden ser de tipo estático, variantes en el tiempo, y dependientes del entorno. Aquéllas que varían en el tiempo se pueden atenuar mediante el uso de filtros o mediante el cálculo de un promedio a partir de la toma de varias medidas. Los errores ocasionados por las características del entorno están causados por la presencia de diferentes materiales, tales

como paredes que se interponen entre los nodos, objetos de metal, interferencias ocasionadas por otros dispositivos inalámbricos, etc. Estos errores se modelan como variables aleatorias, y afectan al valor del conjunto de parámetros que se estiman de la señal recibida, como el TOA, AOA o RSSI. Aunque se suele estimar un único parámetro, también es posible estimar varios de forma simultánea, con el objetivo de mejorar la precisión del posicionamiento final, por ejemplo a partir de la toma de datos TOA y RSSI (Gezici et al., 2005). En función del parámetro que se estima, en la literatura existen diferentes modelos, algunos de los cuales se describen en los siguientes apartados. En (Dardari et al., 2009; Patwari, 2005; Sahinoglu et al., 2008) se realiza una explicación detallada de los diferentes modelos de señal empleados para aplicaciones de posicionamiento. En los siguientes apartados se comentan, desde un punto de vista general, las principales características del tipo de magnitudes empleadas para aplicaciones de posicionamiento.

#### *4.2.1.1 RSSI*

La intensidad de la señal recibida (RSSI) es un indicador del nivel de potencia recibido en el nodo receptor. Generalmente, se suele indicar como un valor de potencia (medido en mW o dBm). Características como el rango dinámico<sup>4</sup> o la precisión de los datos RSSI van a depender en gran medida del fabricante y del cumplimiento de ciertos estándares. Por ejemplo, en el estándar IEEE 802.15.4 (IEEE 802.15.4, 2006), se especifica que la estima de la potencia de la señal recibida se debe proporcionar como promedio de 8 periodos de símbolo<sup>5</sup>. Considerando aplicaciones de posicionamiento, el uso de RSSI se basa en el establecimiento de una ley que relacione la pérdida de la potencia de la señal con la distancia entre dos nodos, donde se asume que la potencia transmitida es conocida.

Idealmente, mediante un promedio de medidas RSSI se asume que los efectos de propagación multicamino, que provocan variaciones rápidas en la potencia de la señal

---

<sup>4</sup> El rango dinámico se define como la razón entre la medida máxima y mínima que puede capturar un dispositivo de una magnitud. Se trata por tanto de una medida adimensional, y generalmente se suele expresar en dB.

<sup>5</sup> Un símbolo puede definirse como la señal analógica utilizada para codificar un conjunto de bits. Por ejemplo, en el caso de QPSK (*Quadrature phase-shift keying*), se tienen 4 símbolos posibles, y cada uno codifica 2 bits. En el caso del estándar 802.15.4, cada símbolo representa 4 bits (teniéndose por tanto 16 símbolos posibles) de información transmitidos (IEEE 802.15.4, 2006).

recibida (*multipath fading*), se mitigan lo suficiente (Sahinoglu et al., 2008). Bajo estas circunstancias, se considera el siguiente modelo:

$$\bar{P}(d) = P_0 - 10n_p \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right), \quad (4.2)$$

donde  $n_p$  es el exponente asociado a la pérdida de la potencia de la señal con la distancia (*path loss*<sup>6</sup>), que depende de las características del entorno donde la WSN está instalada;  $P_0$  la potencia recibida (dBm) a una distancia de referencia  $d_0$ ; y  $\bar{P}(d)$  la potencia media recibida (dBm) a una distancia  $d$ . Sin embargo, los efectos de *shadowing*<sup>7</sup> generalmente están presentes en la potencia medida. Debido a la aleatoriedad de este efecto, la potencia medida se modela como una distribución del tipo log-normal (es decir, de tipo gaussiana si se expresa en decibelios). Atendiendo a este modelo, la potencia recibida en un nodo  $i$  y transmitida por un nodo  $j$ ,  $P_{i,j}$ , se puede expresar de la siguiente forma,

$$P(d) \sim N(\bar{P}(d), \sigma_{dB}^2), \quad (4.3)$$

donde  $\sigma_{dB}^2$  representa la varianza y  $\bar{P}(d)$  la media de la distribución normal asociada. Este modelo se puede utilizar, eligiendo adecuadamente los parámetros del canal, tanto en escenarios LOS (*Line of Sight*), donde existe visibilidad directa entre emisor y receptor, y NLOS (*Non Line of Sight*), donde hay alguna interposición en la trayectoria directa entre emisor y receptor, y el camino de propagación directa queda atenuado o incluso bloqueado. Evidentemente, el valor RSSI de la potencia recibida depende también de la potencia inicial de la señal transmitida. Dicha potencia puede disminuir o fluctuar si la batería del nodo transmisor se encuentra en niveles bajos. Para resolver este problema, los nodos podrían estar programados para enviar también la potencia con la que están transmitiendo. Otra alternativa es considerar la potencia de la señal transmitida como otro parámetro a estimar, y que también habría que incluir en el vector  $\theta$  de la expresión (4.1).

---

<sup>6</sup> El término *path loss* se asocia con la reducción de la potencia de una señal conforme ésta se propaga por el medio. Dependiendo de si existen interposiciones y del tipo de éstas, la pérdida de la potencia será más o menos acusada.

<sup>7</sup> *Shadowing* (también denominado como *large-scale fading*) es un término utilizado en referencia a variaciones de la potencia recibida. Esta variación generalmente se debe a obstrucciones en el entorno que la señal debe atravesar.

#### 4.2.1.2 TOA

Las medidas basadas en TOA también pueden proporcionar una estimación de la distancia entre dos transmisores. Para ello, mediante diferentes estrategias se calcula el tiempo que tarda en llegar una señal (de radiofrecuencia, acústica u otro tipo) transmitida desde un nodo a otro. El retardo del tiempo de la señal transmitida desde un nodo  $i$  a un nodo  $j$ ,  $T_{i,j}$ , es igual a la distancia entre ambos nodos dividida por la velocidad de propagación de la señal,  $v_p$ . Para pequeños rangos de distancia, la medida TOA se puede modelar como una variable de tipo gaussiano (Patwari, 2005),

$$f(T_{i,j} = t) \sim N\left(\frac{d_{i,j}}{v_p} + \mu_T, \sigma_T^2\right), \quad (4.4)$$

donde  $\mu_T$  y  $\sigma_T^2$  representan la media y la varianza del error en el TOA. Sin embargo, la presencia de errores relativamente grandes en medidas de TOA, por ejemplo debido a situaciones NLOS, puede invalidar este modelo. En cualquier caso, la expresión (4.4) representa un modelo general y simple de la precisión del TOA entre un par de nodos, a partir de una distribución normal.

Las técnicas convencionales para la estimación del TOA se basan en operaciones de correlación. Para este caso, un modelo simple para la señal recibida es el siguiente,

$$r(t) = \alpha s(t - \tau) + n(t). \quad (4.5)$$

En la ecuación anterior,  $\tau$  representa el TOA de la señal (desconocido),  $\alpha$  un coeficiente asociado al canal y  $n(t)$  ruido blanco gaussiano con media cero y un valor de densidad espectral (bilateral) constante, que suele indicar con el valor  $N_o/2$  (Sahinoglu et al., 2008). Utilizando este modelo, se realiza una correlación entre la señal recibida  $r(t)$  y una versión desplazada de la señal original,  $s(t - \hat{\tau})$ , para varios retardos  $\hat{\tau}$ . Una posible forma de estimar el tiempo de llegada de la señal,  $\hat{\tau}_{TOA}$ , es la siguiente

$$\hat{\tau}_{TOA} = \arg \max_{\hat{\tau}} \int_0^T r(t) \cdot s(t - \hat{\tau}) dt, \quad (4.6)$$

donde  $T$  representa el intervalo de observación, y se presupone algún tipo de sincronización en el tiempo entre emisor y receptor. En ausencia de ruido, el máximo de

la ecuación anterior se alcanza para  $\hat{\tau} = \tau$ . Otro esquema equivalente a la operación anterior se realiza mediante filtros adaptados (*matched filters*) (Sahinoglu et al., 2008). El modelo de la señal presentado en la ecuación (4.6) puede ser demasiado simple. Por ejemplo, para señales UWB, debido a su gran ancho de banda, objetos de diferentes materiales presentes en el entorno afectan de manera diversa a la propagación de la señal, existiendo una dependencia de la propagación en función de la frecuencia, y que para el caso de sistemas de ancho de banda estrecho (*narrowband*) se considera constante. La interacción entre los diferentes caminos en los que la señal se propaga causa fluctuaciones en la intensidad de la señal recibida, dificultando la detección del TOA. Por ello, en la literatura científica se proponen modelos matemáticos de la señal recibida más complejos, donde se tienen en cuenta estas características. El siguiente modelo considera estos efectos (Lee & Scholtz, 2002)

$$r(t) = a_d s(t - \tau_d) + \sum_{n=1}^L a_n s(t - \tau_n) + n(t), \quad (4.7)$$

donde  $\tau_d < \tau_1 < \tau_2 \dots < \tau_L$ . Además,  $\tau_d$  y  $a_d$  representan el tiempo de llegada y amplitud del camino directo, respectivamente,  $\tau_n$  y  $a_n$  representan el tiempo de llegada y amplitud para el camino de propagación  $n$ . A diferencia de la transmisión por cable, cuyo estudio es en principio más sencillo, la transmisión por radio tiene una componente estocástica significativa, y su modelado es más complejo, especialmente en situaciones donde hay objetos móviles y obstrucciones del camino principal, es decir, ausencia de un camino directo entre emisor y receptor (NLOS). Estas situaciones además son comunes en entornos *indoor* o zonas urbanizadas, donde los propios edificios producen pérdidas por difracción y reflexiones que hacen que la señal transmitida llegue al receptor por varios caminos (*multipath*). En especial, cuando el camino directo está completamente bloqueado por la interposición de objetos, es decir, bloqueo de LOS, pueden ocurrir errores importantes en la estimación de la distancia. En (Gezici et al., 2005; Lee & Scholtz, 2002) se particularizan modelos de la señal UWB en entornos *indoor* donde existe una elevada propagación multicamino, y se proponen algoritmos para la estimación del TOA y la localización de nodos, así como los límites alcanzables para este tipo de técnicas.

El modelado del canal inalámbrico es una de las partes más complejas en el diseño de sistemas basados en radio. En (Rappaport, 2002) se estudia el modelado de canales

inalámbricos en profundidad. En cualquier caso, las referencias citadas en este apartado resaltan a la tecnología UWB como la adecuada para aplicaciones de posicionamiento en entornos complejos, de tipo *indoor*. Además, debido a la elevada resolución temporal que UWB permite, las principales estrategias con el uso de esta tecnología se basan en el cálculo del TOA y en el desarrollo de algoritmos que permitan diferenciar situaciones LOS de NLOS. Independientemente de lo comentado, la expresión (4.4) no deja de ser un modelo sencillo y útil que representaría, en términos estadísticos, la precisión de algún método en específico para la estimación de distancias entre un transmisor y un emisor, bajo unas condiciones determinadas.

#### *4.2.1.3 AOA y aspectos generales de las medidas*

En los apartados anteriores se han descrito las magnitudes fundamentales utilizadas para la estimación de distancias. Varios autores consideran también el ángulo de llegada (AOA, *Angle of Arrival*) como otra de las magnitudes principales. Mediante el AOA, se mide el ángulo con el que incide una onda, acústica o electromagnética, recibida en un nodo concreto, y transmitida por otro. En (Niculescu & Nath, 2003) se explica la terminología y sistemas de referencia utilizados para la medida AOA, donde por ejemplo, se define con el término *bearing* a la medida del ángulo de la onda recibida respecto a un sistema de referencia establecido en el nodo receptor. La obtención del AOA se realiza mediante *arrays* de antenas conectadas a un mismo nodo. El hecho de requerir más de una antena por nodo puede incrementar su tamaño y coste. La estimación del AOA se suele realizar a partir de la toma de medidas TOA o RSSI entre las antenas que forman el *array* (Patwari et al., 2005).

Por otra parte, hay que considerar aspectos generales de calibración y sincronización para cualquiera de las magnitudes comentadas, algunos ya mencionados. Para la medida del TOA entre dos nodos es necesario establecer algún método de sincronización en el tiempo. En redes de sensores no sincronizadas, la medida del TOA se puede obtener mediante protocolos de sincronización, denominados *round trip time* (RTT). En este tipo de métodos, un nodo  $n_1$  transmite una señal a otro nodo  $n_2$ . En el momento que  $n_2$  recibe la señal, éste responde a  $n_1$ . El tiempo transcurrido desde que transmite  $n_1$  hasta que recibe la respuesta de  $n_2$  equivale a dos veces el tiempo de propagación de la señal más el retardo interno que ha tardado  $n_2$  en responder, que también debe estimarse.

La diferencia de tiempos (TDOA, *Time Difference of Arrival*) es otro tipo de medida basada en TOA, útil para posicionamiento, mediante la cual se evita la necesidad de que el nodo a localizar tenga que estar sincronizado en tiempo. Como ejemplo sencillo, se suponen tres nodos, dos de referencia, que sí están sincronizados en el tiempo, y el nodo a localizar. La diferencia de tiempos que tarda en llegar una señal transmitida por el nodo a localizar (no sincronizado) a los nodos de referencia comentados (sincronizados) proporciona información relativa de la distancia a éstos.

También hay que considerar aquellos casos formados con nodos de muy bajo coste, donde no existe la posibilidad de medidas TOA, AOA, o RSSI. Para esta casuística, el conocimiento de la conectividad, es decir, si un par de nodos pueden establecer una comunicación entre sí, también puede aportar información para el posicionamiento. Esta medida se puede modelar como una variable binaria que toma el valor 1 ó 0, dependiendo de si el nodo receptor puede demodular o no la señal recibida. Como se verá más adelante, existen algoritmos que permiten obtener una estimación de las posiciones de los nodos mediante solo conectividad.

Por último, cabe mencionar de nuevo la existencia de esquemas híbridos, que realizan una combinación de varios tipos de medida, como por ejemplo TOA/AOA o TOA/RSSI (Gezici et al., 2005), y con los cuales se pretende obtener una mayor precisión en la estimación de la posición.

#### **4.2.2 Cota inferior de Cramér-Rao**

En los apartados anteriores se han explicado las magnitudes básicas que permiten estimar distancias entre pares de nodos. El error de las distancias calculadas influye en la precisión global de las posiciones estimadas de los nodos, que constituyen la solución al problema de localización planteado en el apartado 4.2. Es interesante disponer de un mecanismo que permita responder a las preguntas: ¿es posible mejorar la estimación de las localizaciones a partir de una tecnología y características específicas de la WSN?, o ¿es posible cumplir los requisitos exigidos por una aplicación específica de localización? El límite o cota inferior de *Cramér-Rao* (CRLB) da respuesta a esta pregunta, proporcionando una cota mínima para la varianza alcanzable de cualquier estimador no sesgado.

Esto quiere decir que, si se tiene un modelo estadístico que caracterice adecuadamente los errores de distancias, mediante el CRLB se puede obtener el mejor caso posible. El CRLB sirve como herramienta de *benchmark* y como criterio de selección de la tecnología a utilizar (AOA, RSSI, TOA, etc.). Considerando de forma específica el problema de posicionamiento planteado en el apartado 4.2, el CRLB es una expresión matemática que proporciona la covarianza mínima (o varianza en el caso escalar) alcanzable para cualquier estimador no sesgado. El CRLB es útil por tanto en la etapa de diseño. Si se considera la estimación de las posiciones de un conjunto de nodos, el valor del CRLB depende principalmente de las siguientes características (Patwari, 2005):

- Número de nodos *anchor* y de nodos a localizar.
- Geometría de la red de sensores.
- Si la localización es en 2D ó 3D.
- Tipo de magnitud medida (RSSI, TOA, AOA).
- Parámetros del canal (como por ejemplo los parámetros  $n_p$  y  $\sigma_{dB}^2$  definidos en el apartado 4.2.1.1).
- La conectividad de la red.
- Otros parámetros que necesiten estimarse.

A continuación se explica el CRLB partiendo desde un punto de vista general y finalizando en las expresiones específicas según el tipo de medida.

Cualquier estimador no sesgado del vector de parámetros  $\theta$ , y que se define como  $\hat{\theta}$ , cumple la siguiente desigualdad:

$$cov(\hat{\theta}) \geq \left\{ -E \left( \nabla_{\theta} (\nabla_{\theta} \ln f(\mathbf{X}; \theta))^T \right) \right\}^{-1}, \quad (4.8)$$

si se considera un conjunto de  $N = n + m$  nodos en una WSN, el vector de parámetros  $\theta$  que define las coordenadas de  $n$  nodos cuyas posiciones son desconocidas (además de existir  $m$  nodos de referencia o *anchor*),  $cov(\hat{\theta})$  representa la matriz de covarianzas en la estimación de tales parámetros,  $E[\cdot]$  el valor esperado,  $\nabla_{\theta}$  el operador gradiente respecto al vector de parámetros  $\theta$ , y el superíndice  $T$  la transpuesta.  $f(\mathbf{X}; \theta)$  representa la función de probabilidad conjunta de las medidas  $\{X_{i,j}\}$  entre cada par de nodos, y donde cada observación  $X_{i,j}$  pertenece a una distribución de probabilidad

$f(X_{i,j}; \theta_i, \theta_j)$ , que se supone dependiente solo de los nodos  $i$  y  $j$ . Es decir,  $\mathbf{X}$  es una matriz de observaciones, y  $f(\mathbf{X}; \theta)$  depende de las funciones de probabilidad  $f(X_{i,j}; \theta_i, \theta_j)$ . También se contempla la posibilidad de que no exista una observación entre un par de nodos, por ejemplo porque no hay comunicación entre ellos debido a la distancia. La expresión  $-E \left( \nabla_{\theta} (\nabla_{\theta} \ln f(\mathbf{X}; \theta))^T \right)$  se denomina la matriz de información de Fisher (FIM),  $F_{\theta}$ , por lo que otro modo de expresar la ecuación (4.8) es el siguiente:

$$\text{cov}(\hat{\theta}) \geq F_{\theta}^{-1}. \quad (4.9)$$

En los trabajos realizados por Patwari (Patwari, 2005; Patwari et al., 2005) se analizan de forma específica los CRLB para algoritmos de localización cooperativa en WSNs, y se deducen las expresiones que permiten calcular el CRLB en WSNs basadas en AOA, RSSI y TOA, y “solo conectividad”; siendo este último un caso particular de RSSI, cuando existe un único nivel de cuantificación, y que define la distancia máxima a la que se pueden comunicar un par de nodos. Debido a la importancia del cálculo del CRLB para aplicaciones de posicionamiento en WSNs, en la siguiente tabla se referencian las expresiones de los CRLB según el tipo de medida, y se describen los pasos necesarios para su cálculo. También, en (Kay, 1993) se describe el cálculo del CRLB desde un punto de vista más general. Se definen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
 [F_{xx}]_{k,l} &= \begin{cases} \gamma \sum_{i \in H(k)} h_{k,i} (x_k - x_i)^2 / \|z_k - z_i\|^s & k = l \\ -\gamma I_{H(k)}(l) h_{k,l} (x_k - x_l)^2 / \|z_k - z_l\|^s & k \neq l \end{cases} \\
 [F_{xy}]_{k,l} &= \begin{cases} \gamma \sum_{i \in H(k)} h_{k,i} (x_k - x_i)(y_k - y_i) / \|z_k - z_i\|^s & k = l \\ -\gamma I_{H(k)}(l) h_{k,l} (x_k - x_l)(y_k - y_l) / \|z_k - z_l\|^s & k \neq l \end{cases} \\
 [F_{yy}]_{k,l} &= \begin{cases} \gamma \sum_{i \in H(k)} h_{k,i} (y_k - y_i)^2 / \|z_k - z_i\|^s & k = l \\ -\gamma I_{H(k)}(l) h_{k,l} (y_k - y_l)^2 / \|z_k - z_l\|^s & k \neq l \end{cases}
 \end{aligned} \quad (4.10)$$

donde  $\gamma$  es una constante del canal,  $s$  un exponente, ambas funciones del tipo de medida y que se muestran en la Tabla 4.1,  $I_{H(k)}(l)$  es una función que vale 1 si  $l \in H(k)$ , es decir, si el sensor  $k$  se puede comunicar con el sensor  $l$ , y 0 en caso contrario,  $h_{k,l}$  vale 1 para los casos AOA, TOA y RSSI. Para el caso de “solo conectividad” se tiene la siguiente expresión,

$$h_{i,j} = \frac{\exp(-g_{i,j}^2(1))}{2\pi\psi[-g_{i,j}(1)]\{1-\psi[-g_{i,j}(1)]\}}, \quad (4.11)$$

donde  $\psi(x)$  representa la función de distribución acumulada normal estándar  $N \sim (0,1)$ ,  $g_{i,j}(1)$  se define como,

$$g_{i,j}(1) = \sqrt{\gamma} \ln \frac{\|z_i - z_j\|}{d_1}, \quad (4.12)$$

donde  $d_1$  indica la distancia a partir de la cual no es posible establecer una comunicación entre dos nodos concretos debido a un umbral mínimo de potencia recibida (dBm),  $\|\cdot\|$  indica distancia euclídea y  $z_x$  las coordenadas de un nodo determinado.  $\gamma$  se define en la Tabla 4.1.

A partir de las expresiones anteriores, la construcción de la matriz de Fisher (FIM) correspondiente a la estimación de  $2n$  coordenadas (2 por nodo, cuya posición se quiere estimar) es la siguiente:

$$F_{TR} = \begin{bmatrix} F_{xx} & F_{xx} \\ F_{xy}^T & F_{yy} \end{bmatrix}, \quad F_A = \begin{bmatrix} F_{yy} & -F_{xy} \\ -F_{xy}^T & F_{yy} \end{bmatrix}, \quad (4.13)$$

Para medidas TOA y RSSI,  $F_\theta = F_{TR}$ , y para AOA,  $F_\theta = F_A$ . El CRLB se obtiene invirtiendo  $F_\theta$ . La diagonal principal de  $F_\theta^{-1}$  contiene los límites de varianza de las  $2n$  coordenadas. Si las coordenadas estimadas de un nodo  $i$  son  $\hat{z}_i = [\hat{x}_i \ \hat{y}_i]$ , la varianza asociada a la localización de dicho nodo se define como  $\sigma_i^2$ ,

$$\sigma_i^2 \triangleq \text{var}_\theta(\hat{x}_i) + \text{var}_\theta(\hat{y}_i), \quad (4.14)$$

el CRLB establece la siguiente desigualdad,

$$\sigma_i^2 \geq (F^{-1})_{i,i} + (F^{-1})_{i+n,i+n}, \quad (4.15)$$

**Tabla 4.1. Expresiones para el cálculo del CRLB (Patwari, 2005)**

Tipo de medida	Constante $\gamma$	Exponente $s$	$F_\theta$
TOA	$\gamma = 1 / (v_p \sigma_T)^2$	$s = 2$	$F_\theta = F_{TR}$
RSSI	$\gamma = \left( \frac{10 n_p}{\sigma_{dB} \ln 10} \right)^2$	$s = 4$	$F_\theta = F_{TR}$
AOA	$\gamma = 1 / \sigma_\alpha^2$	$s = 4$	$F_\theta = F_A$
Conectividad	$\gamma = \left( \frac{10}{\sigma_{dB} \ln 10} \right)^2$	$s = 4$	$F_\theta = F_{TR}$

$v_p$ : velocidad de propagación de la señal  
 $\sigma_T$ : desviación estándar para medidas TOA  
 $\sigma_\alpha$ : desviación estándar para medidas AOA  
 $\sigma_{dB}$ : desviación estándar para medidas RSSI o solo conectividad, expresada en dB

Es importante recalcar que las expresiones anteriores establecen los límites del CRLB para el problema de la localización de nodos. También existen otros trabajos que deducen el CRLB del tipo de medida. Por ejemplo, en (Dardari et al., 2009) se describen técnicas de *ranging* basadas en TOA para señales UWB, y se establecen las cotas mínimas de varianza alcanzables para la estimación no sesgada del TOA, teniendo en cuenta diferentes modelos del canal, considerándose desde entornos ideales a otros más realistas. En este caso, la cota CRLB depende de características de la señal, como el ancho de banda, o la relación señal-ruido (SNR) con la que se recibe.

En este apartado se han descrito y referenciado las expresiones para el CRLB en la estimación de posiciones de nodos en una WSN. Sin embargo, también se pueden considerar otros parámetros a estimar, como por ejemplo el propio TOA de un receptor, y deducir las cotas mínimas alcanzables (en términos de varianza), que van a depender de otra serie características, en este caso de la señal transmitida y de características del receptor. Como ejemplo específico, este último caso podría tratarse del diseño de un receptor UWB que garantice una varianza inferior a  $10 \text{ ns}^2$  del TOA. Esto a su vez define el parámetro  $\sigma_T^2$  de la ecuación (4.4), que también aparece en el parámetro  $\gamma$  de la Tabla 4.1.

Debe de quedar clara la aportación del límite CRLB, y es, por un lado, el establecimiento de una cota mínima o “mejor caso posible” para la estimación de uno o varios parámetros; y por otro, la información que proporciona acerca de las características que deberían modificarse, para mejorar las precisiones alcanzables en la estimación de dichos parámetros, y bajo unas condiciones específicas.

### **4.3 LOCALIZACIÓN COOPERATIVA BASADA EN MDS**

En los apartados anteriores se ha explicado el problema de la localización cooperativa. Para ello, se ha realizado un planteamiento formal del problema, y se han descrito los principales tipos de medidas que permiten estimar las distancias entre pares de dispositivos, en este caso nodos interconectados entre sí formando una WSN. Como se ha dicho ya en repetidas ocasiones, la precisión de las distancias medidas es determinante en el error resultante de la estimación de posiciones de los nodos. El entorno donde se instale la WSN, la tecnología empleada por los nodos y condiciones cambiantes (temperatura, humedad, movimiento de objetos, situaciones LOS o NLOS, etc.) son variables a tener en cuenta. Debido a ello, es esencial disponer de métodos matemáticos que permitan conocer los límites de precisión alcanzables en función de las características mencionadas, en este caso en lo que a aplicaciones de localización se refiere. Considerando dichos métodos, se han descrito modelos relativamente sencillos para las medidas RSSI, TOA, y AOA. En función del tipo de medida, se han referenciado las expresiones correspondientes del CRLB en la estimación de las coordenadas de nodos en una WSN, y según el tipo de medida. Sin embargo, hasta ahora solo se ha planteado el problema de la localización sin hacer mención a ningún algoritmo en concreto. En el siguiente apartado se introducen algunos algoritmos de localización cooperativa, principalmente basados en la técnica de *Multi-Dimensional Scaling* (MDS), aunque también se referencian otras estrategias. La justificación del estudio de este tipo de algoritmos para aplicaciones de seguridad ya se ha comentado en la introducción. El conocimiento de la posición de los trabajadores en entornos industriales puede aportar información de carácter relevante, pudiendo habilitar acciones automatizadas de seguridad, en materia de prevención y protección de accidentes laborales.

### 4.3.1 Introducción a los algoritmos MDS

Las técnicas basadas en MDS permiten utilizar las distancias medidas entre pares de nodos cuyas posiciones son desconocidas, o no están dentro del rango de nodos *anchor* (no hay una conectividad directa aunque sí a través de nodos intermedios). Además, las técnicas MDS localizan los nodos de forma simultánea y permiten obtener un mapa de la estructura de la red, incluso cuando no existen nodos *anchor* en la WSN.

Las técnicas MDS tienen su origen en la psicometría (Borg & Groenen, 2005; Borg et al., 2012; Shang et al., 2003). Desde un punto de vista general, este tipo de técnicas se enmarcan dentro de los métodos de análisis que permiten representar la *similitud* o *proximidad*<sup>8</sup> de un conjunto de datos de manera gráfica, en 2D o en 3D, o en  $m$  dimensiones. La inspección visual de los datos posibilita obtener información adicional acerca de la *estructura* de los mismos, de modo que puntos muy cercanos en el espacio mantienen una semejanza que disminuye conforme más alejados se encuentran. Esto es, se relacionan similitudes o discrepancias con distancias euclídeas mediante algún tipo de transformación  $f$ .

Dicho de otro modo y mediante un ejemplo, si se considera un conjunto de datos, como pueden ser las correlaciones entre un conjunto de variables (donde una mayor correlación implica una mayor similitud) la representación visual obtenida al aplicar MDS, donde cada punto representa una variable, permite obtener conclusiones de carácter general de los datos. A menor distancia entre los puntos que representan las variables se tiene una mayor similitud, pero además los posibles agrupamientos entre las mismas pueden ayudar a interpretar posibles relaciones entre los diferentes datos de partida. Éstos y otros aspectos se tratan en detalle en (Borg & Groenen, 2005) y (Borg et al., 2012). Para el caso que nos ocupa, las discrepancias, es decir, los datos de entrada, son distancias medidas (o “solo conectividad”) entre pares de nodos que forman una WSN (Shang et al., 2003). Como se verá en los siguientes párrafos, no todas las distancias son conocidas, y nunca de forma exacta, ya que siempre existe un ruido asociado en las distancias medidas, que depende, entre otros factores, de la tecnología

---

<sup>8</sup> De manera equivalente, también se pueden considerar datos de disparidad o desemejanza. Si se trata de datos de similitud, como el caso de datos de correlación, a mayor valor de correlación menor distancia euclídea asociada.

empleada para su estimación (TOA, AOA, RSSI, etc.), y de las características del entorno donde se ha instalado la WSN.

En un espacio euclídeo de  $m$  dimensiones, la distancia euclídea entre dos puntos definidos por los vectores  $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}]$ ,  $x_j = [x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jm}]$  se define como,

$$d_{i,j} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{jk})^2}, \quad (4.16)$$

donde  $x_{ik}$  representa la coordenada  $k$  del vector  $x_i$ . Existen diferentes variantes MDS. En esta tesis se consideran principalmente las técnicas cuantitativas (*classical metric* MDS), donde se asume una transformación de tipo lineal, es decir,  $d_{i,j} = a + b \cdot p_{i,j}$  en los datos de partida (proximidades), donde  $a$  y  $b$  son constantes, y  $p_{i,j}$  representa la proximidad entre los objetos  $i, j$ . No obstante, existen otro tipo de técnicas MDS donde sólo se asume una relación monótona entre las proximidades y las distancias euclídeas asociadas. Se trata de las técnicas MDS de tipo cualitativo (*nonmetric* u *ordinal* MDS), un tipo de técnicas menos restrictivas, donde solo se pretende conservar el orden de las proximidades. Es decir, si la proximidad o similitud entre un par de variables  $i, j$ , y definida como  $p_{i,j}$ , es menor que la existente entre dos variables  $k, l$ , y definida como  $p_{k,l}$ , esta relación se mantiene en las distancias euclídeas asociadas. Las técnicas MDS de tipo cualitativo también son potencialmente aplicables para la resolución del problema de la localización (Shang et al., 2003). Por último, cabe mencionar de nuevo que para la aplicación de MDS al posicionamiento de nodos, las proximidades  $p_{i,j}$  representan la información de entrada, es decir, conectividad, o distancias medidas (de ahora en adelante  $\tilde{d}_{i,j}$ ).

#### 4.3.2 Conceptos básicos de MDS aplicado a la localización

Considerando el problema de localización, si se considera la WSN representada en la Figura 4.1, donde los vértices del grafo representan los nodos que la forman, el valor asignado a cada arista, que une a un par de nodos en concreto, representa la distancia o algún tipo de medida (TOA, AOA, RSSI, etc.) que permita estimarla. Para el caso de “solo conectividad”, si ésta no es posible, no existirá dicha arista que los une de forma directa (puede existir conectividad mediante nodos intermedios), o su valor asociado

valdrá 0; valiendo 1 cuando la conectividad sí es posible. Para cada par nodos  $i, j$ , o bien se tiene una medida  $\tilde{d}_{i,j}$ , de la distancia real  $d_{i,j}$  definida en la ecuación (4.16), o se infiere a partir de las distancias medidas. De esta forma, se definen tres conjuntos de distancias según su cálculo:  $\{\tilde{d}_{i,j}\}$ , que representa el conjunto de distancias medidas (con ruido);  $\{\hat{d}_{i,j}\}$ , que representa el conjunto de distancias inferidas; y  $\{d_{i,j}\}$ , que representa el conjunto de distancias reales (desconocidas, excepto para las distancias entre nodos *anchor*). Como se verá, las distancias inferidas también se pueden considerar distancias medidas.

La WSN se puede representar como un grafo  $G$  no dirigido<sup>9</sup> con vértices  $V$  y aristas  $E$ , es decir,  $G = (V = \{1, \dots, n\}, E)$  (Zhang et al., 2010). El trabajo realizado por (Shang et al., 2003) es de los primeros que aplica MDS al problema de localización, utilizando la metodología MDS clásica. Se supone una matriz ideal de distancias  $D$  de  $N \cdot N$  elementos, donde  $N$  representa el número de nodos de la red, y cada elemento de la matriz  $D$ ,  $D_{i,j} = d_{i,j}$ . Si todas las distancias entre pares de nodos fueran exactas y conocidas, MDS clásico genera una configuración de puntos donde dichas distancias se conservan de forma exacta. Como ejemplo intuitivo, es posible imaginar un conjunto de puntos en el espacio que forman una estructura definida por las distancias entre los mismos. Si ahora esa estructura se destruye, “esparciendo” las partículas (nodos), la reconstrucción podría realizarse reordenando los puntos a partir de las distancias previamente conocidas. Si se conocen todas las distancias entre pares de nodos de forma exacta, es posible realizar una reconstrucción donde se conserven tales distancias, aunque la estructura resultante pueda estar rotada, reflejada y trasladada respecto a la original.

Sin embargo, la suposición de que se conocen todas las distancias entre nodos, y de forma exacta, representa el caso ideal. Generalmente no se van a conocer todas las distancias entre pares de nodos, y las que se conocen a priori tienen un error asociado, inherente a cualquier medida. Por tanto, en un caso práctico se parte de una **matriz de distancias**  $\tilde{D}$ , construida a partir de información parcial, y con ruido asociado a cada uno de sus elementos, es decir,  $\tilde{D}_{i,j} = \tilde{d}_{i,j}$  ó  $\tilde{D}_{i,j} = \hat{d}_{i,j}$ . Inicialmente, se ha distinguido

<sup>9</sup> Un grafo no dirigido es aquél donde los valores asignados a las aristas son independientes de la dirección, es decir, dados dos nodos  $i, j \rightarrow d_{i,j} = d_{j,i}$ , siendo  $d$  el valor asignado a la arista.

entre las distancias medidas y las inferidas, aunque en varios de los trabajos consultados ambas se designan como  $\tilde{d}_{i,j}$ . De cualquier manera, la matriz de distancias se construye a partir de las distancias conocidas medidas y las distancias inferidas a partir de éstas.  $\tilde{D}$  por tanto constituye un conjunto de distancias estimadas, y es inexacta respecto a  $D$ , es decir,  $\|\tilde{D} - D\|_F \neq 0$ . Precisamente por esta razón las posiciones que se obtienen de los nodos difieren de las posiciones reales de éstos. Existen líneas de investigación que estudian formas de reconstruir la matriz de distancias  $\tilde{D}$  de modo que se minimice el error respecto a las distancias reales.

### 4.3.3 Etapas de los algoritmos de localización basados en MDS

El objetivo de las técnicas basadas en MDS es el de encontrar una configuración  $\mathbf{X}$  de puntos, tal que las distancias euclídeas entre los mismos se asemejen lo máximo posible a las distancias estimadas, que constituyen los datos de entrada, es decir, la matriz  $\tilde{D}$ . También, en el caso de que existan más de tres nodos *anchor* (al menos 3 para el caso 2D), se busca algún tipo de transformación (rotación, reflexión, traslación y escalado) para obtener las posiciones absolutas de cada punto en  $\mathbf{X}$ . En los desarrollos que se formulan a continuación se supone el caso bidimensional, donde la posiciones de cada nodo quedan definidas por dos coordenadas, tal y como se definió en el apartado 4.2, y que pueden ser conocidas a priori (nodos *anchor*) o no (nodos *blind*).

La matriz de distancias  $D$  es, por definición, simétrica, y los elementos de la diagonal principal valen cero (la distancia de un nodo a sí mismo es nula). Dada una matriz de distancias  $D$ , se cumple que  $D_{i,j} = 0, \forall i = j, D_{i,j} \geq 0$  y  $D_{i,j} = D_{j,i}$ . La matriz de distancias depende de las coordenadas que definen las posiciones de los nodos de la WSN. Como ya se ha comentado, en un problema real  $D$  no se conoce, sino  $\tilde{D}$ , que se construye a partir del conjunto de distancias conocidas a priori,  $\tilde{d}_{i,j}$ . El grado de correspondencia entre las proximidades (que para el caso aquí tratado son distancias euclídeas con ruido) y las distancias euclídeas, que se obtienen al aplicar el algoritmo MDS, se mide mediante algún tipo de función. Una de ellas es la función *Stress*,

$$Stress(x_1, \dots, x_n) = \sum_{(i,j) \in E} (\|x_i - x_j\| - \tilde{d}_{i,j})^2, \quad (4.17)$$

donde  $\|\cdot\|$  define la distancia euclídea, y  $\tilde{d}_{i,j}$  la distancia medida o inferida entre los puntos  $x_i$  y  $x_j$ . Básicamente, esta función objetivo mide la suma cuadrática de los residuos. Si su valor es 0, la correspondencia entre las distancias reales entre nodos y las generadas por MDS sería exacta.

La operación matemática básica de MDS clásico es una descomposición en valores singulares (SVD, *Singular Value Decomposition*). Esta operación obtiene una solución analítica, pero en lugar de minimizar la expresión (4.17), minimiza la denominada función *Strain* (Borg & Groenen, 2005; Borg et al., 2012),

$$Strain(x_1, \dots, x_n) = \sum_{(i,j) \in E} (\|x_i - x_j\|^2 - \tilde{d}_{i,j}^2)^2. \quad (4.18)$$

La función *Strain* mide la suma cuadrática de los errores residuales al cuadrado. Cuando se conoce con suficiente precisión la matriz de distancias  $\tilde{D}$  respecto a  $D$  (se recuerda que esta última,  $D$ , se desconoce, ya que de lo contrario la solución sería exacta), SVD proporciona buenos resultados (Zhang et al., 2010). Sin embargo, cuando sólo se conoce un subgrupo de distancias y de forma imprecisa, la descomposición por SVD es una solución subóptima de la función *Stress* y, generalmente, pueden encontrarse soluciones de ajuste mejores mediante métodos iterativos, como el algoritmo SMACOF (*Scaling by MAjorizing a COmplicated Function*) (Zhang et al., 2010). Este algoritmo tiene la propiedad de disminuir el valor de la función *Stress* en cada una de sus iteraciones (Patwari, 2005). Una metodología que también se emplea consiste en obtener primero una solución inicial mediante SVD y, posteriormente, aplicar un algoritmo iterativo como SMACOF (Shang & Ruml, 2004) para así “refinar” la solución obtenida por SVD. En el último apartado de este capítulo se muestran otras funciones de coste interesantes.

Los pasos básicos para aplicar MDS a localización de nodos son los siguientes (Borg et al., 2012; Lee, 2005; Shang & Ruml, 2004):

- a) Estimación de distancias: dada una WSN de  $N$  nodos, inferir todas las distancias entre nodos, es decir,  $N \cdot (N - 1)/2$  distancias. A partir de esta información,

construir la matriz de distancias  $\tilde{D}$ . Algunas técnicas emplean también un modelo probabilístico.

- b) Construcción del mapa relativo a partir de la información de la matriz  $\tilde{D}$ . En el caso de MDS clásico, se aplica una descomposición SVD y se obtiene  $\mathbf{X}$ .
- c) Si existen suficientes nodos *anchor* (al menos tres para el caso 2D y cuatro para el caso 3D), transformar el mapa relativo a un mapa absoluto. La transformación obtenida minimiza la suma cuadrática de los errores entre las posiciones absolutas de los nodos anchor y los equivalentes en el mapa relativo.
- d) Adicionalmente, se puede aplicar un método iterativo como SMACOF para disminuir la función de *Stress*. Esta etapa disminuye el error de las distancias, pero también supone un incremento del coste computacional total.

Uno de los algoritmos básicos basados en MDS clásico para localización es MDS-MAP (Shang et al., 2004), basado en la descomposición SVD comentada anteriormente, mediante la cual se obtiene una solución analítica. Para ello, se retienen los dos (o tres para el caso 3D) autovalores de mayor magnitud y sus vectores propios asociados, lo que equivale a la obtención de la *mejor solución posible* en el sentido de ajuste por mínimos cuadrados. Dada una matriz cuadrada de rango  $k$ , aplicar MDS clásico (el cual se basa en SVD) y retener los  $k$  autovalores de mayor magnitud permite obtener la matriz euclídea de rango  $k$  que más se aproxima a la matriz  $\tilde{D}$ , minimizando la distancia de *Frobenius*. Dicho de otro modo, se reduce la dimensión del problema minimizando la función *Strain* definida en la expresión (4.18) (Buja et al., 2008) y de forma analítica. Cabe resaltar de nuevo que si las distancias estimadas de la matriz  $\tilde{D}$  fueran exactas,  $\tilde{D}$  sería una matriz euclídea y las distancias que representan se conservarían en la solución proporcionada por MDS clásico, y tanto la función *Stress* como *Strain* valdría 0.

La Tabla 4.2 muestra los pasos básicos de MDS-MAP y su código Matlab.

Tabla 4.2. Algoritmo MDS-MAP

---

 Aplicación del algoritmo MDS-MAP
 

---

- 1) Construir la matriz de distancias  $\tilde{D}$
- 2) Centrar la matriz de distancias  $\tilde{D}$ 

$$B = -\frac{1}{2} \left( I - \frac{1}{n} U \right) \tilde{D}^2 \left( I - \frac{1}{n} U \right)$$

*I es una matriz identidad de  $n \cdot n$ , y U una matriz unidad de  $n \cdot n$  (todos los elementos con valor 1)*
- 3) Descomposición en valores singulares (SVD) de B
- 4) Obtención del mapa relativo  $X$
- 5) Si existen suficientes nodos anchor, obtención del mapa absoluto

---

 Código Matlab
 

---

```

n = length(D_estimada); % Matriz de distancias
I = eye(n);
U = ones(n);
% Centrar la matriz de distancias
B = -0.5*(I-1/n.*U)*D_estimada.^2*(I-1/n.*U);
% SVD
[Us,S,Vs] = svd(B);
% Obtención de coordenadas, mapa relativo
X = Us*S.^0.5;

% Obtención de coordenadas absolutas (si existen
suficientes nodos anchor)
[d1,Z1,transformation1]=procrustes(nodosAnchor,nodosAnchorMrelativ);

```

---

#### 4.3.3.1 Estimación de la matriz de distancias $\tilde{D}$

Como se ha dicho anteriormente, en el primero de los pasos se asignan las distancias a las aristas del grafo  $G$  asociado. Cuando la distancia entre un par de nodos es conocida a priori, ése es el valor que se asocia a la arista que los une. Cuando esto no es así, se realiza algún tipo de aproximación para calcular el camino más corto entre cada par de nodos, aplicando algoritmos como el de *Dijkstra* o *Floyd*, y de esta forma se infieren las distancias que a priori no se conocen. El orden de complejidad<sup>10</sup> de este paso es  $O(N^3)$  (Shang et al., 2004), donde  $N$  es el número de nodos. Como ya se ha dicho en más de una ocasión, generalmente la información de partida es **parcial y siempre existe un ruido asociado**, además de que la información de las distancias entre nodos disponible y el error en su medida es determinante para el resultado final. Sin embargo, hay

---

<sup>10</sup> La complejidad de un algoritmo se puede expresar con la “notación  $O$ ”, que representa su comportamiento asintótico. Por ejemplo, si un algoritmo tiene una complejidad  $O(n^3)$  quiere decir que requiere un tiempo de computación proporcional al cubo del parámetro  $n$ , como por ejemplo tres bucles *for* anidados cuando cada uno se itera  $n$  veces. Por el contrario, un orden de complejidad del tipo  $O(1)$  indica un tiempo de computación constante.

estudios que demuestran que la reconstrucción precisa de la posición de los nodos de la WSN es posible incluso cuando la información de partida es escasa y en presencia de ruido. El trabajo realizado por Drineas (Drineas et al., 2007) va en esta línea, donde se considera un modelo probabilístico en la construcción de la matriz de distancias. Dada una matriz  $D$  de  $N^2$  elementos asociadas a una WSN de  $N$  nodos, si se conocen al menos cuatro elementos de cada fila (o de forma equivalente, de cada columna), es decir, cada nodo puede medir la distancia respecto a otros cuatro, y de forma exacta, la reconstrucción de la matriz de distancias sería perfecta. La primera de las suposiciones (cada nodo puede medir distancias entre, al menos, otros cuatro) es realista para una densidad suficiente de nodos. No ocurre lo mismo con la segunda, ya que siempre va a existir un error asociado, mayor o menor, a las distancias medidas. Con esta justificación, en (Drineas et al., 2007) se establece un modelo probabilístico que considera el ruido asociado a las medidas y la posibilidad de fallo de medida de distancias entre un par de nodos, proponiéndose el algoritmo SVD-RECONSTRUCT, que toma como entrada una fracción de las entradas disponibles en la matriz  $D$ ,

$$\tilde{D}_{i,j} = \begin{cases} d_{i,j}^2 + \epsilon_{i,j} & \text{con probabilidad } p_{i,j} \\ ? & \text{con probabilidad } 1 - p_{i,j} \end{cases}, \quad (4.19)$$

donde  $?$  significa que la entrada es desconocida,  $\epsilon_{i,j}$  son variables aleatorias independientes de media nula y varianza limitada que modelan el ruido que afecta a la distancia real entre los nodos  $i, j$ ,  $d_{i,j}$ , definida por la expresión (4.16).  $\tilde{D}_{i,j}$  representa cada uno de los elementos que constituyen la matriz  $\tilde{D}$ , y  $p_{i,j}$  la probabilidad de que los nodos  $i, j$  puedan medir la distancia entre ellos. Esta componente estadística modela la posibilidad de que en ciertos entornos, debido a obstrucciones o características que degradan la medida, en algunas ocasiones no sea posible establecer una comunicación entre nodos. A partir de  $\tilde{D}_{i,j}$  se construye  $S$ ,

$$S = \begin{cases} \frac{d_{i,j}^2 + \epsilon_{i,j} + \gamma_{i,j}(1 - p_{i,j})}{p_{i,j}} & \text{si } d_{i,j} \text{ se detectó } (p_{i,j}) \\ \gamma_{i,j} & \text{si } d_{i,j} \text{ no se detectó } (1 - p_{i,j}) \end{cases}, \quad (4.20)$$

donde  $\gamma_{i,j}$  representa la “mejor estima” de la distancia entre los nodos  $i, j$ , partiendo de la situación en que dicha distancia no se pudo obtener. La matriz  $S$  incluye por tanto, información probabilística,  $\gamma_{i,j}$  puede además tomar diferentes valores, incluso cero.

Los algoritmos clásicos de MDS tradicionalmente obtienen la matriz de distancias asignando  $p_{i,j} \approx 1$  si la distancia entre el par de nodos  $i, j$  se conoce a priori, y  $p_{i,j} \approx 0$  en caso contrario. El modelo probabilístico propuesto en (4.20) permite incluir información más precisa de las probabilidades de conectividad entre nodos. Como desventaja, este enfoque implica la necesidad de conocer  $p_{i,j}$ , aunque este es un requisito razonable y las probabilidades podrían obtenerse mediante experimentación.

A partir de la matriz  $S$ , se propone obtener su mejor aproximación de rango cuatro,  $S_4$ , también mediante SVD al igual que con MDS-MAP. El hecho de obtener  $S_4$  es un indicativo de que no son necesarias todas las distancias entre nodos para una reconstrucción perfecta. Posteriormente se aplica el algoritmo básico mostrado en la Tabla 4.2. En (Drineas et al., 2007) se demuestra que, a partir de un conjunto incompleto de distancias, y bajo un conjunto de suposiciones como una varianza máxima finita en las medidas de distancias, el error cuadrático medio por nodo se reduce de manera inversamente proporcional a  $\sqrt{N}$ , siendo  $N$  el número de nodos que conforman la red.

#### 4.3.3.2 *Propuestas para la distribución del cálculo y mejora de la estimación de las posiciones de nodos*

Las propuestas más recientes de los algoritmos de localización cooperativa se centran principalmente en dos aspectos, a) distribuir su cálculo, b) hacer el algoritmo robusto aunque la toma de medidas sea parcial e imprecisa (con ruido añadido). Los algoritmos MDS son esencialmente centralizados. Sin embargo, existen propuestas para distribuir su cálculo, a partir de la creación de mapas “locales” entre grupos de nodos que pueden establecer comunicación directa. A partir de dichos mapas, se emplea algún procedimiento que los une para formar el mapa global. Un ejemplo de esta metodología es el algoritmo MDS-MAP(P) propuesto por (Shang & Ruml, 2004), y que se basa en la creación de mapas locales que posteriormente se unen para formar el mapa global de la red. Como mejora de la estimación de las posiciones, se añaden, opcionalmente, dos etapas adicionales de “refinado”, una en cada uno de los mapas relativos locales, y otra en el mapa global. Estas dos etapas pretenden realizar una minimización por mínimos cuadrados entre las distancias conocidas a priori con las estimadas por el algoritmo. En el caso de utilizar estos ajustes, los autores denominaron al algoritmo MDS-MAP(P,R).

También, en (Zhang et al., 2010) se propone el algoritmo denominado ARAP (*As-Rigid-As-Possible*) cuyo funcionamiento, distribuido como MDS-MAP(P) y MDS-MAP(P,R), se basa principalmente en transformaciones del tipo “lo más rígido posible” (traslaciones, rotaciones y reflexiones) entre mapas locales definidos a partir de triángulos, y cuya unión conforman el mapa global de la WSN. La Figura 4.2 resume, si cabe desde un punto de vista general (sin considerar exclusivamente técnicas basadas en MDS), las principales etapas de algoritmos de localización en redes de sensores. La principal diferencia respecto a los algoritmos centralizados está en el cálculo de la matriz de distancias. Para éstos, como por ejemplo MDS-MAP, en la primera etapa mostrada de la Figura 4.2 se construiría la matriz de distancias del mapa global, para posteriormente aplicar el algoritmo de localización y una posible etapa de refinado. Para el caso distribuido, cada uno de los nodos calcula un mapa local respecto a sus nodos “vecinos” (*neighbors*). Dependiendo del algoritmo y su configuración, se consideran nodos vecinos a aquéllos con los que se tiene conectividad hasta un número máximo de “saltos” (*hops*), es decir, es necesario utilizar un número determinado de nodos intermedios para que puedan comunicarse. Si, por ejemplo, se define el rango del mapa local  $R_{lm} = 2$ , los mapas locales construidos de cada nodo tendrán como mucho un nodo intermedio en cada una de las distancias locales calculadas. Como se puede intuir, a mayor valor de  $R_{lm}$  mayor será el coste computacional de cada mapa local, ya que éstos constarán de más nodos. Una vez creados los mapas locales es necesario unirlos para formar el mapa global. Como también se muestra en la Figura 4.2, el algoritmo puede finalizar con las coordenadas relativas cuando no hay un número suficiente de nodos *anchor*. Aún así, esta información puede ser relevante, pudiéndose establecer un sistema de coordenadas arbitrario.

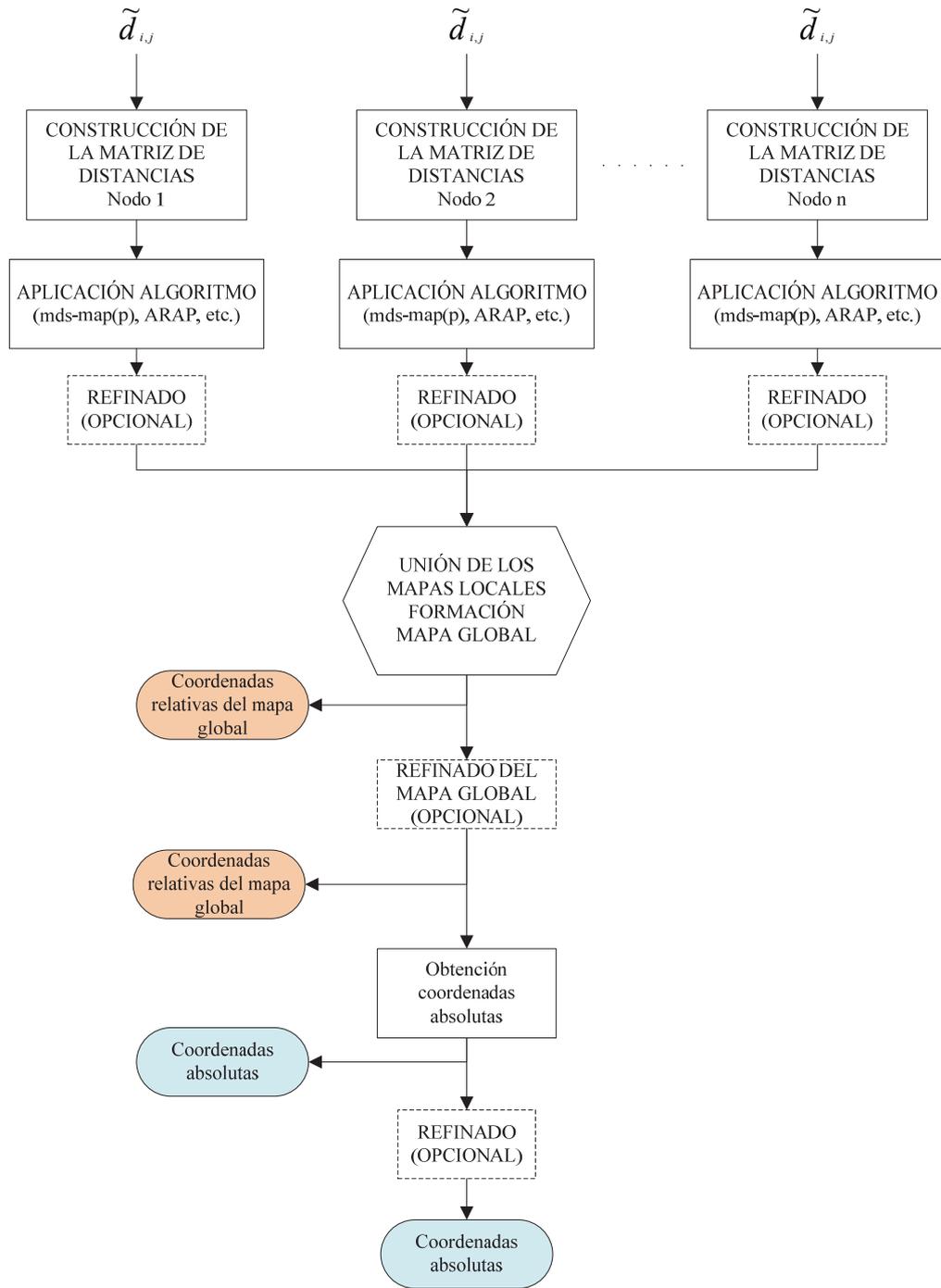


Figura 4.2. Etapas básicas en algoritmos de localización cooperativa

## 4.4 DESARROLLO DE UN SIMULADOR: wsnLocalize

En este apartado se describe el desarrollo de un simulador interactivo que permite evaluar y comparar diferentes algoritmos de localización en WSNs. En primer lugar, se introducen los principales conceptos (algunos de ellos comentados en apartados anteriores) de modelado de redes y posicionamiento de sensores. En segundo lugar, se justifica el desarrollo de wsnLocalize y se especifican las principales características que aporta. Por último, se describen los principales elementos de la interfaz y las posibilidades de simulación que ofrece.

### 4.4.1 Introducción

En las secciones anteriores se han descrito las principales medidas utilizadas para la estimación de distancias, así como las etapas básicas de algoritmos de localización cooperativa. Se ha hecho especial hincapié en las técnicas basadas en MDS. En la mayoría de los trabajos consultados en esta tesis, los autores utilizan un conjunto de parámetros de la red para evaluar el rendimiento de los algoritmos desarrollados. Estos parámetros son principalmente dos: el error en la medida,  $e_r$ , se suele modelar como ruido gaussiano y se indica en tanto por ciento, respecto a la desviación típica de la distribución normal estándar, y que se añade a la medida real, es decir,  $\tilde{d}_{i,j} = d_{i,j} + N(0, (\frac{e_r}{100})^2)$ . Por otro lado, se define el alcance o rango de los nodos en la red,  $R$ , indicado en unidades de longitud relativas a la unidad de longitud que se supone en simulación. Por ejemplo, si se distribuyen 40 nodos en un área de  $10r \cdot 10r$ , el rango  $R$  podría ser igual a  $1.5r$ , siendo  $r$  la unidad de longitud. El error de la medida afecta a la precisión de las distancias medidas entre pares de nodos y conocidas a priori,  $\tilde{d}_{i,j}$ , y  $R$  a la conectividad media de la WSN, que indirectamente también afecta al conjunto de distancias inferidas,  $\hat{d}_{i,j}$ , y por tanto a la fiabilidad de la matriz  $\tilde{D}$  respecto a la matriz de distancias reales  $D$ . En la mayoría de los trabajos consultados que proponen un algoritmo de localización, se estudia su rendimiento bajo condiciones y características únicas de los nodos, esto es, considerando un único tipo de nodo con unas características de alcance y estimación de distancias definidas por  $R$  y  $e_r$ , respectivamente. Un valor constante de  $R$  implica que si  $d_{i,j} > R$ , no existe conexión directa entre los nodos  $i, j$ , suponiéndose un modelo de disco (*disk graph model*) para

definir la cobertura o alcance de comunicación directa. Bajo estas características, se estudia la robustez del algoritmo de localización modificando la disposición de los nodos. Se establecen diferentes tipos de distribución, como por ejemplo en forma de *grid*, aleatoria, con forma de C (*C-shape*), hexagonal, etc. También se modifica el número de nodos *anchor* y, mediante simulaciones Monte Carlo<sup>11</sup>, se obtiene una estimación de la precisión global del algoritmo, por ejemplo mediante el valor de una función de coste, como por ejemplo la función de *Stress*, definida en la expresión (4.17). La modificación de estos parámetros permite comprobar si se produce una mejora sustancial, por ejemplo con el aumento del número de nodos *anchor*, modificando la geometría de la red, aumentando la conectividad, o disminuyendo el error en las distancias medidas. Si se considera  $\tilde{d}_{i,j} = d_{i,j}$  en la función *Stress*, es decir, se consideran conocidas las distancias reales, se puede obtener una medida cuantitativa (según la función de coste considerada) de distancias obtenidas por el algoritmo de localización aplicado respecto a las verdaderas. Del mismo modo, se pueden obtener otros índices de desempeño, como el error cuadrático medio, el error normalizado según el número de nodos y el área que cubre la WSN, etc.

Como se ha dicho, los parámetros de los nodos de la WSN se suelen considerar constantes, lo que equivale a considerar un modelo de propagación y un tipo de nodo únicos, constituyéndose un modelo de red cuyos resultados de simulación pueden distar demasiado de los que se obtendrían en entornos reales.

#### 4.4.2 Justificación

El tipo de simulaciones comentadas en el apartado anterior pueden ser de utilidad en la comparación de diferentes algoritmos bajo unas “condiciones estadísticas constantes”. Sin embargo, una WSN, debido a su extensión, puede instalarse en entornos cuyas características varían según el emplazamiento de los nodos. Por ejemplo, es perfectamente probable que existan zonas con mayor número de obstrucciones que otras, y que esto disminuya la conectividad de los nodos en uno o varios sectores de la

---

<sup>11</sup> El método o simulación de Monte Carlo es una técnica estadística que proporciona soluciones aproximadas a partir de un conjunto de muestras u observaciones. Por ejemplo, si se lanza 10000 veces una moneda podría obtenerse una aproximación de la probabilidad de “obtener una cara en una tirada” en función del número de caras obtenidas en las 10000 observaciones. Del mismo modo, se pueden obtener conclusiones acerca del grado de desempeño de algoritmos de localización, observando sus resultados en repetidas ocasiones, por ejemplo, calculando el valor medio obtenido en la función de *Stress*.

red. También es posible que una red cuente con nodos con diferentes capacidades de cobertura y precisión en la medida de distancias. Por ejemplo, una WSN podría ampliarse con la instalación de nodos más avanzados, con tecnología UWB, y además conservar otros anteriores con menores capacidades de precisión en la medida de distancias y alcance de comunicación. De esta forma, convivirían dispositivos con diferentes características. Es deseable por tanto disponer de una herramienta que permita:

- La capacidad de especificar características heterogéneas en la WSN (coberturas de los nodos, diferentes ruidos en la medida de distancias, etc).
- Incluir diferentes algoritmos de localización cooperativa (como los comentados en el apartado 4.3 o similares), y comparar su grado de desempeño atendiendo a diferentes índices de desempeño (errores en el posicionamiento, tiempo medio de computación).
- Incluir información adicional de los límites de precisión alcanzables, como por ejemplo las cotas de CRLB referenciadas en el apartado 4.2.2.
- Generar informes, a partir de simulaciones de tipo Monte Carlo, que permitan evaluar el grado de desempeño de diferentes algoritmos de localización, según la estructura de la red, número de nodos *anchor*, ruido en las distancias medidas y, de este modo, obtener conclusiones acerca del comportamiento de los mismos.
- Realizar las simulaciones mediante una interfaz intuitiva, de manera que sea posible modificar las características de la WSN de forma sencilla y rápida, generando de forma instantánea resultados de simulación.

En esta línea, y considerando además un modelo de red probabilístico, similar al expuesto en (Drineas et al., 2007) en la construcción de la matriz de distancias  $\tilde{D}$ , en esta tesis se ha diseñado *wsnLocalize*. Esta herramienta, diseñada bajo el entorno de Matlab, pretende servir como *benchmark* de diferentes algoritmos de localización cooperativa en diferentes topologías de WSN, permitiendo, mediante simulación, obtener valores de índices de desempeño como las funciones de coste comentadas anteriormente, además de otras que se describen a continuación. La característica distintiva de *wsnLocalize* es la interactividad con el usuario, permitiendo modificar el número y posiciones del conjunto de nodos que la conforman. Pero sobre todo, la principal contribución de *wsnLocalize* es la capacidad de definir características para

cada uno de los nodos que conforman una WSN. Por ejemplo, dado un nodo  $i$ , es posible especificar el ruido con el que realiza la medida de distancia, el rango  $R_i$ , y la probabilidad de fallo  $p_i$ . La especificación de características particulares hace que sea posible caracterizar de una manera más precisa el tipo y disposición de los nodos de la WSN que se pretende simular, por lo que los resultados que proporciona wsnLocalize son más realistas que simulaciones con parámetros constantes, siempre y cuando la WSN se haya caracterizado adecuadamente.

Considerando el contexto de la seguridad industrial, ya se indicaron las posibles contribuciones que los algoritmos de posicionamiento pueden aportar en materia de prevención y protección laboral. Para evaluar el rendimiento de la tarea de posicionamiento, es importante considerar el tipo de entorno donde se instalaría la WSN, y considerar características como las que ya se han comentado (cobertura de la red, tipos de nodos, etc) en párrafos anteriores. Es posible, por ejemplo, que existan vehículos con sensores de posicionamiento que dispongan de antenas que proporcionan una mayor cobertura, en comparación con aquellos que lleven acoplados los operarios, de menor tamaño y características ergonómicas adecuadas para no dificultar las tareas del trabajador. También es de interés conocer la capacidad que tiene el sistema de posicionar a un trabajador según donde éste se encuentre (*tracking* de un solo nodo). Éstos y otros aspectos son los que se pretenden cubrir con wsnLocalize. Se comentan en los siguientes apartados.

#### 4.4.3 Descripción de wsnLocalize

En la Figura 4.3 se muestra el aspecto de la ventana principal de wsnLocalize. Se observan dos gráficas a cada lado. En la gráfica de la derecha se disponen los nodos que conforman la WSN, tanto los nodos *anchor* como los nodos *blind*. La gráfica de la izquierda muestra el posicionamiento absoluto resultante de los nodos, cuando éste es posible, y que depende de un algoritmo de localización específico seleccionado por el usuario. Cada vez que se modifica un parámetro de la red o la posición de un nodo en la gráfica derecha, se actualiza el grafo asociado a la WSN modelada, ejecutándose una nueva simulación en función del algoritmo de localización seleccionado. El panel “*Simulation Results*” proporciona información relevante, como el valor del error máximo, medio, la desviación estándar, la conectividad media de la WSN, el error de posición de un nodo específico que el usuario seleccione, o el grado de desempeño

general del algoritmo de localización seleccionado. Se han implementado diferentes funciones de coste para evaluar la bondad de los algoritmos. Por ejemplo, para que los resultados sean independientes de las distancias entre nodos, se utiliza la función *Stress* normalizada o también denominada  $Stress_1$  (Borg et al., 2012),

$$Stress_1(x_1, \dots, x_n) = \sqrt{\frac{\sum_{(i,j) \in E} (\|x_i - x_j\| - d_{i,j})^2}{\sum_{i,j} d_{i,j}^2}}. \quad (4.21)$$

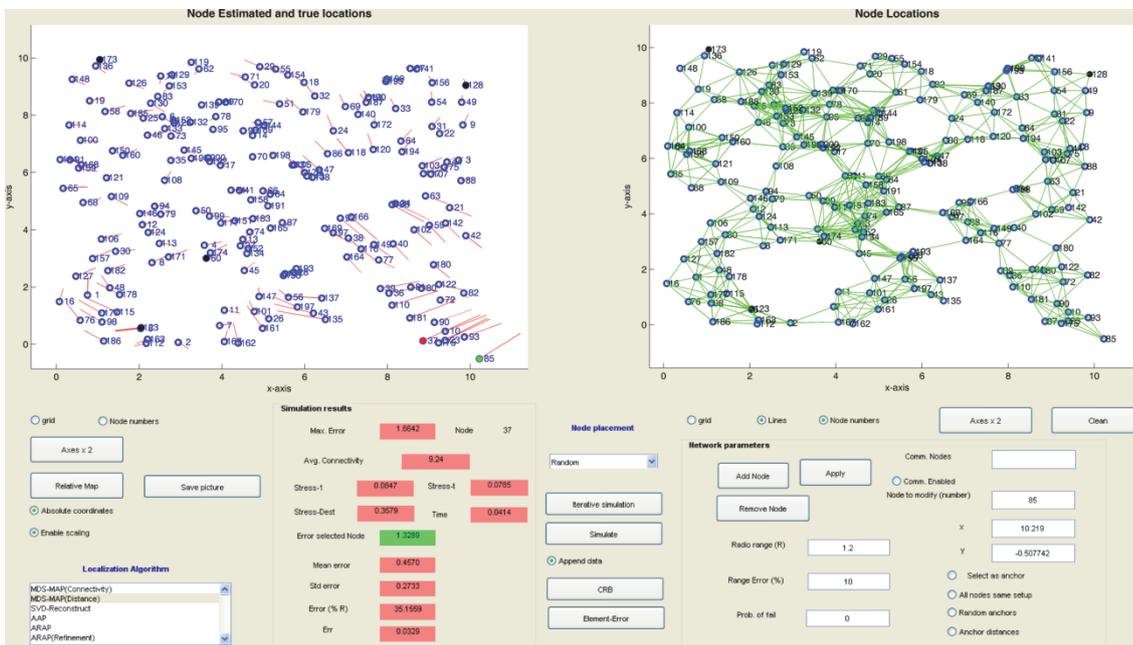


Figura 4.3. Ventana principal de wsnLocalize

Es importante comprender que los algoritmos presentados anteriormente pretenden minimizar funciones similares a la expresión (4.21). Sin embargo, independientemente del tipo de función considerada, la información de la que se dispone no es completa, es decir, se conoce  $\tilde{D}$  pero no  $D$ , por lo que en la expresión anterior habría que sustituir  $d_{i,j}$  por  $\tilde{d}_{i,j}$  tanto en el numerador como el denominador, obteniéndose para tal caso la bondad o grado de similitud de las distancias que genera el algoritmo respecto a las distancias de entrada. Sin embargo, en wsnLocalize, para el cálculo de funciones similares a la de  $Stress_1$ , se considera la matriz de distancias exactas  $D$ , conocida por el simulador, y desconocida en un caso real. De esta manera, se tiene una medida cuantitativa del ajuste que se obtiene respecto al caso ideal. También es interesante

cuantificar la similitud entre la matriz de distancias estimadas  $\tilde{D}$  respecto a  $D$ . Una posible medida es la norma de *Frobenius* al cuadrado y normalizada al número de entradas de la matriz  $N^2$ ,

$$\|D - \tilde{D}\|_F^2 / N^2, \quad (4.22)$$

donde  $N$  representa el número de nodos de la WSN. La expresión (4.22) mide el error cuadrático medio por elemento de la matriz. Cuanto menor sea, más se aproxima la matriz de distancias estimadas a las distancias reales.

Para medir el grado de desempeño de los algoritmos también se incluye el error medio normalizado por nodo. En este caso se ha utilizado una función similar a la empleada en (Zhang et al., 2010),

$$Err = \frac{\sum_{i=1}^N \|x_i - \tilde{x}_i\|}{n \cdot \max(D_{i,j})}, \quad (4.23)$$

donde  $x_i$  es la posición absoluta del nodo  $i$  (conocida por el simulador),  $\tilde{x}_i$  la posición absoluta estimada según el algoritmo de localización aplicado,  $N$  el número de nodos en la red y  $D$  la matriz de distancias reales de los nodos. Esta ecuación se aplica exclusivamente cuando se transforma el mapa relativo al mapa absoluto, es decir, cuando existen al menos tres nodos *anchor* para el caso bidimensional. Otra función de coste interesante es la función  $Stress_t$ ,

$$Stress_t(t \cdot x_1, \dots, t \cdot x_n) = \sqrt{1 - \frac{\sum_{(i,j) \in E} (\|x_i - x_j\| \cdot D_{i,j})^2}{\sum_{i,j} D^2 \cdot \sum_{i,j} \|x_i - x_j\|^2}}. \quad (4.24)$$

Los valores que proporciona la expresión (4.24) son **invariantes** a un factor de escalado  $t$ . Esto significa que si el algoritmo proporciona una configuración  $\mathbf{X}$  cuyas distancias euclídeas están relacionadas por un factor de escalado respecto a las distancias verdaderas, independientemente de dicho factor, la función  $Stress_t$  proporcionará el mismo valor (Buja et al., 2008). Esta función se ha considerado debido a que es posible que un algoritmo proporcione un buen ajuste en el mapa relativo, y que sin embargo las expresiones (4.21) y (4.22) muestren resultados de ajuste pobres, que efectivamente lo son en el sentido de conservación de distancias absolutas, pero no si se

considera una relación de escalado. Esto ocurre por ejemplo cuando los algoritmos de posicionamiento utilizan solo la conectividad como medida para la construcción de la matriz de entrada, donde a cada arista del grafo asociado,  $G$ , se le asigna el valor 1.

Por otra parte, *wsnLocalize* se ha diseñado para mostrar de manera simultánea las posiciones reales de los nodos y las estimadas según el algoritmo de localización seleccionado. El usuario puede modificar la posición de cada nodo seleccionándolo y arrastrándolo en la gráfica de la derecha. También, se ha incluido la opción de realizar simulaciones de tipo Monte Carlo. De esta manera, es posible obtener conclusiones estadísticas que describan el comportamiento de los diferentes algoritmos de posicionamiento según el modelo de red que se está simulando. En cada iteración se guardan los resultados generados y, finalmente, *wsnLocalize* genera un conjunto de parámetros promedio que quedan almacenados en un fichero de texto (ver Apéndice II).

En la siguiente tabla se resumen las principales características implementadas en la versión actual:

**Tabla 4.3. Principales elementos interactivos de *wsnLocalize***

Elemento	Descripción
' <i>Absolute coordinate's</i>	Cuando está activado, <i>wsnLocalize</i> realiza el paso a coordenadas absolutas en función de los nodos <i>anchor</i> .
' <i>All nodes same setup</i> ' radio-button	Si se encuentra activo se considerarán exclusivamente las características definidas en el panel <i>Network Parameters</i> para todos los nodos de la WSN. Si no se encuentra activo, se tienen en cuenta las características definidas que el usuario haya podido definir para cada nodo en particular.
' <i>Axes x2</i> ' button	Realiza un <i>zoom out</i> .
' <i>Add node</i> ' button	Se agrega un nodo a la WSN actual. El usuario puede colocarlo especificando sus coordenadas. Si por ejemplo existen 40 nodos, el nuevo nodo se etiqueta como número 41.
' <i>Avg. Connectivity</i> ' text field	Muestra la conectividad media de la red.
' <i>Clean</i> ' button	Borrado completo de la red. Útil cuando el usuario modelar una nueva WSN.
' <i>Comm. Nodes</i> '	Sirve para habilitar o deshabilitar la posible comunicación entre el nodo del campo ' <i>Node to modify (number)</i> ' y los que se seleccionen en este campo. Si la comunicación está habilitada, el botón " <i>Comm. Enabled</i> " se activará automáticamente, y se desactivará en caso contrario.
' <i>CRB</i> ' button	Calcula el límite CRLB y muestra las regiones de incertidumbre de cada nodo <i>blind</i> .

(Continuación Tabla 4.3)	
'Enable scaling' radio-button	Cuando está activo permite que se realicen operaciones de escalado (además transformaciones rígidas, como son las rotaciones, traslaciones y reflexiones) en la obtención del mapa global, la cual es posible cuando existen al menos existen 3 nodos <i>anchor</i> .
'Err' text field	Muestra el error absoluto normalizado definido en la expresión (4.23).
'Error(%R)' text field	Muestra el error medio relativo al rango de conectividad de los nodos. Por ejemplo, un <i>Error(%R)</i> del 32 % en una WSN con $R = 20$ unidades de longitud significa un error medio de $20 \cdot 0.32 = 6.4$ unidades de longitud. Este parámetro es útil en la comparación de algoritmos en redes uniformes y con una conectividad parecida. En caso contrario, <i>Mean error</i> proporciona una medida absoluta.
'Estimated and true locations' axes	Eje de coordenadas, situado a la izquierda de la ventana principal, que muestra el mapa absoluto de las coordenadas estimadas de los nodos, y que se indican mediante una línea roja error respecto a las posiciones reales. Además, en rojo se muestra el nodo cuyo error en la estima de la posición es máximo, en verde el nodo seleccionado en el campo de texto ' <i>Node to modify (number)</i> ', y en negro los nodos <i>anchor</i> que se han utilizado para obtener el mapa absoluto de coordenadas. En azul se muestran las posiciones reales de los nodos <i>blind</i> .
'Grid', 'Lines' y 'Node numbers'	Estos botones simplemente activan o desactivan el <i>grid</i> de los ejes, las líneas de conectividad del grafo asociado, o las etiquetas que numeran los nodos, respectivamente.
'Iterative Simulation' button	Se ejecutan de forma iterativa, un conjunto de simulaciones de la WSN configurada. Cuando la WSN modelada tiene componentes aleatorias definidas (probabilidad de fallo de los nodos o ruido asociado a las medidas, etc), la simulación es de tipo Monte Carlo. Una vez que terminan iteraciones, se guardan los valores medios de todos los parámetros en una ventana emergente. Adicionalmente se muestran en cada nodo <i>blind</i> las regiones de incertidumbre.
'Localization algorithm' box	Indica el algoritmo de localización que se va a emplear en la simulación (MDS-MAP(C), MDS-MAP, etc.).
'Max Error' text field	Muestra el máximo error obtenido en la simulación, es decir, la máxima diferencia entre la posición real y la estimada de un nodo concreto, que también se especifica.
'Mean Error' text field	Muestra el error medio obtenido de la WSN.
'Node Locations' Axes	Este eje de coordenadas, que se encuentra en la parte derecha de la ventana principal, representa los nodos <i>anchor</i> en color negro, y los nodos cuyas posiciones son desconocidas en color azul. Cuando existe conectividad directa entre un par de nodos (y por tanto la capacidad de estimar una medida de distancia), ésta se representa mediante una línea cuando el botón <i>lines</i> está activado.
'Node placement' pop-up menu	Este menú muestra la generación automática de diferentes topologías de la red: aleatoria ( <i>random</i> ), <i>grid</i> con o sin ruido, con forma de <i>C</i> ( <i>C-shaped</i> ). En todas ellas es posible especificar el número inicial de nodos total y número de nodos <i>anchor</i> .
'Node' text field	En este texto se indica el número del nodo cuyo error máximo se ha obtenido.
'Prob. of fail' text field	Indica la probabilidad de fallo del nodo especificado en el campo de texto ' <i>Node to modify (number)</i> '

(Continuación Tabla 4.3)	
'Random anchors' radio-button	En caso de estar activado, se modificarán los nodos <i>anchors</i> de la WSN cada vez que se realice una simulación. Es decir, si en una red de 20 nodos los etiquetados con los números 4,5 y 7 son <i>anchor</i> , en la siguiente simulación se elegirán otros 3 nodos <i>anchor</i> de forma aleatoria. Esta opción es interesante para estudiar error global del mapa global en función de los nodos tomados como referencia.
'Range Error'	Ruido gaussiano añadido a la distancia real, $e_r$ , o desviación estándar para medidas TOA.
'Remove node' button	Se elimina de la WSN el nodo especificado en el campo de texto ' <i>node to modify (number)</i> ' y se actualiza la WSN.
'Relative map' button	Cuando se pulsa, se muestra el mapa relativo generado por el algoritmo de localización utilizado. Si no se pulsa el mapa relativo se sigue calculando pero no se muestra.
'Select as anchor' radio-button	Si este radio-button se encuentra activado, el nodo especificado en el campo de texto ' <i>node to modify (number)</i> ' se considera como un nodo <i>anchor</i> . Sus coordenadas absolutas se utilizarán para obtener las posiciones absolutas de los nodos.
'Simulate' button	Se lleva a cabo una nueva simulación. Si existen variables aleatorias definidas (como por ejemplo el ruido asociado a las medidas), los resultados variarán de simulación a simulación.
'Std error' text field	Se muestra la desviación típica obtenida del error global entre las posiciones reales de los nodos y las estimadas.
'Stress-1' text field	Función de estrés normalizada a las distancias reales, según la expresión (4.21).
'Stress-t' text field	Función de estrés normalizada a las distancias reales, según la expresión (4.24), que además es invariante si las distancias euclídeas obtenidas guardan una relación de escalado con las reales.
'Stress-Dest' text field	Función de estrés que cuantifica la similitud entre la matriz $D$ y $\tilde{D}$ , de acuerdo a la expresión (4.22).
'Time' text field	Indica el tiempo necesario de procesado, en segundos, según el algoritmo empleado. Este valor depende del equipo que se esté utilizando y debe considerarse relativo a éste. Es útil para comprar los diferentes órdenes de magnitud en tiempo para los diferentes algoritmos implementados.
'x' e 'y' text field	Indican las coordenadas correspondientes al nodo especificado en el campo de texto ' <i>node to modify (number)</i> '. Las coordenadas de dicho nodo se pueden modificar modificando manualmente los valores 'x' e 'y' o arrastrando el nodo con el ratón.

## 4.5 EJEMPLOS DE SIMULACIÓN

En este apartado se muestran algunos resultados de simulación obtenidos con *wsnLocalize*. Por una parte, se establecen parámetros que caracterizan la red, como el número de nodos a localizar, número de nodos *anchor*, alcance de los nodos y la distribución inicial de los mismos. Considerando parámetros característicos de la WSN, se obtienen los resultados que cuantifican el desempeño de diferentes algoritmos de

localización implementados. En primer lugar se considera una distribución en forma de *grid*, donde los nodos se sitúan de forma aproximadamente equi-espaciada, agregándose además un pequeño error aleatorio a cada coordenada, de modo que el *grid* de la red no queda totalmente uniforme. Muchos de los trabajos consultados utilizan este tipo de distribución en el análisis de algoritmos de localización (Patwari et al., 2005; Shang & Ruml, 2004; Shang et al., 2003), y posteriormente comparan los resultados de simulación con una distribución de nodos aleatoria, donde generalmente disminuye la precisión del algoritmo de posicionamiento si los parámetros de conectividad de la red y de error en la medida de distancias se mantienen (Shang & Ruml, 2004). Este último caso constituye el segundo de los ejemplos de simulación que se muestran. Por último, se estudia una red con más nodos *anchor* que nodos *blind*. Se resaltan las características de un modelado homogéneo frente a otro más realista, donde se incluyen características individuales en cada nodo, comparándose los resultados de simulación y el efecto que de la inclusión de un modelo probabilístico de la WSN produce en la precisión del posicionamiento. Se muestran también los resultados del cálculo del CRLB para el caso TOA.

#### 4.5.1 Distribución en forma de *grid*

Se ha analizado una configuración donde 100 nodos distribuidos en un *grid* de  $10r \cdot 10r$ , donde  $r$  es la unidad de longitud considerada. Para el emplazamiento de los nodos se ha añadido un ruido de tipo gaussiano  $e_p$  del 10 %. Es decir, a las posiciones de los nodos se les añade un error de  $r \cdot e_p / 100 \cdot N(0,1)$ , quedando la estructura de nodos mostrada en la Figura 4.4 (b), donde cada línea verde representa la existencia de comunicación entre el par de nodos que une. Se han elegido 3 nodos *anchor*, coloreados en negro, y se han analizado conectividades  $R$  de  $1.5r$ ,  $2r$ ,  $2.5r$  y  $3r$ . Para cada una de las conectividades mencionadas se han realizado simulaciones de Monte Carlo de 40 iteraciones, considerando los algoritmos MDS-MAP(C), MDS-MAP(P), ARAP y ARAP + ref (con etapa de refinado). A modo ilustrativo, en la Figura 4.4(a) se muestran las posiciones estimadas con el algoritmo MDS-MAP(C) y  $R = 1.5r$ , obteniéndose una conectividad media de 6.08. Con estas características se obtiene un error medio en el posicionamiento de  $0.5564r$  y un error máximo de  $1.7061r$ . Los ejes de las figuras tienen unidades de longitud  $r$ . Como ejemplo específico, considerando  $r = 1m$  el ejemplo actual se corresponde con una distribución de nodos en un área de  $10m \cdot 10m$ ,

con errores medio y máximo de 0.5564 m y 1.7061 m, respectivamente. Todas las figuras que se muestran a continuación deben interpretarse del modo comentado. Aunque se ha dejado la unidad de longitud utilizada como un factor relativo,  $r$ , de las dimensiones de la red, para los casos y modelos de error contemplados en esta tesis se pueden suponer unidades de metro, ya que para distancias de este orden, los errores en la medida TOA y RSSI de tipo gaussiano modelan adecuadamente la estimación distancias entre sensores (Patwari et al., 2005).

La Figura 4.5 se muestra el mapa relativo que se obtiene al aplicar el algoritmo MDS-MAP(C). Esta figura resalta algunas de las características interesantes de los algoritmos MDS. Las distancias entre nodos de ese mapa constituyen la matriz de distancias estimadas  $\tilde{D}$ , y cuanto más precisa sea, mejor será el posicionamiento global de los nodos. Los nodos 6, 70 y 61, mostrados en el mapa relativo representado en la Figura 4.5, son los utilizados como *anchor* para la construcción del mapa. Sin embargo, si no existieran nodos *anchor*, no sería posible obtener una estimación de las posiciones absolutas de los nodos, como la representada en la Figura 4.4(a). También, se puede observar que los nodos del mapa relativo se encuentran distribuidos en un área de aproximadamente  $4r \cdot 4r$ , lo que sugiere que las distancias no se han conservado. No se debe olvidar que el algoritmo que se ha empleado es MDS-MAP(C), el cual se basa en la conectividad de sensores, de modo que si existe comunicación entre un par de sensores, se asigna 1, y de lo contrario 0. Por tanto, es evidente que en la estimación de distancias entre nodos, éstas no tienen que corresponderse con las verdaderas. Sin embargo, al existir una distribución de tipo *grid*, se obtiene una aproximación admisible de las distancias euclídeas, aunque considerando un factor de escalado. Es decir las razones entre distancias se conservan de forma admisible para conectividades no elevadas (esto se explica en detalle en el siguiente apartado). Se puede comprobar que esta aproximación se degrada cuando los nodos están distribuidos de forma aleatoria (Shang & Ruml, 2004; Shang et al., 2003).

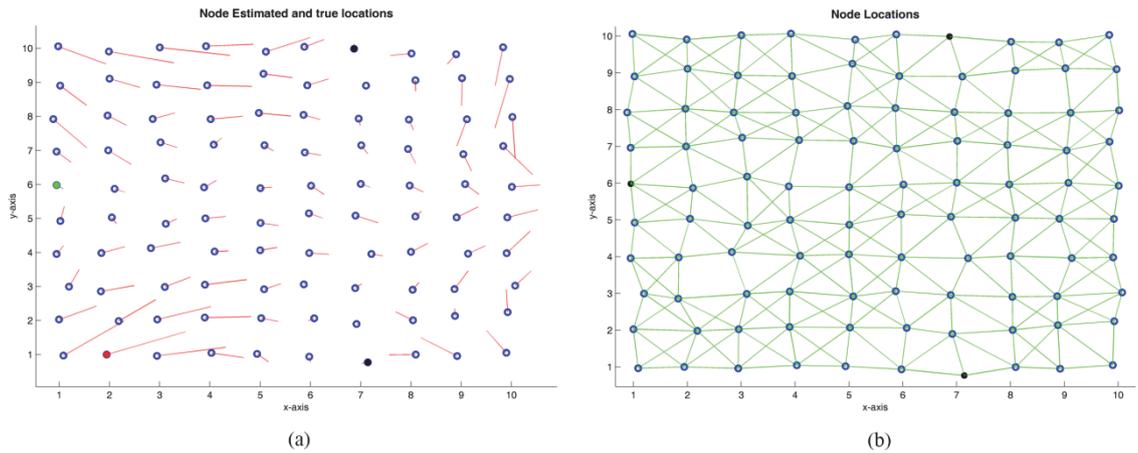


Figura 4.4. (a) Posiciones reales de los nodos ( $\circ$ ) y error respecto a las posiciones estimadas ( $\text{---}$ ).  $R = 1.5r$ . (b) Posiciones verdaderas de los nodos y grafo asociado a la WSN.

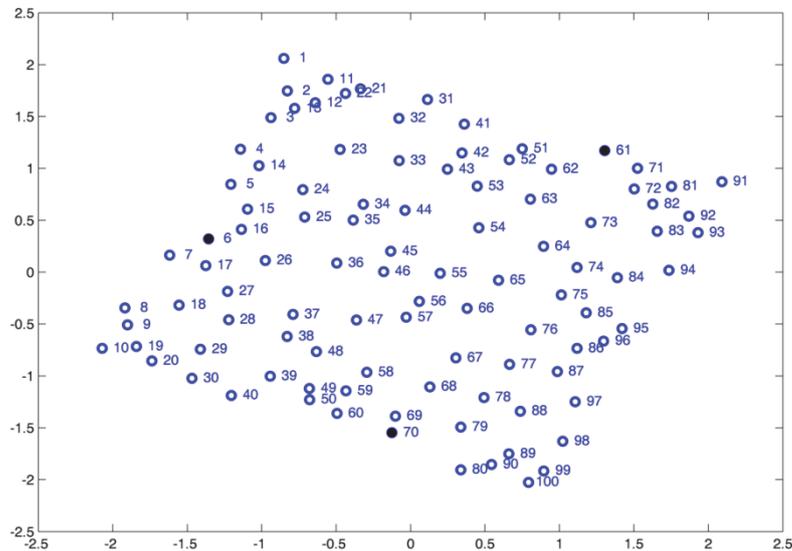


Figura 4.5. Mapa relativo obtenido con MDS-MAP(C),  $R = 1.5r$  (unidades de los ejes relativas a  $r$ )

Es importante tener en cuenta que para los dos algoritmos ARAP no se han considerado transformaciones de escalado en la construcción del mapa global, ya que los autores basan este algoritmo en transformaciones rígidas y a partir de información de distancias entre nodos (Zhang et al., 2010). De hecho, puede comprobarse que habilitando la opción “*Enable scaling*” en `wsnLocalize` los resultados con ARAP son muy parecidos. Deshabilitando esta opción se puede comprobar que el resultado de MDS-MAP(C) empeora considerablemente, en términos de error absoluto, ya que en las transformaciones necesarias para obtener el mapa absoluto no se permite la operación de escalado.

#### 4.5.1.1 Resultados

En la Tabla 4.4 se muestran los parámetros estadísticos obtenidos mediante simulación. En cada simulación se han realizado 40 iteraciones y se han obtenido los valores medios para cada uno de los parámetros, utilizando los mismos nodos *anchor* para todas las iteraciones y todos los algoritmos evaluados. Excepto para los algoritmos ARAP, en los demás, la opción de escalado está habilitada. En dicha tabla se muestra el nombre del algoritmo utilizado, el rango de los nodos, ( $R$ ); el ruido en la medida de las distancias,  $e_r$ , expresado en tanto por ciento; la conectividad media obtenida en la red,  $C$ ; el error medio en la localización respecto al rango de los nodos,  $Err(\%R)$ ; el error máximo y medio promediado en las 40 iteraciones,  $Max-Error$  y  $Media-Error$ ; la desviación típica del error medio obtenido en el posicionamiento de cada nodo (cuanto menor sea este parámetro, el error en el posicionado de cada nodo es más uniforme o similar),  $std(Error)$ ; el error normalizado de la expresión (4.23),  $Err$ ; la función de estrés normalizada a la distancias,  $Stress_1$ ; y la función de estrés normalizada tanto a la distancia como invariante a un factor de escalado,  $Stress_t$ . También se incluye el error cuadrático medio por elemento de la matriz de distancias estimadas,  $\tilde{D}$ , con respecto a la matriz de distancias verdaderas,  $D$ , (conocida por `wsnLocalize`), correspondiente a la expresión (4.22), y denominada en este caso  $Stress_{\tilde{D}}$ . Este parámetro mide fiabilidad de los datos de entrada. Por último, se incluye el tiempo medio de cálculo del algoritmo,  $t$ , en segundos. Este parámetro debe tomarse como una medida relativa, dependiente de la velocidad del equipo donde se ejecutan las simulaciones. Para este caso, las simulaciones se realizaron en un Intel Core Quad Q6600@2.40GHz con 4 GB de RAM bajo Windows XP SP3.

**Tabla 4.4. Datos estadísticos. WSN 100 nodos distribuidos en grid 10r-10r,  $e_p = 10\%$ , 3 nodos *anchor*.**

<sup>1</sup>En este caso los nodos *anchor* (3) se han modificado aleatoriamente para cada iteración

Algoritmo	R	$e_r$	C	Err(%R)	Max. Error	Media Error	Std(Error)	Err	Stress-1	Stress-t	Stress $\tilde{D}$	t (s)
MDS-MAP(C)	1.5	-	6.08	37.0924	1.7061	0.5564	0.3607	0.0439	0.1395	0.0879	0.4428	0.0087
MDS-MAP(C)	2	-	8.74	26.7743	1.6048	0.5355	0.3056	0.0422	0.3060	0.0625	2.9580	0.0069
MDS-MAP(C)	2.5	-	15.68	9.1161	0.5433	0.2279	0.1161	0.0180	0.5026	0.0372	7.7092	0.0087
MDS-MAP(C)	3	-	20.1	12.1917	1.1245	0.3658	0.2236	0.0289	0.5866	0.0620	10.3735	0.0092
MDS-MAP(C)	3.5	-	27.06	15.0447	1.3753	0.5266	0.2677	0.0415	0.6428	0.0582	12.6875	0.0087
MDS-MAP(D)	1.5	5	6.08	9.9766	0.4016	0.1496	0.0846	0.0118	0.0509	0.0248	0.0979	0.0071
MDS-MAP(D) <sup>1</sup>	1.5	5	6.08	12.14	0.4597	0.1821	0.0969	0.0144	0.0510	0.0247	0.0987	0.0073
MDS-MAP(D)	2	5	8.74	6.2893	0.3428	0.1258	0.0689	0.0099	0.0256	0.0184	0.0310	0.0072
MDS-MAP(D)	2.5	5	15.68	4.7834	0.3277	0.1196	0.0648	0.0094	0.0251	0.0178	0.0227	0.0071
MDS-MAP(D)	3	5	20.1	4.0988	0.3349	0.1230	0.0677	0.0097	0.0341	0.0180	0.0347	0.0073
MDS-MAP(D)	3.5	5	27.06	3.3372	0.3108	0.1168	0.0623	0.0092	0.0431	0.0173	0.0558	0.0072
ARAP	1.5	5	6.08	6.0295	0.2481	0.0904	0.0487	0.0071	0.0145	0.0140	0.1001	0.0648
ARAP	2	5	8.74	3.8995	0.2352	0.0780	0.0432	0.0062	0.0125	0.0122	0.0306	1.5229
ARAP	2.5	5	15.68	2.5655	0.1852	0.0641	0.0351	0.0051	0.0102	0.0100	0.0240	3.4588
ARAP	3	5	20.1	2.0914	0.1924	0.0627	0.0360	0.0049	0.0101	0.0098	0.0352	5.1697
ARAP	3.5	5	27.06	1.6556	0.1577	0.0579	0.0309	0.0046	0.0094	0.0091	0.0554	8.6734
ARAP + ref	1.5	5	6.08	5.9508	0.2296	0.0893	0.0469	0.0070	0.0135	0.1300	0.1002	1.0318
ARAP + ref	2	5	8.74	3.6761	0.1928	0.0735	0.0384	0.0058	0.0121	0.0116	0.0309	1.5599
ARAP + ref	2.5	5	15.68	2.5927	0.1779	0.0648	0.0354	0.0051	0.0098	0.0096	0.0232	3.5110
ARAP + ref	3	5	20.1	2.0284	0.1701	0.0609	0.0336	0.0048	0.0097	0.0094	0.0375	5.2147
ARAP + ref	3.5	5	27.06	1.6206	0.1535	0.0567	0.0299	0.0045	0.0090	0.0089	0.0548	8.7376

#### 4.5.1.2 Interpretación de los resultados

De la Tabla 4.4 se pueden obtener varias conclusiones. Por ejemplo, y como se ha comentado anteriormente, en el algoritmo MDS-MAP(C) se observa una diferencia sustancial respecto a las funciones de  $Stress_1$  y  $Stress_t$ , siendo mayor la primera. Esto indica que si se permiten operaciones de escalado en la construcción del mapa global se mejora la estimación de las posiciones. Las posiciones obtenidas con algoritmo MDS-MAP(C) son menos exactas frente a MDS-MAP(D), con  $e_r = 5\%$ . Similares resultados obtienen sus autores (Shang & Ruml, 2004; Shang et al., 2003). Otro aspecto interesante es la reconstrucción del a matriz de distancias  $\tilde{D}$ , que para el caso de MDS-MAP(D) y ARAP es del mismo orden, ya que esta etapa es exactamente igual en ambos algoritmos, dependiente exclusivamente de la estructura de la WSN y del error de las

decir que la “calidad” de los datos de entrada para los dos algoritmos es semejante, por lo que la comparación de los resultados que cuantifican el rendimiento de los algoritmos se puede considerar justa. Sin embargo, el error medio obtenido y las funciones de estrés son sustancialmente menores para ARAP, especialmente a conectividades bajas, donde el error medio es aproximadamente un 65% mayor para MDS-MAP(D). No obstante, conforme aumenta la conectividad, esta diferencia disminuye y, además, el tiempo de cálculo necesario para el algoritmo ARAP aumenta considerablemente, llegando a ser tres órdenes de magnitud mayor respecto a las variantes de MDS-MAP. En la Figura 4.6 se representa el error medio de las posiciones estimadas para la configuración de la Figura 4.4. Este error se ha obtenido en función de la conectividad y según el algoritmo aplicado. Como se observa, el conocimiento de las distancias hace que el error medio sea menor que para el caso de solo conectividad (MDS-MAP(C)). Además, para este último caso, una mayor conectividad no implica necesariamente una mejora en la estimación de las posiciones. Esto es debido a que las distancias euclídeas estimadas, y que constituyen la matriz  $\tilde{D}$ , tienen una peor aproximación a las distancias reales si la cobertura de los nodos es muy elevada en relación al tamaño de la red (lo que implica una conectividad media alta). Esto se puede entender de la siguiente forma, si se considera un par de nodos muy alejados entre sí y que pueden comunicarse, éstos tendrán una unión directa en el grafo asociado,  $G$ , y por tanto el mismo valor de conectividad que aquéllos que se encuentran más cerca, es decir, 1. De hecho, si se considera un rango tal que la conectividad sea máxima (99 para una red de 100 nodos, lo que indica que cada nodo de la red tiene conexión directa con el resto de nodos), el error con MDS-MAP(C) se dispara a  $7.98r$ . Con una conectividad menor, a ese mismo par de nodos alejados se le asignaría una distancia proporcional al número de saltos (*hops*), es decir, el número menor de nodos (camino más corto) necesario para comunicar uno con otro, por lo que la aproximación a distancias euclídeas mejora, y más aún si la distribución es en forma de *grid*, (Shang et al., 2003). No obstante, esto solo ocurre para algoritmos que utilizan solamente la conectividad como información de entrada (MDS-MAP(C)). Este resultado no queda claro en los trabajos realizados por Shang, pioneros en aplicar técnicas MDS a localización (Shang & Ruml, 2004; Shang et al., 2004, 2003). Cuando se modifica la conectividad de la WSN (aumentando la cobertura o alcance de los nodos), en estos trabajos se utiliza como medida del error el  $err(\%R)$ , que normaliza el error respecto al rango de comunicación,  $R$ , expresándose

en tanto por ciento. Esto implica que un  $err(\%R)$  del 50% equivale a un error del 50% del rango de lectura de los nodos, lo que puede dar lugar a confusión, ya que a igual valor de  $err(\%R)$ , para una mayor conectividad (y por tanto mayor rango de lectura, considerando una misma WSN), el error absoluto es mayor. Por tanto, lo que en una representación gráfica puede aparecer como una constante, en función de  $err(\%R)$ , no lo es en términos de error absoluto. Por este motivo, en `wsnLocalize` se incluyen otros parámetros de medida del error del posicionamiento, como el error medio absoluto, o el error medio normalizado por nodo,  $Err$  (ver Tabla 4.4).

Por otra parte, cuando se conocen las distancias (lo que implica que los nodos tienen la capacidad de realizar medidas del tipo TOA, RSSI, o AOA), conforme aumenta la conectividad, el error medio tiende a disminuir, aunque para una distribución de tipo *grid*, a partir de aproximadamente  $C = 15$ , la disminución del error es casi nula, tal y como se muestra en la Figura 4.6. También se observa que el rendimiento de ARAP y ARAP-Ref es prácticamente idéntico, al igual que afirman sus autores (Zhang et al., 2010). Ya que la etapa de refinado prácticamente no tiene efecto en la mejora de la estima de las posiciones, y sí consume un tiempo de computación, en los siguientes ejemplos sólo se considera ARAP.

Finalmente, en la Figura 4.7 se muestran los resultados de simulación de la misma WSN, pero modificando el número de nodos *anchor* en cada iteración. Es decir, por ejemplo, para MDS-MAP(C) con 5 nodos *anchors* se han realizado 40 iteraciones, eligiéndose en cada una de dichas iteraciones 5 nodos *anchor* de forma aleatoria. El mismo procedimiento se ha realizado para los otros algoritmos. Como se observa en la figura, un aumento de los nodos mejora ligeramente la estimación de las posiciones, aunque esta mejora es menos acusada del paso de 5 a 10 nodos *anchor* que de 3 a 5. Similares resultados se obtienen en (Shang & Ruml, 2004; Shang et al., 2004).

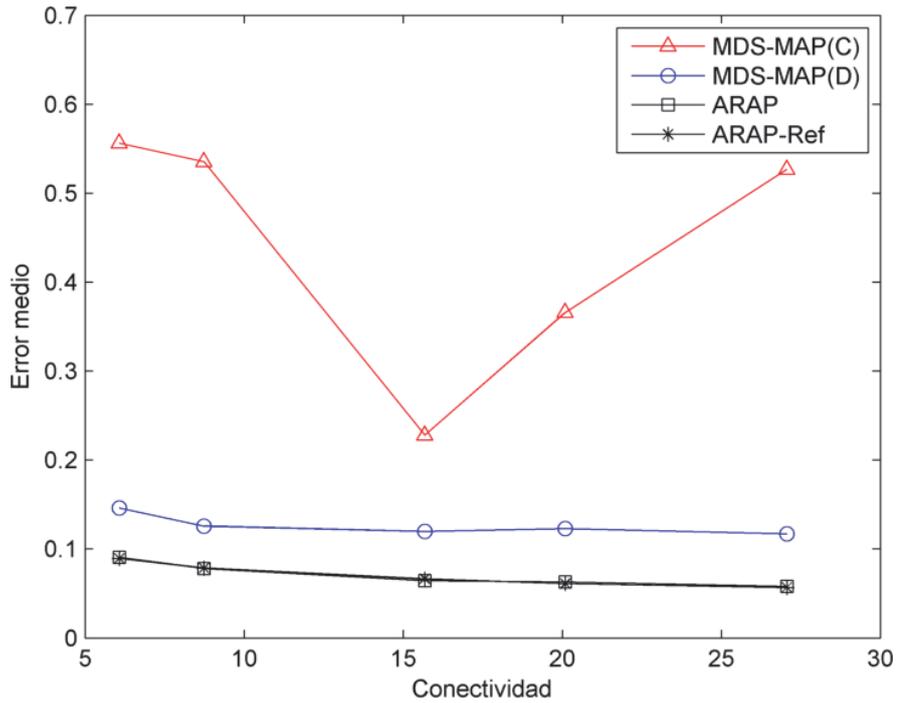


Figura 4.6. Error medio según la conectividad media de la WSN y el algoritmo empleado,  $e_r = 5\%$ ,  $m = 3$   
 Nota: Error medio expresado en unidades  $r$  (por ejemplo, en metros)

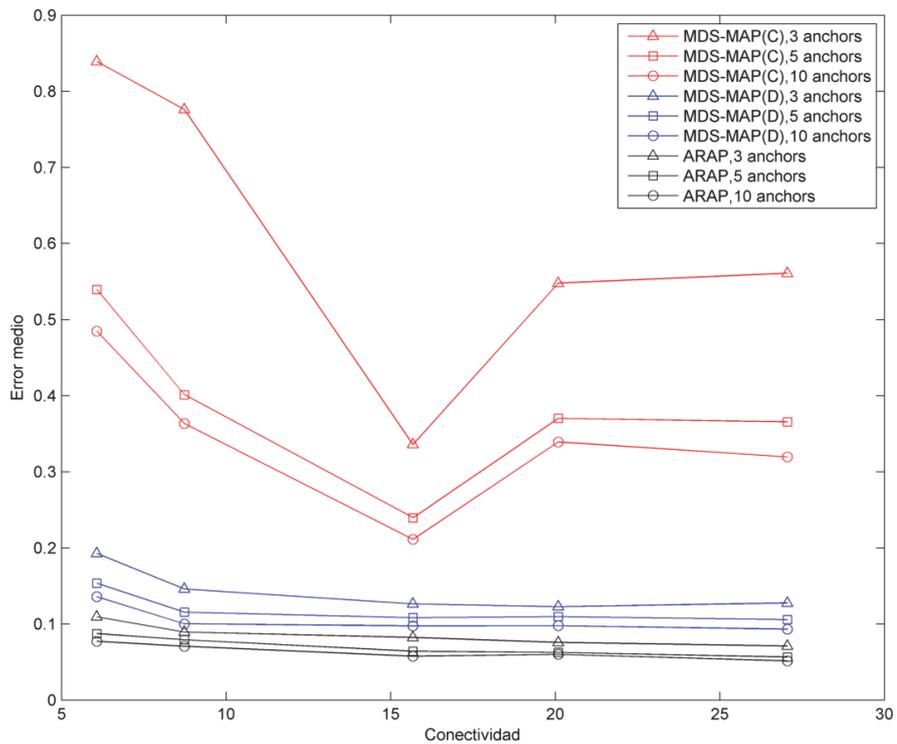


Figura 4.7. Error medio en función del número de nodos *anchor*

### 4.5.2 Distribución de nodos aleatoria

En el siguiente ejemplo, se distribuyen 200 nodos de forma aleatoria en una región de  $10r \cdot 10r$ , mostrada en la Figura 4.8. Para no extender demasiado este apartado, en el apéndice II se incluyen algunos de los informes estadísticos que es posible generar con wsnLocalize. Se muestran aquí los rendimientos de los algoritmos MDS-MAP(D) y ARAP cuando las medidas de distancias están perturbadas con ruido gaussiano del 2, 5, 10, 15 y 20%. Se suponen además cuatro nodos *anchor* y un rango en los nodos de  $R = 1.2r$ , dando lugar a una conectividad  $C = 7.98$ .

En este ejemplo se pone de manifiesto el efecto que tiene la fiabilidad de los datos de entrada (medidas de distancias) en la precisión final de las posiciones de los nodos.

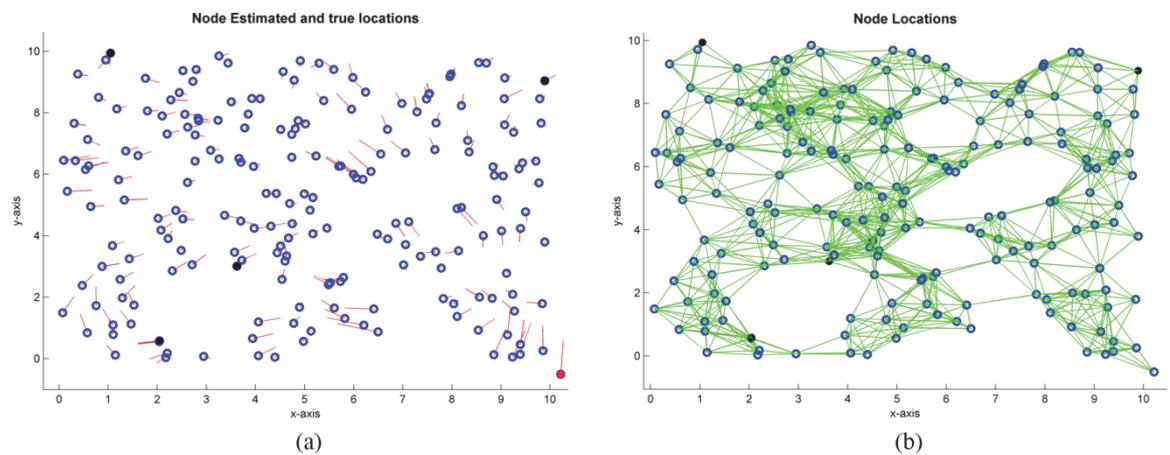


Figura 4.8. 200 nodos distribuidos de forma aleatoria. (a) Posiciones reales de los nodos (○) y error respecto a las posiciones estimadas (—), (b) Posiciones verdaderas de los nodos y grafo asociado a la WSN.  $R = 1.5r$ .

#### 4.5.2.1 Resultados

La Figura 4.9 muestra, en el eje de ordenadas, la evolución del error medio (medido en unidades relativas, que como en ejemplos anteriores se pueden suponer metros) conforme aumenta el ruido en las distancias de entrada (eje de abcisas). Para la WSN estudiada, se puede observar que MDS-MAP(D) sólo aumenta ligeramente el error medio obtenido y también su desviación típica. Sin embargo, no sucede lo mismo con ARAP, que si bien mantiene el error medio por debajo del obtenido con MDS-MAP(D), a partir de  $e_r > 15\%$  sufre una degradación importante, llegándose a obtener un mayor error medio que el obtenido con MDS-MAP(D), para  $e_r = 20\%$ . Además, a partir de un ruido  $e_r = 10\%$ , la desviación típica del error medio en las iteraciones realizadas aumenta considerablemente. Es importante destacar que las barras verticales de la

Figura 4.9 indican la desviación típica del error medio, y no la media de las desviaciones típicas de los errores obtenidos en cada iteración (parámetro StdError en los informes estadísticos mostrados en el apéndice II). Es decir, de cada iteración realizada, se obtiene un error medio, y a partir de todos estos errores medios, se obtiene su desviación típica. De este modo se mide la variación del error entre iteraciones, lo que proporciona un parámetro de la sensibilidad del algoritmo frente al ruido.

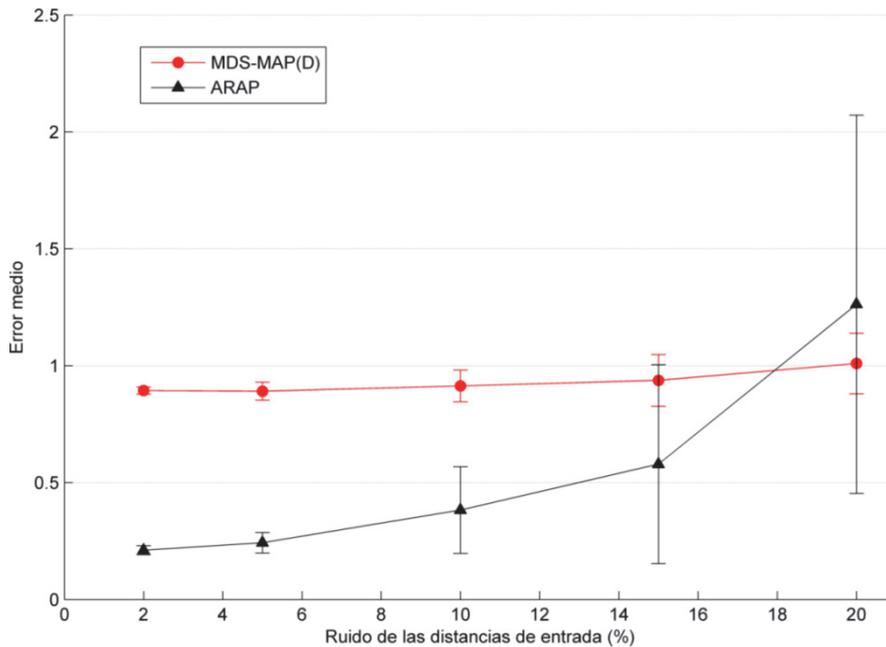


Figura 4.9. Evolución del error medio con el aumento de ruido en las distancias de entrada. Las barras verticales indican la suma y diferencia de la desviación típica del error medio.

#### 4.5.2.2 Interpretación de los resultados

Para la disposición de nodos *anchor* y la WSN considerada, mostrada en la Figura 4.8 (en este caso con un valor de  $R = 1.5r$ ), los resultados estadísticos obtenidos por simulación indican que MDS-MAP(D) tiene un comportamiento similar aunque el ruido de las distancias aumente. ARAP, si bien produce unos resultados considerablemente mejores que MDS-MAP(D) para distancias estimadas con  $e_r < 10\%$ , degrada su rendimiento de forma notable cuando el ruido sobrepasa este valor. Dicho de otro modo, cuando la fiabilidad de la matriz de distancias estimadas,  $\tilde{D}$ , no es buena, la solución analítica de MDS-MAP(D) proporciona mejores resultados que ARAP para la disposición aleatoria de la WSN considerada. Además, como ya se dijo, ARAP requiere de mayor tiempo de computación.

Por otra parte, la Figura 4.8 muestra el caso específico de  $e_r = 10\%$ ,  $R = 1.5r$ , dando lugar a una conectividad  $C = 12.09$ , y donde se muestra el posicionamiento en una de las iteraciones utilizando el algoritmo MDS-MAP(D). Para este último caso ( $R = 1.5r$ ), la estimación de las posiciones mejora respecto al caso anterior  $R = 1.2r$ . Esto es lógico, ya que el aumento de la conectividad permite que las distancias inferidas se aproximen más a las distancias verdaderas (euclídeas).

En la Tabla 4.5 se muestran los datos estadísticos obtenidos con wsnLocalize y MDS-MAP(D) con diferentes niveles de ruido. Como se observa, el aumento de rango de los nodos hace que el error medio disminuya al menos a la mitad, y los errores máximos se reducen al menos a la tercera parte.

Tabla 4.5. Datos estadísticos obtenidos con diferentes niveles de ruido. MDS-MAP(D).

R	$e_r$	C	Err(%R)	Max. Error	Media Error	Std(Error)	Err	Stress-1	Stress-t	Stress $\bar{D}$
1.2	2	7.98	74.4760	3.5111	0.8937	0.6045	0.0683	0.1434	0.1217	1.1725
1.2	5	7.98	74.2523	3.5053	0.8910	0.6002	0.0681	0.1381	0.1233	1.0728
1.2	10	7.98	76.1126	3.5181	0.9134	0.6116	0.0698	0.1342	0.1300	0.8996
1.2	15	7.98	78.1152	3.5794	0.9374	0.6290	0.0716	0.1383	0.1373	0.7591
1.2	20	7.98	84.1155	3.7922	1.0094	0.6806	0.0771	0.1615	0.1519	0.7544
1.5	2	12.09	20.1486	1.0665	0.3022	0.1861	0.0217	0.0642	0.0479	0.1884
1.5	5	12.09	21.0064	1.0631	0.3151	0.1871	0.0227	0.0563	0.0511	0.1460
1.5	15	12.09	28.7786	1.3252	0.4317	0.2395	0.0311	0.1062	0.0711	0.2849
1.5	20	12.09	34.4011	1.6036	0.5160	0.2885	0.0371	0.1691	0.0862	0.7217

Los resultados obtenidos en este ejemplo concuerdan parcialmente con los obtenidos en otros trabajos (Shang & Ruml, 2004; Shang et al., 2003; Zhang et al., 2010).

En redes distribuidas en forma de *grid*, los algoritmos MDS proporcionan posiciones más precisas que cuando la WSN se distribuye de forma aleatoria. Este resultado también se observa si se comparan los resultados de la Tabla 4.5 con los de la Tabla 4.4, donde se comprueban errores máximos, medios y normalizados de mayor magnitud en la distribución aleatoria de nodos respecto a la distribución en *grid*. Lo mismo ocurre, como es de esperar, con la funciones  $Stress_1$  y  $Stress_t$ . Es decir, para iguales condiciones de conectividad y ruido, la estructura de la red en *grid* proporciona resultados de localización más precisos, independientemente del algoritmo empleado.

Por otra parte, el rendimiento de ARAP se presupone superior a los algoritmos MDS-MAP(D) en (Zhang et al., 2010). Sin embargo, en dicho trabajo se incluye un

ruido gaussiano a las distancias de hasta el 10%. Observando la Figura 4.9, el error medio obtenido con ARAP es menor que con MDS-MAP(D) con dicho valor de ruido. Sin embargo, conforme  $e_r$  aumenta, ARAP pierde robustez y se hace más sensible al ruido en las distancias, hasta tal punto que el error medio obtenido es mayor que el resultante al aplicar MDS-MAP(D). Esto ocurre a partir de aproximadamente  $e_r = 18 \%$ .

Resultados similares se han podido comprobar en una red de 50 nodos de tipo *grid*, con cinco nodos *anchor*,  $e_r = 20 \%$ ,  $R = 2$  y  $C = 8.4$ . Para este caso, tanto el error máximo, el error medio y su desviación típica, promediadas en 40 iteraciones, son mayores en ARAP que MDS-MAP(D). Sin embargo, en esta última WSN, si  $e_r = 10 \%$ , ARAP es más preciso que MDS-MAP(D). Por tanto, parece que el comportamiento de ARAP se degrada más que MDS-MAP(D) cuando la distancia contiene un error de tipo gaussiano superior al 20%. Esto puede deberse a que este algoritmo se basa en la búsqueda de triángulos y “regiones de referencia” (*reference patches*) entre los nodos de la red. A partir transformaciones rígidas de los mismos, estas regiones de referencia se unen entre sí y forman la estructura (posiciones de los nodos) de la WSN. Es posible que si los triángulos formados contienen errores elevados en las distancias de sus lados, la unión entre ellos mediante transformaciones rígidas no represente adecuadamente las posiciones verdaderas de los nodos. Por otro lado, en (Zhang et al., 2010), donde se evalúa ARAP, el mapa absoluto se realiza suponiendo que todos los nodos son *anchor*, y, como se ha dicho anteriormente, la comparación de ARAP con otros algoritmos se realiza con ruido de no más del 10%, donde el rendimiento de ARAP sí es mejor que el de MDS-MAP(D). En un caso real, los errores de distancias pueden ser perfectamente mayores del 10%, especialmente en redes basadas en RSSI con baja conectividad que no están diseñadas para posicionamiento. El hecho de suponer todos los nodos como *anchor* en la transformación al mapa absoluto es útil para conocer el grado o capacidad de conservación de las distancias obtenidas por el algoritmo, pero no representa una situación real. En este ejemplo no se realiza esta suposición, y se han supuesto, como se dijo, cuatro nodos *anchor*.

Como conclusión principal de este ejemplo, se ha comprobado, como era de esperar, que el ruido en las distancias medidas afecta a la bondad de las soluciones proporcionadas por los algoritmos de posicionamiento. Sin embargo, para niveles

elevados de ruido ( $e_r \geq 20\%$ ), MDS-MAP(D), un algoritmo a priori más sencillo y de menor coste computacional que ARAP, presenta mejores resultados.

También hay que considerar que ARAP es un algoritmo distribuido, aunque requiere al menos que cada nodo se pueda comunicar de forma directa con otros dos, de lo contrario el algoritmo no puede ejecutarse. MDS-MAP(D), por el contrario, es centralizado, aunque existe una versión distribuida que, según sus autores, proporciona mejores resultados, aunque solo se analiza para niveles de ruido del 5% en (Shang & Ruml, 2004). Sería por tanto interesante implementar la versión distribuida de MDS-MAP(D) con *wsnLocalize*, y estudiar también su rendimiento para niveles elevados de ruido.

### 4.5.3 Especificaciones particulares de los nodos

Los dos ejemplos anteriores consideran un entorno de propagación constante y unas características de los nodos iguales. Además, se supone un modelo de disco (*disk graph model*) de la WSN, típicamente utilizado en el modelado de redes de sensores, y en el cual se considera que un par de nodos sólo pueden comunicarse entre sí cuando su distancia euclídea es menor que un valor definido,  $d$ . Aunque la idea de mantener un modelo de red lo más sencillo posible es interesante, si no se consideran ciertas restricciones, como el hecho de que varios nodos no puedan comunicarse entre sí aunque su distancia sea menor que  $d$ , los índices de desempeño del algoritmo de posicionamiento proporcionados por la simulación pueden no ser realistas. Incluso considerando estas restricciones, puede ocurrir que en determinadas ocasiones los nodos no puedan comunicarse por otra causa, por ejemplo, por algún fallo, por interferencias en el entorno, etc. Este es una de las líneas consideradas en *wsnLocalize*, siendo posible asignar diferentes probabilidades de fallo para cada uno de los nodos en la red, además de especificar aquellos pares de nodos que, por la situación que sea, no pueden comunicarse. Esta última situación se puede dar en caso de situaciones NLOS, donde existe una interposición de materiales metálicos que impiden la comunicación.

La Figura 4.10 se muestra un ejemplo sencillo, con 25 nodos *anchor* y 7 nodos cuyas posiciones son desconocidas. Esta situación podría asimilarse a un entorno controlado, donde existe un conjunto de nodos cuyas posiciones son conocidas y además poseen capacidades superiores de comunicación.

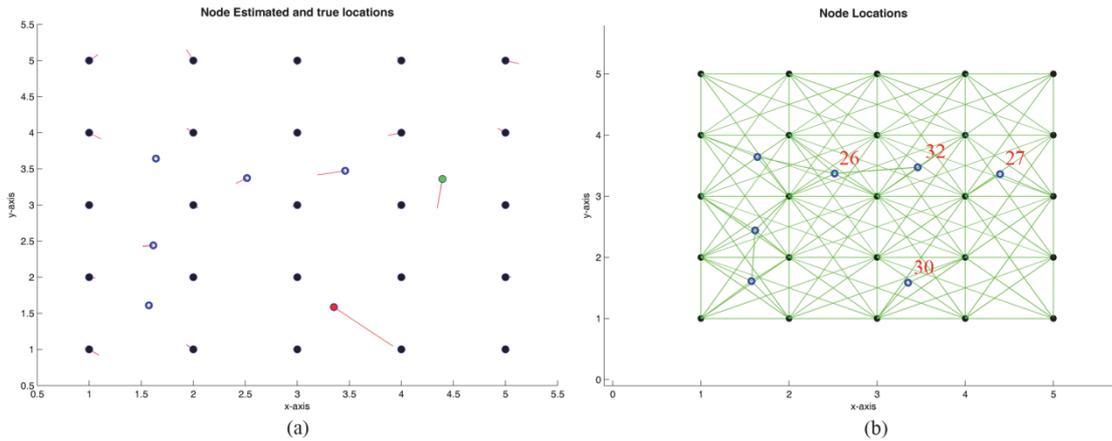


Figura 4.10. Grid de 25 nodos *anchor*, 7 nodos a localizar. (a) Posicionamiento final en alguna de las iteraciones, (b) Posición inicial de la WSN.

#### 4.5.3.1 Resultados

La Tabla 4.6 muestra los resultados de simulación tras 40 iteraciones, considerando dos casos. En el primero de ellos se supone un rango  $R = 2.5r$  para todos los nodos, y un ruido en las distancias medidas  $e_r = 5\%$ . Sin embargo, los nodos a localizar podrían tener características diferentes, por ejemplo, un menor rango de lectura, por tratarse de dispositivos de tamaño menor con características de portabilidad para localizar operarios en entornos peligrosos. Además, es posible, como se ha dicho anteriormente, que el entorno no sea uniforme, por lo que podría existir una cierta probabilidad de fallo dependiendo de dónde se encuentre posicionado el operario. Estas nuevas características se consideran en un segundo caso, denominado “no uniforme”, donde los nodos a localizar tienen un rango  $R_p = 1\text{ m}$  (en este caso se considera explícitamente unidades de metro), y además se consideran unas probabilidades de fallo de 0.1, 0.5, 0.2 y 0.3 para los nodos de la Figura 4.10 etiquetados con los números 27, 30, 32 y 26; y un ruido en la lectura de distancias  $e_r = 10\%$ , respectivamente.

Tabla 4.6. Comparación caso uniforme y no uniforme. MDS-MAP(D)

Caso	C	Max. Error	Media Error	Err	Stress-t	Stress $\tilde{D}$
Uniforme	17	0.1467	0.0590	0.0104	0.0248	0.0093
No uniforme	11.1250	0.7124	0.1015	0.0179	0.0617	0.0546

Otra de las posibilidades que se ha implementado en wsnLocalize es la capacidad de calcular el límite CRLB. Por ejemplo, se puede suponer que la WSN está formada por nodos que calculan distancias mediante técnicas basadas en TOA, y que las distancias medidas están perturbadas por un ruido gaussiano. Si se considera que el ruido

introduce una desviación típica de 0.5 m, se obtiene una desviación media de 0.2308 metros. La desviación típica media del CRLB se ha calculado promediando las varianzas de localización obtenidas de las estimaciones de los nodos *blind*, y posteriormente realizando la raíz cuadrada, esto es, el valor cuadrático medio. En este caso, además se ha supuesto un rango de lectura en todos los nodos de  $R = 2.5$  m. Mediante simulaciones de Monte Carlo y ejecutando el algoritmo MDS-MAP(D), con las mismas características de la red, se obtiene una desviación típica media en los nodos a localizar de 0.5449 metros, además de que el valor esperado para la estimación de cada nodo no coincide con las posiciones verdaderas éstos. En la Figura 4.11 se muestran las elipses de incertidumbre para cada uno de los nodos *blind*, obtenidas por el CRLB (elipses en rojo) y por simulación con MDS-MAP(D) (elipses en azul); ambas calculadas para un intervalo de  $1 - \sigma$ , siendo  $\sigma$  la desviación típica obtenida en la localización para cada nodo *blind* en particular. Las líneas rojas muestran el posicionamiento de los nodos en una de las iteraciones de la simulación, de las cuales sólo interesan las de los nodos *blind*, ya que las posiciones de los nodos *anchor* se conocen, aunque MDS-MAP realice un ajuste considerando todos los nodos de la red. El promediado de las estimaciones de los nodos *blind* se ha representado mediante asteriscos de color azul.

Por último, cabe comentar que el valor de la desviación típica media correspondiente al CRLB, cuando la conectividad es máxima, (caso ideal, donde todos los nodos pueden medir distancias entre sí) es de 0.1843 metros.

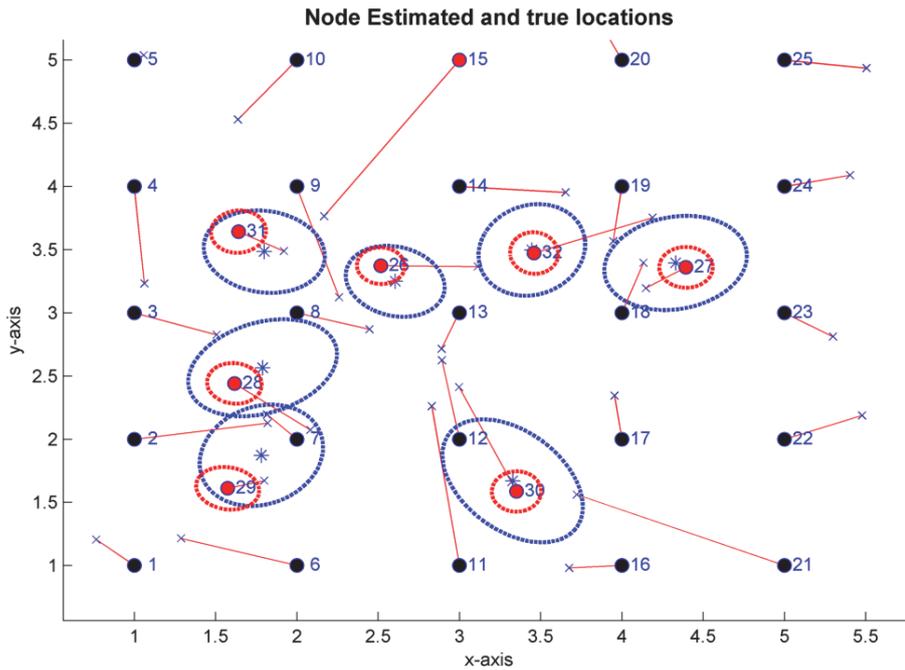


Figura 4.11. Elipses de incertidumbre ( $1 - \sigma$ ), por simulación (---) y límite CRLB-TOA (---).  
 $R = 1.5m, std(TOA) = 0.5m$

#### 4.5.3.2 Interpretación de los resultados

Como se puede comprobar con los resultados obtenidos en este ejemplo, el simple hecho de considerar las características particulares de nodos y conectividad en una WSN influye en la precisión del posicionamiento de los nodos. Esto es lógico, ya que las probabilidades de fallo hacen que las distancias inferidas se degraden respecto a las verdaderas, como se observa además en la función  $Stress_{\bar{D}}$  de la Tabla 4.6. Considerando estas características, los valores estadísticos obtenidos con wsnLocalize muestran, para el caso particular de la WSN considerada, un error máximo promedio cinco veces mayor para el caso no uniforme, y un error medio de aproximadamente el doble.

Por otra parte, los resultados obtenidos mediante los límites del CRLB, en comparación con la desviación típica media obtenida mediante simulación, utilizando MDS-MAP(D), muestran que una mejor estima es posible, considerando las características de la WSN considerada. Cabe precisar también que, aunque se ha considerado la cota CRLB incluyendo un límite de conectividad en los nodos, y no conectividad completa como en otros trabajos, una de las futuras líneas de investigación consiste en implementar y realizar un estudio pormenorizado de la cota CRLB, teniendo

en cuenta los parámetros particulares (probabilidades de fallo y conectividades específicas entre nodos) de la red.

## 4.6 CONCLUSIONES

En este capítulo se ha presentado *wsnLocalize*, una herramienta interactiva desarrollada para modelar las características de conectividad de una WSN, y evaluar el rendimiento de diferentes algoritmos de localización cooperativa. En primer lugar, se ha formalizado el problema de la localización en redes, particularizado para el caso bidimensional. La solución de este problema es una estimación de las coordenadas de los nodos de la WSN que, a priori, son desconocidas. Para su resolución, los algoritmos de localización cooperativa utilizan como entradas algún tipo de medida con la que sea posible estimar las distancias entre pares de nodos que forman la WSN. Para la medida de las distancias existen diferentes técnicas, principalmente las basadas en AOA, TOA y RSSI. Con respecto a TOA y RSSI, se han presentado algunos modelos de propagación sencillos, y respaldados empíricamente en varios estudios similares al abordado en esta tesis. Se ha incidido en los modelos RSSI y TOA principalmente por dos causas: la primera es que la mayoría de los dispositivos *wireless* de bajo coste permiten el acceso a medidas RSSI, la cual permite estimar distancias. La segunda, es que UWB, una de las tecnologías emergentes y con buenas capacidades para aplicaciones de posicionamiento, se basa en medidas TOA, debido a su alta resolución en tiempo, lo que le permite obtener estimaciones de distancias de alta precisión, en ocasiones con errores del orden del centímetro o menores. Aunque hasta ahora, estas prestaciones no están implementadas en dispositivos comerciales con un coste accesible, se espera que compañías especializadas desarrollen sensores UWB de menor coste y, en un futuro cercano, éstos terminen integrándose en nodos comerciales de gama alta.

Los modelos de estimación de distancias basados en TOA, RSSI, y AOA, sirven de base para la localización específica de un nodo particular, o solo *ranging* (medida de distancia respecto a uno o varios nodos), lo que también es interesante respecto a la aplicación desarrollada en el capítulo 2 de la tesis, y constituye una posible línea de trabajo futuro.

Por otra parte, el hecho de que el capítulo se haya centrado en el estudio de algoritmos de localización cooperativa se debe, principalmente, a su capacidad

colaborativa (las medidas de distancias entre nodos cuyas posiciones absolutas son desconocidas aportan información relevante para su posicionamiento), lo que no impide estudiar los resultados en la localización de un nodo en particular. Además, si se consideran aplicaciones en las que un sistema de posicionamiento pueda incrementar la seguridad de los trabajadores, la posibilidad de conocer las posiciones relativas entre los mismos también es interesante. La construcción de un mapa relativo es una de las posibilidades que ofrecen ciertos algoritmos de localización cooperativa, que permiten obtener este tipo de información sin la necesidad de conocer las coordenadas absolutas de ningún nodo de la WSN, esto es, sin que tengan que existir nodos *anchor*.

Por estas razones, la segunda parte de este capítulo se ha centrado en los algoritmos de localización cooperativa. Concretamente, se han considerado los algoritmos basados en MDS, que permiten obtener una solución analítica mediante descomposición de valores singulares (SVD), y que proporciona buenos resultados cuando las distancias entre pares de nodos son conocidas con una precisión aceptable. En *wsnLocalize* se ha implementado MDS-MAP(C), basado exclusivamente en la conectividad de la red, y MDS-MAP(D), basado en la medida de distancias. También se ha considerado otro algoritmo más complejo, que basa la reconstrucción de las posiciones de los nodos a partir de transformaciones rígidas de mapas locales, construidos mediante triángulos formados por las distancias conocidas entre nodos. Este algoritmo se denomina ARAP, y también se basa en la medida de distancias entre pares de nodos. Se han mencionado también algunos enfoques probabilísticos que buscan la reconstrucción precisa de las distancias no conocidas entre nodos.

Con *wsnLocalize* se ha pretendido diseñar una herramienta de *benchmark* para algoritmos de posicionamiento. Es posible generar informes estadísticos a partir de simulaciones Monte Carlo, lo que permite cuantificar el rendimiento de los algoritmos de localización comentados, además de otros potencialmente implementables. *WsnLocalize* permite modelar las principales características (como son rango de comunicación y la precisión en la estima de distancias) de los nodos que forman la WSN, y modificarlas de forma interactiva. En las simulaciones realizadas, se ha podido comprobar que la fiabilidad en la estimación de la matriz de distancias es decisiva en el grado de desempeño de los algoritmos, como era de esperar. Precisamente por esto, la capacidad de modelar las características de conectividad de la red son determinantes

para una correcta evaluación de la precisión máxima alcanzable, siendo este punto una de las contribuciones interesantes de *wsnLocalize*, donde no solo se considera el modelo ideal de disco de una WSN, sino que es posible particularizar las características del grafo de conectividad asociado, definiendo las características de la red nodo a nodo. Se han adaptado a la herramienta los límites de CRLB para RSSI y TOA, que permiten establecer una cota inferior de los límites de precisión alcanzables, dada la estructura de una WSN específica, y un conjunto de nodos *anchor*. Se han implementado diferentes funciones de coste y cálculo de parámetros que permiten cuantificar el rendimiento de los algoritmos (valores máximos, medios, desviaciones típicas, errores de posicionamiento de un nodo en específico, etc). Por último, se han mostrado un conjunto de ejemplos con diferentes topologías de WSNs, y se han comparado los resultados obtenidos con otros trabajos que también evalúan el tipo de algoritmos aquí considerados. Las conclusiones obtenidas han sido similares y ya comentadas en los apartados correspondientes. Sin embargo, cabe destacar que las simulaciones realizadas muestran que, cuando los datos de entrada contienen ruido elevado en la medida, a partir de cierto valor (concretamente para  $e_r \geq 20\%$ ), el algoritmo ARAP pierde robustez e incluso presenta errores medios en el posicionamiento mayores que MDS-MAP(D).

La implementación de más algoritmos existentes en la literatura, y la consideración de modelos de propagación más complejos, son las líneas futuras de trabajo a desarrollar con la herramienta.

Desde el punto de vista de la seguridad industrial, la implementación de un sistema de posicionamiento puede disminuir el tiempo en operaciones de rescate, habilitar el disparo de alertas o acciones de prevención automatizadas si se detecta la presencia de operarios en zonas de peligro, o detectar la presencia cercana de trabajadores a maquinaria peligrosas en funcionamiento. Estas aplicaciones, junto con las comentadas en el capítulo 3, ponen de manifiesto que el uso de la radiofrecuencia en entornos industriales podría incrementar la seguridad de los trabajadores. De hecho, ya existen desarrollos e investigaciones realizadas en este ámbito, pero el incremento en prestaciones y el avance de nuevas tecnologías como UWB, con mayores capacidades de precisión en la medida de distancias, además el abaratamiento de equipos portátiles (motas), fomentará sin duda la aparición de aplicaciones innovadoras en este campo. Sin

embargo, no deben perderse de vista las posibles perturbaciones que pueden afectar y degradar el grado de desempeño de una aplicación en concreto. Un diseño robusto, e incluso el empleo de sistemas redundantes en aplicaciones críticas deben tenerse en cuenta, especialmente en el campo de la seguridad. Por ello, si se va a diseñar una WSN para posicionamiento y aplicaciones de seguridad, es necesario evaluar las prestaciones reales que puede ofrecer, según el tipo de entorno y el tipo de nodos. WsnLocalize se ha diseñado intentando cubrir esta necesidad y pretendiendo facilitar esta tarea, permitiendo a los diseñadores crear la estructura de red deseada de forma sencilla y, a partir de esta configuración, conocer mediante simulaciones las características necesarias de los nodos que garanticen un rendimiento mínimo y suficiente, en lo que a error de posicionamiento se refiere, y dado un algoritmo de localización específico.

---

## Chapter 5: Conclusions and future work

---

This chapter summarizes the main contributions and results obtained in this doctoral dissertation. In addition, the work developed in this thesis cannot be thought as concluded, especially if we consider the extent of the topics treated. The possible extensions and future research topics that fit in the industrial safety area are also addressed, taking the present work as a basis.

### 5.1 Conclusions

This PhD thesis has been primarily focused on the investigation of radio frequency systems for improving worker safety. Within this scope, three main contributions are provided regarding the current state of the art, with the following main results:

1. Development of an RFID prototype providing industrial safety features in the manufacturing environment:

- A literature review focused on safeguarding methods at the point of operation has been carried out. Situations where standard guards and devices are impractical have been described. To the authors' knowledge, there is no standard protective equipment with the capacity to *distinguish* whether the object entering a dangerous area is a workpiece or the body part of a worker. For this reason, the RFID technology has been analyzed as industrial safety method. An RFID prototype has been designed, with the aim to produce an emergency stop upon

detection of a risky situation, such as the introduction of a worker's hand into a dangerous area. The device is meant to ensure that the accident does not happen, or at least to reduce the probability that it occurs, acting as a safety barrier and a preventive measure.

- A methodology for the design and tuning of inductive coupling antennas for the RFID prototype has been proposed, considering their embedding in industrial machinery. The restrictions of inductive coupling antennas in monitoring dangerous areas have been identified. Regarding rectangular antennas, it has been checked the existence of limitations regarding the area to cover. As a consequence, the application of the current RFID prototype is restricted to dangerous areas of small size, such as those surrounding press brakes. On the basis of these situations, a set of radio frequency techniques for improved safety have been reviewed and referenced for future research.

2. A robotic testing approach for testing radio frequency devices designed for industrial safety.

- A robotic experimental setup has been presented based on the ABB IRB 2400L robot. At the time of writing this thesis, no standards specific to radio frequency presence devices were found<sup>1</sup>. This setup was designed to cover this existing gap, i.e., for the analysis of safety systems that use radio frequency technology. Through this configuration, it is possible to emulate some tasks carried out by workers in or near specific areas that pose particular risks for them, such as an increased likelihood of gashing hands or losing fingers. A human arm and its motion towards a dangerous area were simulated. The setup permits simulation of different positions and velocities, which can be used to validate safety devices according to regulations. Thus, by means of the proposed experimental setup, it is possible to establish some tests to analyze the performance of security devices that carry out prevention functions.
- A matrix approach has been proposed for analyzing the robustness of safety devices that are designed to automatically prevent a worker entering in

---

<sup>1</sup> We contacted the OSHA and they provided confirmation of this statement.

dangerous areas. With this approach, it is possible to distinguish different entry points within a dangerous area, allowing for the collection of independent statistics for each entry point. This is a key requirement for proximity detection systems based on radio frequency technology, because metal parts and different working environments can change the desired shape of the detection zones.

- The RFID prototype has been tested with our robotic approach. The benchmark tests showed that the distances of detection depended on the tag orientation and velocity. The lack of multitag reading and the absence of a method for accurately calibrating a safe distance are the main problems that require further investigation. Nevertheless, the results show the benefits that development of a radio frequency device of this class could confer towards increasing worker safety.

3. The development of an interactive tool designed for testing cooperative localization algorithms.

- An interactive tool, named `wsnLocalize`, designed for the simulation of cooperative localization techniques has been developed. The tool is intended to compare and evaluate such methods, providing researchers and designers a fast way to measure the performance of different localization algorithms, considering specific network topologies. The interactivity provided allows the user to instantaneously see the effects on the localization performance by simply changing a node position, by dragging it to a new one. In the same way, a different set of parameters can be changed, such as the noise added to the distance measurements, the node range or the probability of failure. `WsnLocalize` exploits the Monte Carlo method, allowing the generation of statistical reports for a specific localization algorithm, and a concrete WSN configuration.
- One of the main contributions of `wsnLocalize` is its capacity to consider independent characteristics for each node in the WSN. It allows the avoidance of the typical “disk graph model”, that is usually applied when localization algorithms are tested. It has been shown how adding specific features to the nodes, considering their probability of failure and a particular connectivity

range, among other parameters, affect the performance of localization algorithms.

## **5.2 Future work**

From our perspective, real time positioning systems based on radio frequency can enhance the capabilities in a wide variety of applications. The integration of advanced positioning and sensor communications can be considered an enabling technology for “augmented safety”. Of course, the robustness of the localization system must be taken into account. Parameters such as accuracy of the positioning in different conditions, immunity to multipath fading, power consumption of the sensors, range or latency, are critical application-specific factors to be considered. There are still several unanswered questions raised by this research, both for safeguarding at the point of operation (Chapters 2 and 3) as well as for cooperative localization applications in WSNs (Chapter 4).

Regarding the RFID prototype, it has been demonstrated experimentally that the distance of detection depended on the tag orientation and velocity. For safeguarding at the point of operation with radio frequency devices (which would be done in those situations where standard safety devices are not feasible) it is desirable to consider a distance estimation method, such as those presented in Chapter 4 for RSSI, AOA, or TOA. It is clear that accuracy and robustness are the main desired features for any localization application. In the last few years, some companies have developed radio frequency systems based on UWB positioning technology, claiming accuracies at decimeter level or even less. Due to the claimed ranging capabilities, as well as other features, such as sensor size and connection interface, some of the recent UWB devices are considered as possible candidates to be tested with our robotic approach. Specifically, according to all the reviewed literature, and taking into account the purpose of safeguarding at the point of operation, there are still questions that need to be addressed. For example, most scientific papers discussing UWB devices do not report accuracies when the transmitter is closer than one meter to the receiver, because localization or ranging is usually intended for larger distances. Analyzing the positioning accuracy in closer distances can be of interest, for example, in those

applications where triggering an alarm or event must only occur when the transmitter is very close to the receiver.

On the other hand, radio waves are blocked and reflected by metallic materials, and NLOS situations undoubtedly degrade the distance estimation. A redundant system (i.e., several receivers surrounding the dangerous area) can be a possible setup to increase the robustness of the distance estimates. Motivated by this consideration, the optimal geometric configuration of the receivers that maximize the ranging accuracy is a problem to be addressed. A possible approach is based on the analysis of the corresponding Fisher Information Matrix.

As for the development of *wsnLocalize*, it is desirable to implement more localization algorithms present from the literature, as well as including more complex propagation models. In the same way, the quality of the distance estimates largely determines the performance of cooperative localization algorithms, which are based on pair-wise distance measurements. However, regardless the accuracy of the distance estimates, another interesting topic is the distance matrix reconstruction from incomplete distance information. Reconstruction of Euclidean distance matrices from partial information has been proven (under some assumptions), in principle, feasible. Thus, the implementation of a provable accurate reconstruction method in conjunction with a localization algorithm is also of particular interest.

Another direction of research, in particular for pair-wise measurements, is the development of an application for getting statistics in real time, e.g, RSSI or TOA values, transmitted between a pair of nodes at a specific distance. In this way, the statistical data obtained from a real situation could be used to test localization algorithms, and for modeling a specific WSN in *wsnLocalize*.

In summary, these possible lines of extension and research are identified, taking the work developed in this thesis as a basis:

- Implement more localization algorithms in *wsnLocalize*, as well as including more complex propagation models, such as the IEEE 802.15.4a channel model.
- Develop a generic tool for getting data (RSSI, TOA, etc) in real time from a pair of nodes. Starting from these data, address different statistical approaches (maximum likelihood estimation, Bayesian estimation, hypothesis testing, ROC

curvs, etc) for distance estimation. Particularly important is the implementation of the signal processing in real time, using suitable software, such as Matlab or GNU Radio<sup>2</sup>.

- Address some of the current limitations of the RFID prototype through the application of the aforementioned statistical techniques. Of particular interest is the development of a method for accurately calibrating a safe distance. For example, ROC curves and distance estimation based on MLE could be employed and analyzed to stop industrial machinery if a risky situation is presented, e.g., if a transmitter is closer than a pre-defined safety distance from a set of sensors surrounding the dangerous area.
- Testing, with the robotic setup developed in this thesis, some of the referenced techniques for proximity detection systems based on radio frequency technology.

---

<sup>2</sup> <http://www.gnuradio.org>. GNU Radio is a free-software development toolkit that provides signal processing blocks to implement software radios.

## Bibliografía

- 89/391/EEC, 1989. Council Directive 89/391/EEC of 12 June 1989 on the introduction of measures to encourage improvements in the safety and health of workers at work. European Agency for Safety and Health at Work.
- ABB Robotics AB. Product Manual IRB 2400. ABB Flexible Automation, Västeras, Sweden. Reference number: 3HAC 7626-1/M2000.
- ABB Robotics AB. RAPID Reference Manual. ABB Flexible Automation, Västeras, Sweden. Reference number: 3HAC 0966-50.
- ANSI/IEC 60529, 2004. Degrees of protection provided by enclosures (IP code). International Electrotechnical Commission. American National Standards Institute.
- Borg, I., Groenen, P.J., Mair, P., 2012. Applied Multidimensional Scaling (SpringerBriefs in Statistics). Springer.
- Borg, I., Groenen, P.J.F., 2005. Modern Multidimensional Scaling: Theory and Applications (Springer Series in Statistics). Springer.
- Buja, A., Swayne, D.F., Littman, M.L., Dean, N., Hofmann, H., Chen, L., 2008. Data visualization with multidimensional scaling. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 17(2), 444–472.
- Burlet-Vienney, Jocelyn S., Daigle R., Massé S., 2010. Safeguarding of hydraulic power press brakes. [WWW Document]. URL <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/RF-651.pdf> (accessed 18.11.11).
- Chae, S., Yoshida, T., 2010. Application of RFID technology to prevention of collision accident with heavy equipment. *Automation in Construction*, 19(3), 368–374.
- Cheng, T., Venugopal, M., Teizer, J., Vela, P.A., 2011. Performance evaluation of ultra wideband technology for construction resource location tracking in harsh environments. *Automation in Construction*, 20(8), 1173–1184.

- Dardari, D., Conti, A., Ferner, U., Giorgetti, A., Win, M.Z., 2009. Ranging with ultrawide bandwidth signals in multipath environments. *Proceedings of the IEEE*, 97(2), 404–425.
- Decawave, 2013. Decawave website. [WWW Document]. URL <http://www.decawave.com> (accessed 5.5.13).
- Drineas, P., Javed, A., Magdon-Ismail, M., Pandurangan, G., Virrankoski, R., Savvides, A., 2007. Distance matrix reconstruction from incomplete distance information for sensor network localization, in: 2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, Secon 2006. Reston, VA, pp. 536–544.
- EC, 2006. Directive 2006/42/EC of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 on machinery, and amending Directive 95/16/EC (recast).
- Ekahau, 2013. Ekahau [WWW Document]. URL <http://www.ekahau.com> (accessed 2.8.11).
- Fairchild Semiconductor, 2002. KA78XX/KA78XXA 3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator.
- Finkenzeller, K., 2003. Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification. John Wiley & Sons.
- Gezici, S., Tian, Z., Giannakis, G.B., Kobayashi, H., Molisch, A.F., Poor, H. V., Sahinoglu, Z., 2005. Localization via ultra-wideband radios: A look at positioning aspects of future sensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 22(4), 70–84.
- Glover, B., Bhatt, H., 2006. RFID Essentials (Theory in Practice (O'Reilly)). O'Reilly Media.
- Hamelund, C., 2007. Machine Safeguarding at the Point of Operation, A Guide for Finding Solutions to Machine Hazards. Reference Number: 440-2980 (9/10). [WWW Document]. URL <http://www.oroSHA.org/pdf/pubs/2980.pdf> (accessed 18.11.11).
- IEC 61508, 1998. Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems, Part 4: Definitions and Abbreviations. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- IEEE 802.15.4, 2006. IEEE Std 802.15.4-2006. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY). Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs).
- Ilie-Zudor, E., Kemény, Z., Van Blommestein, F., Monostori, L., Van Der Meulen, A., 2011. A survey of applications and requirements of unique identification systems and RFID techniques. *Computers in Industry*, 62(3), 227–252.

- INSHT, 1995. LEY 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales. BOE n<sup>o</sup> 269 10- 11-1995.
- ISO/IEC 10536-1:2000, 2000. Identification cards -- Contactless integrated circuit(s) cards -- Close-coupled cards -- Part 1: Physical characteristics.
- Kay, S., 1993. Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume I: Estimation Theory (v. 1). Prentice Hall.
- Kim, K., Kim, M., 2012. RFID-based location-sensing system for safety management. *Personal and Ubiquitous Computing*, 16(3), 235–243.
- Ko, C.H., 2010. RFID 3D location sensing algorithms. *Automation in Construction*, 19(5), 588–595.
- Lee, D., 2005. Localization using Multidimensional Scaling (LMDS). Dissertation. University of California, Berkeley.
- Lee, J.-Y., Scholtz, R.A., 2002. Ranging in a dense multipath environment using an UWB radio link. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20(9), 1677–1683.
- Leveson, N., 1995. Safeware: System Safety and Computers, Safeware: System Safety and Computers. Addison-Wesley.
- Li, J., Carr, J., Jobes, C., 2012. A shell-based magnetic field model for magnetic proximity detection systems. *Safety Science*, 50(3), 463–471.
- Libelium, 2013. Libelium [WWW Document]. URL [www.libelium.com](http://www.libelium.com) (accessed 31.5.13).
- Mahfouz, M.R., Zhang, C., Merkl, B.C., Kuhn, M.J., Fathy, A.E., 2008. Investigation of high-accuracy indoor 3-D positioning using UWB technology. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 56(6), 1316–1330.
- Manis, B., Sharam, M., 2005. RFID Field Guide: Deploying Radio Frequency Identification. Prentice-Hall.
- Merkl, B.C., 2008. The future of the operating room: surgical preplanning and navigation using high-accuracy ultra-wideband positioning and advanced bone measurement. University of Tennessee, Knoxville, USA.
- Microchip Technology, 2001. Getting started – USART.
- Microchip Technology, 2003. Antenna Circuit Design for RFID Applications. Literature Number: DS00710C.

- Microchip Technology, 2006. Microchip. PIC16F627A/628A/648A. Data Sheet, Flash-Based, 8-bit CMOS Microcontrollers with nano Watt Technology. Reference number: DS40044E.
- Niculescu, D., Nath, B., 2003. Ad hoc positioning system (APS) using AOA, in: Proceedings - IEEE INFOCOM. pp. 1734–1743.
- OSHA, 1987. The Limitations of Radiofrequency Presence Sensing Devices. OSHA Hazard Information Bulletins [WWW Document]. URL [www.osha.gov/dts/hib/hib\\_data/hib19870921.html](http://www.osha.gov/dts/hib/hib_data/hib19870921.html) (accessed 1.12.11).
- OSHA, 1997. Guidelines for Point of Operation Guarding of Power Press Brakes. CPL 02-01-025. OSHA Directorate of Compliance Programs. [WWW Document]. URL [http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show\\_document?p\\_table=DIRECTIVE S&p\\_id=1530](http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=DIRECTIVE S&p_id=1530) (accessed 22.11.11).
- OSHA, 2001. Safeguarding Equipment and Protecting Workers from Amputations. US Department of Labor Occupational Safety and Health Administration. [WWW Document]. URL <http://www.osha.gov/Publications/OSHA3170.html> (accessed 19.11.11).
- OSHA-eTools, 2011. Machine Guarding. Web-based Training Tools on Occupational Safety and Health Topics. [WWW Document]. URL <http://www.osha.gov/SLTC/etools/machineguarding/index.html> (accessed 15.11.11).
- Palacios, E., Remiro, F., López, L.J., 2004. Microcontrolador PIC16F84. Desarrollo de proyectos. Editorial RAMA.
- Patwari, N., 2005. Location estimation in sensor networks. Dissertation. University of Michigan.
- Patwari, N., Ash, J.N., Kyperountas, S., Hero III, A.O., Moses, R.L., Correal, N.S., 2005. Locating the nodes: Cooperative localization in wireless sensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 22(4), 54–69.
- Patwari, N., Kasera, S.K., 2011. Temporal link signature measurements for location distinction. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 10(3), 449–462.
- Rappaport, T.S., 2002. Wireless Communications: Principles and Practice (2nd Edition). Prentice Hall.
- Rockford Systems, 2013. Rockford Systems. Rockford Systems Machine Safety Seminars [WWW Document]. URL [www.safetyseminar.org](http://www.safetyseminar.org) (accessed 3.12.11).
- Ruz, M.L., Vázquez, F., 2009. An RFID prototype providing industrial security features in the manufacturing environment. *International Journal of Internet Protocol Technology*, 4(4), 240–246.

- Sahinoglu, Z., Gezici, S., Guvenc, I., 2008. Ultra-wideband Positioning Systems. Theoretical Limits, Ranging Algorithms and Protocols. Cambridge University Press.
- Shang, Y., Ruml, W., 2004. Improved MDS-based localization, in: IEEE INFOCOM 2004 - Conference on Computer Communications - Twenty-Third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Hong Kong, pp. 2640–2651.
- Shang, Y., Ruml, W., Zhang, Y., Fromherz, M., 2004. Localization from connectivity in sensor networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 15(11), 961–974.
- Shang, Y., Ruml, W., Zhang, Y., Fromherz, M.P.J., 2003. Localization from mere connectivity, in: Proceedings of the International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc). pp. 201–212.
- Sklet, S., 2006. Safety barriers: Definition, classification, and performance. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19(5), 494–506.
- SMACNA, 1997. SMACNA, 1997. Press Brake Safety Compliance Kit, Employer's Reference Manual, Safety and Health Program. Safety Committee. Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association.
- Swets, J.A., Dawes, R.M., Monahan, J., 2000. Better decisions through science. *Scientific American*, 283(4), 82–87.
- Teizer, J., Allread, B.S., Fullerton, C.E., Hinze, J., 2010. Autonomous pro-active real-time construction worker and equipment operator proximity safety alert system. *Automation in Construction*, 19(5), 630–640.
- Texas Instruments, 1996. Antenna Reference Guide. Manual Number: 11-08-21-001.
- Texas Instruments, 2000. Series 2000 Reader System, ASCII Protocol. Reference Guide. Literature number: SCBU028.
- Texas Instruments, 2002a. Series 2000 Reader System. Standard Radio Frequency Module RI-RFM-104B. Reference Guide. Literature Number: 11-06-21-035.
- Texas Instruments, 2002b. Series 2000 Reader System, Control Modules RI-CTL-MB2A, RI-CTL-MB6A. Reference Guide. Literature Number: 11-06-21-037.
- Texas Instruments, 2002c. Series 2000 Reader System. High Performance Reader Frequency Module RI-RFM-007B. Reference Guide. Literature Number: 11-06-21-042.
- Texas Instruments, 2002d. LF Technical Training. Antenna Design.
- Texas Instruments, 2002e. Series 2000 Antennas. Literature Number: SCBS845.

- Texas Instruments, 2002f. LF Technical Training, Installation & Set-up.
- Time Domain Corporation, 2013. Time Domain website [WWW Document]. URL <http://www.timedomain.com> (accessed 30.7.13).
- Tüchler, M., Schwarz, V., Huber, A., 2005. Location accuracy of an UWB localization system based on a CMOS-based chip set, in: Joint Workshop on Positioning, Navigation and Communication & UWB Expert Talk, Hanover, Germany.
- Ubisense, 2013. Ubisense [WWW Document]. URL <http://www.ubisense.net> (accessed 20.7.11).
- UNE-EN 1005-1:2002+A1:2009., 2009. Seguridad de las máquinas. Comportamiento físico del ser humano. Parte 1: Términos y definiciones. AEN/CTN 81.
- UNE-EN 1005-2:2004+A1:2009, 2009. Seguridad de las máquinas. Comportamiento físico del ser humano. Parte 2: Manejo de máquinas y de sus partes componentes. AEN/CTN 81.
- UNE-EN 1005-4:2005+A1:2009, 2009. Seguridad de las máquinas. Comportamiento físico del ser humano. Parte 4: Evaluación de las posturas y movimientos de trabajo en relación con las máquinas. AEN/CTN 8.
- UNE-EN 12622:2011, 2011. Seguridad de las máquinas-herramienta. Prensas plegadoras hidráulicas. (Safety of machine tools - Hydraulic press brakes). AEN/CTN 15.
- UNE-EN 13218:2003+A1:2008/AC:2010, 2010. Máquinas-herramienta. Seguridad. Máquinas rectificadoras fijas. AEN/CTN 15.
- UNE-EN 13985:2003+A1:2009, 2009. Máquinas-herramienta. Seguridad. Cizallas-guillotina. AEN/CTN 15.
- UNE-EN 14070:2004+A1:2009, 2009. Seguridad de las máquinas-herramienta. Máquinas transfer y máquinas especiales. AEN/CTN 15.
- UNE-EN 20324:1993, 1993. Grados de protección proporcionados por las envolturas (Código IP).(CEI 529:1989). AEN/CTN 204.
- UNE-EN 349:1994+A1:2008, 2008. Seguridad de las máquinas. Distancias mínimas para evitar el aplastamiento de partes del cuerpo humano. AEN/CTN 81.
- UNE-EN 61496-1:2004/A1:2008, 2004. Seguridad de las máquinas. Equipos de protección electrosensibles. Parte 1: Requisitos generales y ensayos. AEN/CTN 203.
- UNE-EN 692:2006+A1:2009, 2009. Máquinas-herramienta. Prensas mecánicas. Seguridad. Comité AEN/CTN 15.

- UNE-EN 693:2001, 2001. Máquinas-herramienta. Seguridad. Prensas hidráulicas. AEN/CTN 15.
- UNE-EN 842:1997+A1:2008, 2008. Seguridad de las máquinas. Señales visuales de peligro. Requisitos generales, diseño y ensayos. AEN/CTN 81.
- UNE-EN 953:1998+A1:2009, 2009. Seguridad de las máquinas. Resguardos. Requisitos generales para el diseño y construcción de resguardos fijos y móviles. AEN/CTN 81.
- UNE-EN 999:1999+A1:2008, 1998. Seguridad de las máquinas. Posicionamiento de los dispositivos de protección en función de la velocidad de aproximación de partes del cuerpo humano. AEN/CTN 81.
- UNE-EN ISO 13849-1:2008., 2008. Seguridad de las máquinas. Partes de los sistemas de mando relativas a la seguridad Parte 1: principios generales para el diseño. (ISO 13849-1:2006). AEN/CTN 81.
- UNE-EN ISO 13849-2:2008, 2008. Seguridad de las máquinas. Partes de los sistemas de mando relativas a la seguridad. Parte 2: Validación. (ISO 13849-2:2003). AEN/CTN 81.
- UNE-EN ISO 13850:2008, 2008. Seguridad de las máquinas. Parada de emergencia. Principios para el diseño. (ISO 13850:2006). AEN/CTN 81.
- UNE-EN ISO 13857:2008, 2008. Seguridad de las máquinas. Distancias de seguridad para impedir que se alcancen zonas peligrosas con los miembros superiores e inferiores (ISO 13857:2008). AEN/CTN 81.
- UNE-EN ISO 23125:2011/A1:2012, 2012. Máquinas-herramienta. Seguridad. Tornos. (ISO 23125:2010). AEN/CTN 15.
- Vossiek, M., Wiebking, L., Gulden, P., Wieghardt, J., Hoffmann, C., Heide, P., 2003. Wireless local positioning. *IEEE Microwave Magazine*, 4(4 SPEC. ISS.), 77–86.
- Wang, Y., Leus, G., Van Der Veen, A.J., 2009. Cramér-Rao bound for range estimation. *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*, 3301–3304.
- Want, R., 2006. An introduction to RFID technology. *IEEE Pervasive Computing*, 5(1), 25–33.
- Wymeersch, H., Lien, J., Win, M.Z., 2009. Cooperative Localization in Wireless Networks. *Proceedings of the IEEE*, 97(2), 427–450.
- Yigitler, H., Virrankoski, R., Elmusrati, M., 2010. Stackable Wireless Sensor and Actuator Network Platform for Wireless Automation: The UWASA Node, in: Aalto University Workshop on Wireless Sensor Systems.

- Zetik, R., Sachs, J., Thomä, R., 2004. UWB localization - Active and passive approach, in: Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Como, Italy.
- Zhang, C., Kuhn, M., Merkl, B., Fathy, A.E., Mahfouz, M., 2006. Development of an UWB indoor 3-D positioning radar with millimeter accuracy, in: IEEE Microwave Symposium Digest 2006. IEEE MTT-S International, San Francisco, California.
- Zhang, C., Kuhn, M.J., Fathy, A.E., Mahfouz, M.R., Merkl, B.C., 2009. Real-time noncoherent UWB positioning radar with millimeter range accuracy in a 3D indoor environment. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 58(1), 9–20.
- Zhang, C., Kuhn, M.J., Merkl, B.C., Fathy, A.E., Mahfouz, M.R., 2010. Real-time noncoherent UWB positioning radar with millimeter range accuracy: Theory and experiment. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 58(1), 9–20.
- Zhang, J., Firooz, M.H., Patwari, N., Kasera, S.K., 2008. Advancing wireless link signatures for location distinction, in: Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM. pp. 26–37.
- Zhang, J., Kasera, S.K., Patwari, N., 2011. Distinguishing locations across perimeters using wireless link measurements, in: Proceedings - INFOCOM, Shanghai, China.
- Zhang, L., Liu, L., Gotsman, C., Gortler, S.J., 2010. An as-rigid-as-possible approach to sensor network localization. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 6(4), 1–21.

---

## Apéndice I: Normativa Relacionada

---

1.1	INTRODUCCIÓN .....	175
1.2	NORMA UNE-EN 999.....	175
1.2.1	<i>Aspectos de aplicación futuros de la norma UNE-EN 999.....</i>	<i>179</i>
1.3	NORMA UNE-EN 61496-1:2004 Y UNE-EN 61496-12004/A1:2008...180	
1.3.1	<i>Aspectos de aplicación.....</i>	<i>182</i>
1.3.2	<i>Requisitos de funcionamiento. ....</i>	<i>183</i>
1.4	NORMA UNE-EN 693 .....	186



## 1.1 INTRODUCCIÓN

En este anexo se comenta la normativa que guarda mayor relación con los dispositivos de seguridad en maquinaria que realizan funciones similares al prototipo RFID desarrollado. En la fecha de realización del diseño del banco de pruebas basado en robot (descrito en el capítulo 3) la normativa que se comenta en este apéndice era vigente. A la fecha de escritura de esta tesis parte de la normativa ha sido actualizada en relación a la que se utilizó cuando se realizaron los ensayos. Sin embargo, el objetivo de este apéndice es el de describir aquellos conceptos básicos y comunes para dispositivos de protección que producen un paro de emergencia, por lo que algunas de las normas, aunque estén anuladas, son suficientes en este aspecto. No obstante, también se especifica la normativa actualizada correspondiente.

Las normas que se comentan son las siguientes:

- NORMA UNE-EN 999:1998 (sustituida por la norma UNE-EN ISO 13855:2011). “Seguridad de las máquinas. Posicionamiento de los dispositivos de protección en función de la velocidad de aproximación de partes del cuerpo humano.”
- NORMA UNE-EN 61496-1:2004 y UNE-EN 61496-12004/A1:2008. “Equipos de protección electrosensibles. Parte 1: Requisitos generales y ensayos”.
- NORMA UNE-EN 693:2001 (la norma actualmente vigente es la UNE-EN 693:2001+A2:2011). “Máquinas-herramienta. Seguridad. Prensas hidráulicas”.

## 1.2 Norma UNE-EN 999. “Seguridad de las máquinas. Posicionamiento de los dispositivos de protección en función de la velocidad de aproximación de partes del cuerpo humano.”

La aplicabilidad de esta norma en relación al prototipo RFID y al banco de pruebas basado en robot es directa. En el apartado 0 de la misma (Introducción) se especifican aspectos que deben tenerse en cuenta para el posicionamiento correcto de dispositivos de protección con respecto a la zona peligrosa. Se destacan los siguientes:

- **El estado de la técnica y la posible evolución técnica posterior.** Precisamente éste es uno de los principales puntos a considerar en posteriores desarrollos o

mejoras del actual equipo RFID. En el estudio realizado en esta tesis se han podido analizar las ventajas que puede proporcionar la aplicación de la radiofrecuencia en aspectos de seguridad laboral. Como posible evolución de la técnica para crear nuevos dispositivos más eficaces y seguros, dentro de la radiofrecuencia, se consideran las estrategias basadas en UWB como candidatas para futuros desarrollos, principalmente por la precisión en la estima de distancias que proveen.

- **El tipo de dispositivo a utilizar.** En este caso se trata de un dispositivo basado en la radiofrecuencia (el prototipo RFID), y que trata de ofrecer características de seguridad innovadoras para aplicaciones donde las técnicas tradicionales de seguridad no son válidas.
- **El tiempo de respuesta del dispositivo de protección utilizado.** Queda definido y cuantificado más adelante.
- **El tiempo necesario para garantizar que la máquina se encuentra en un estado de seguridad después de la actuación del dispositivo de protección, por ejemplo detener la máquina.** Este parámetro es fundamental para un correcto diseño y una adecuada implantación de cualquier sistema de seguridad en maquinaria industrial. Sin embargo, no se considera de aplicación directa en la fase de desarrollo del prototipo, ya que depende de la máquina en concreto sobre la que se implanta el sistema de seguridad, pudiendo variar de forma importante de unas a otras. Lógicamente sí se deben tener en cuenta los tiempos de actuación que conciernen exclusivamente al dispositivo de seguridad.
- **La trayectoria seguida por la parte del cuerpo al moverse desde los elementos de detección o los órganos de accionamiento hacia la zona peligrosa.** El desarrollo del banco de pruebas basado en robot (capítulo 3) permite simular diferentes entradas en la zona de peligro, incluyendo la definición de velocidades de entrada y trayectorias.

También, dentro del apartado “Objeto y ámbito de aplicación” de la norma UNE-EN 999, queda incluido el dispositivo RFID, ya que se especifican las distancias mínimas entre los elementos de detección o los órganos de accionamiento de los dispositivos de protección y la zona peligrosa.

El prototipo RFID quedaría encuadrado dentro de los “*dispositivos sensibles (...) en particular los equipos de protección electrosensible...*”, según las definiciones recogidas en la norma UNE-EN ISO 12100-1:2004 (equivalente a la norma ISO 12100-1:2003). Los datos que utiliza esta norma están basados en la experiencia industrial, por tanto, las pruebas de robustez descritas en el capítulo 3 se adecúan para los análisis de validación propuestos. En dichas pruebas se pueden observar las distancias de detección para diferentes situaciones, incluyéndose distintas velocidades de aproximación a la zona peligrosa, como ya se ha comentado anteriormente.

En el apartado 6 de la norma se especifican algunas velocidades de aproximación, como por ejemplo 2000 mm/s para la aproximación perpendicular. También, si la distancia entre la zona de detección y la zona peligrosa es mayor de 500mm, se considera como velocidad de aproximación 1600 mm/s. Este ensayo se pudo hacer con el robot ABB IRB 2400L, comprobándose una disminución de la distancia de detección respecto a los ensayos realizados a velocidades menores. El robot ABB utilizado en los ensayos permite desplazamientos a velocidades superiores a 2000 mm/s, lo que posibilita la realización de ensayos de acuerdo a esta norma. En cualquier caso, y teniendo en cuenta investigaciones futuras, habría que modificar ligeramente estas especificaciones, debido a que mediante radiofrecuencia no es posible definir un plano como tal, sino una región de detección (volumen). Por tanto, lo ideal sería reducir ese volumen lo máximo posible, de forma que su espesor sea mínimo, acercándose a la geometría de un plano. Para ello se considera necesario el estudio de sistemas de posicionamiento (*ranging*) que permitan establecer perímetros de detección de manera más precisa.

En cuanto a la estimación del tiempo de respuesta del dispositivo RFID, ésta es igual a la suma del tiempo de detección de una etiqueta, una vez que entra en la zona de lectura de lector, más el tiempo de procesado por el microcontrolador y la activación del relé (cierre o apertura del circuito de emergencia). Adicionalmente, para calcular el tiempo total de respuesta, se debe sumar el tiempo necesario para detener la máquina, que será específico de la máquina y según el caso analizado.

La detección de una etiqueta compatible con el lector RFID utilizado requiere de un tiempo de carga (necesario para que ésta pueda transmitir su código de identificación) de aproximadamente 15 ms, más un tiempo de lectura, que en el caso de las etiquetas de

32 mm empleadas (Figura 2.25) es de 70 ms<sup>1</sup>. Por tanto, se puede definir el tiempo total de respuesta mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Tiempo total de respuesta} = A + B + C + D, \quad (\text{I.1})$$

donde *A* se corresponde con el tiempo de carga de la etiqueta, *B* el tiempo medio de lectura, *C* el tiempo de procesado del microcontrolador (despreciable respecto a los otros, del orden de microsegundos), y *D* el tiempo de respuesta de la máquina, que depende del mecanismo de paro de la máquina. La expresión anterior queda de la siguiente forma,

$$\text{Tiempo total de respuesta} = 15 + 70 + D = 85 + D$$

En las condiciones más desfavorables, se estima que el tiempo total de respuesta del sistema RFID una vez detecta la etiqueta es de aproximadamente 100 ms (se ha considerado el doble de tiempo de carga). Sin embargo, la principal dificultad radica en el desconocimiento de cuándo la etiqueta recibe la suficiente intensidad de campo magnético generado para poder transmitir su código al lector RFID. De los resultados obtenidos en las pruebas de robustez del capítulo 3 (Figuras 3.7 y 3.8, y Tabla 3.4) se deberá tomar el plano más cercano, y por tanto más desfavorable, respecto a la zona de peligro. Dentro de las iniciativas futuras se pretende reducir esta incertidumbre, pretendiéndose diseñar dispositivos basados en radiofrecuencia que permitan definir con mayor precisión los planos de detección, además del estudio de la multidetección tanto en el prototipo desarrollado como en otros posteriores (que funcionen a otras frecuencias de trabajo).

Por otra parte, la definición Equipo De Protección Electrosensible (EPES) dada en el punto 3.4 de esta norma engloba al el equipo RFID. La justificación es la siguiente:

- **Se trata de un dispositivo de detección:** donde los elementos a detectar son las etiquetas RFID.
- **Dispositivo de control/supervisión:** se puede utilizar como dispositivo de supervisión en el caso de que se utilicen los códigos de las etiquetas como identificadores de los trabajadores. Por otro lado, la acción de control queda

---

<sup>1</sup> <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ri-trp-ir2b.pdf>

clara, ya que el principal objetivo es realizar una acción de paro automática ante una situación de riesgo para el operario.

- **Dispositivo de conmutación de la señal de salida:** la placa de circuito impreso diseñada permite accionar automáticamente un relé, tanto en modo normalmente cerrado como normalmente abierto. Esta característica permite abrir (cerrar) cualquier circuito de paro asociado a una máquina concreta.

### 1.2.1 Aspectos de aplicación futuros de la norma UNE-EN 999.

La norma UNE-EN 999 también propone mecanismos de verificación de distancia de seguridad cuando el sistema de protección se instale en una máquina concreta. Estos aspectos serán de relevancia en futuras investigaciones.

A título informativo, la norma define la distancia mínima con relación a la zona peligrosa mediante la siguiente ecuación:

$$S = (K \cdot T) + C, \quad (\text{I.2})$$

donde  $S$  es la distancia mínima (mm) desde la zona peligrosa al plano o línea de detección,  $K$  es una constante (en mm/s) calculada a partir de datos sobre velocidades de aproximación de la parte del cuerpo afectada,  $T$  es el tiempo total de respuesta del dispositivo (en s) y  $C$  es una distancia adicional (en mm), que tiene en cuenta la intrusión hacia la zona peligrosa antes de la activación del dispositivo de protección.

Para determinar la distancia mínima será necesario por tanto calcular el tiempo total de respuesta, (estimado para el prototipo elaborado en 100 ms más el tiempo de paro de la máquina); la velocidad de aproximación (se han supuesto varias en las pruebas de robustez, entre ellas 1600 mm/s); y el factor  $C$  de intrusión hacia la zona peligrosa. Para esto, hay que determinar cómo se encuentra el operario en relación a la máquina, si puede aproximarse, si está estático, si puede mover solo los brazos, o también piernas y pies, etc. El factor  $C$  es una distancia adicional depende la capacidad de detección del dispositivo electrosensible. Para el prototipo RFID, ya que en este caso lo que se detecta son etiquetas, independientemente de su tamaño, carece de sentido establecer un diámetro mínimo de detección por parte del dispositivo, tal y como se especifica en algunos ejemplos la norma. Por tanto, esta distancia adicional debería tener en cuenta otros aspectos, como la imposibilidad de definir un plano mediante el dispositivo RFID, ya comentado en puntos anteriores.

Otra característica que tiene en cuenta la norma (apartado 6) es el tipo de aproximación: perpendicular, paralela, o angular. Esto se aplica a PES que definen un plano de protección, ya que son elementos de protección optoelectrónicos. En lo que respecta al prototipo RFID, en función de las pruebas de robustez y de los análisis estadísticos, habría que intentar definir el volumen de detección, y en función de ello, exponer la necesidad de determinar expresiones específicas de protección, o bien, establecer un protocolo de campo para determinar los volúmenes de activación una vez instalado el sistema.

En el apartado 6.1.4 de la norma se dan las indicaciones necesarias para la evaluación de riesgos sobre métodos de escape de la detección del sistema: pasar gateando, buscar una zona por encima que no detecte y permita acceder al punto de peligro, etc. Como regla general, la normativa de prevención indica la necesidad de considerar todos los estados en que el trabajador pueda “puentear” el sistema, siempre dentro de que no sea intencionado (todas las posibles situaciones que se pueden plantear, como movimientos, distracciones o ciertos tipos de acciones que puedan provocar el accidente).

Como complemento de protección, la norma también establece que se debe impedir el acceso a la zona de peligro por encima o bordeando el EPES y otros dispositivos de protección asociados. Teniendo en cuenta que las simulaciones y ensayos se han realizado suponiendo entradas planas, esto no procede, pero sí habría que tenerlo en cuenta en otros tipos de máquinas.

### **1.3 NORMA UNE-EN 61496-1:2004 y UNE-EN 61496-12004/A1:2008. “Equipos de protección electrosensibles. Parte 1: Requisitos generales y ensayos”.**

En esta norma se tratan las condiciones que deben cumplir (diseño, construcción y ensayos) los EPES que han sido desarrollados para detectar a las personas como parte de un sistema relativo a la seguridad. Se presta especial atención a los requisitos de diseño y funcionamiento para garantizar que se logre un nivel de seguridad apropiado. Asimismo, esta norma complementa a la norma UNE-EN 999 estudiada en el primer apartado.

Son de interés los términos y definiciones que se establecen en el apartado 3 de esta norma, siendo posible identificar las partes del prototipo RFID con esta terminología. A continuación se establecen dichas relaciones:

- **Dispositivo de control/supervisión:** parte del equipo de protección que recibe y procesa la información que llega desde el dispositivo de detección y envía señales al dispositivo de conmutación de la señal de salida (la señal de paro de la máquina). Para el caso del prototipo RFID se trata de la placa de circuito impreso basada en el microcontrolador 16F628A y explicada en el capítulo 2. Mediante esta placa se establece una conexión serie con el lector RFID, y se abre o cierra un circuito de emergencia cuando se detecta una etiqueta.
- **Equipo de protección electrosensible:** todo el equipo en su conjunto con las siguientes partes:
  - o Dispositivo de detección: el lector RFID en sí.
  - o Dispositivo de control: la placa de circuito impreso que controla al lector RFID, configurándolo en el modo adecuado de lectura, a partir de una conexión serie (RS232).
  - o Dispositivo de conmutación de la señal de salida: relé integrado en la propia placa de circuito impreso, accionado por el microcontrolador 16F628A.
- **Fallo y fallo peligroso:** el primer término se define como el cese de la capacidad de detección, mientras que el segundo se define como el impedimento de que los dispositivos de conmutación de la señal de salida estén en posición de “desconectado”<sup>2</sup> cuando en condiciones normales deberían estarlo. Existen varias causas que pueden provocar un fallo, como puede ser un cese en la alimentación del lector RFID o en la placa de circuito impreso que lo controla, o incluso un mal funcionamiento de la antena. Sin embargo, también podrían incluirse sensores de corriente o algún tipo de equipamiento extra que, en caso de detectar alguna anomalía, produzca el paro de la máquina y su imposibilidad de rearme hasta que no se solucione el problema.

---

<sup>2</sup> La posición de desconectado se define como el estado de las(s) salida(s) de los EPES en la que la máquina bajo control se lleva a la parada y se evita su arranque (por ejemplo, el prototipo RFID cierra la salida a relé y esto provoca una parada segura de la máquina).

- **Dispositivo de control final:** elemento último responsable de la desconexión. Generalmente, para el caso del prototipo RFID, es la apertura o cierre de un circuito de emergencia. Adicionalmente, para máquinas con inercia (como puede ser una sierra mecánica), este circuito podría a su vez accionar un dispositivo diseñado específicamente para disminuir el tiempo de paro de la máquina, como puede ser un freno magnético.
- **Tiempo de respuesta:** tiempo máximo observado desde la aparición de la situación de peligro hasta el paso a “desconectado”. Este concepto ya se ha explicado en la norma anterior, y como se ha comentado es dependiente del tipo de máquina en la que se está aplicando el dispositivo de seguridad.

**Bloqueo de re arranque:** el dispositivo tiene que impedir arranques automáticos después de una desconexión de seguridad. Tal y como se puede observar en la Figura 2.32, la existencia de un botón de *reset* vuelve a habilitar el funcionamiento de la máquina (suponiéndose que se ha producido un paro de emergencia), realizándose por tanto un re arranque de la misma, pero siempre y cuando se pulse. Por ejemplo, la salida del relé de paro puede estar conectada a una circuitería tipo AND, de modo que si alguno de los elementos que la constituyen se encuentra abierto, la máquina no podrá entrar en funcionamiento.

### 1.3.1 Aspectos de aplicación futuros de la norma NORMA UNE-EN 61496-1:2004 y UNE-EN 61496-12004/A1:2008.

Los conceptos anteriores quedan claramente identificados con el prototipo RFID desarrollado. Sin embargo, debido a la incertidumbre existente en la zona de detección, y que es en parte inherente a la tecnología por radiofrecuencia, se requiere explicar algunos aspectos con un mayor grado de detalle con el objetivo de definirlos de una manera más acorde con la tecnología empleada. Se comentan a continuación:

- **Capacidad de detección:** límite del valor del parámetro de la función de detección que provoca el accionamiento del equipo de protección. Tal y como se explicó en la norma UNE-EN 999 la capacidad de detección ahora no depende del tamaño del objeto que cruza el plano de detección. Por tanto, para este concepto habrá que establecer un protocolo específico, considerando otros factores que sí pueden degradar la detección del equipo, como posibles

interferencias, interposición entre las etiquetas y las antenas de materiales metálicos que puedan disminuir el rendimiento en la detección, diferenciar situaciones LOS de NLOS, etc.

- **Zona de detección:** tal y como quedó demostrado en las pruebas de robustez explicadas en el capítulo 3, existe un volumen definido por dos superficies, dentro del cual se encuentra aproximadamente el 90% de las medidas de detección. A partir de la definición de estos volúmenes se podrán definir las zonas de detección para un dispositivo basado en radiofrecuencia. El estrechamiento de este volumen, de manera que se parezca más a un plano, se traduce en una mayor precisión del equipo (distancia de paro respecto a la zona peligrosa) y constituye uno de los objetivos para investigaciones futuras, pretendiéndose elaborar una metodología que permita calibrar dicho volumen en función de la máquina industrial.

### 1.3.2 Requisitos de funcionamiento.

La norma también establece una serie de características a cumplir una vez que el equipo se encuentre en funcionamiento. Se destacan las siguientes:

- **Funcionamiento normal:** debe haber una señal de salida apropiada cuando todo o parte de una persona, mayor o igual que la capacidad de detección, entra o se encuentra en la zona de detección. Esta señal es la apertura o cierre que produce el relé conectado al circuito de paro de emergencia.
- **Función de detección:** no debe ser posible ningún ajuste de la zona de detección, de la capacidad de detección o de la función de bloqueo sin emplear una llave, una palabra clave o una herramienta. Para modificar la capacidad de detección habría que acceder el hardware (lector RFID), necesiándose para ello abrir la caja de policarbonato que contiene al lector RFID y la placa de control. Por tanto, este requisito se cumple, ya que los ajustes comentados no los puede realizar el operario.
- **Tipos de EPES definidos en la norma.** El prototipo RFID desarrollado no es un prototipo de sistema de protección para aplicación directa en el ámbito industrial, sino un primer acercamiento para determinar la usabilidad de la radiofrecuencia en seguridad industrial. En una continuación de este estudio sí sería necesario realizar, dependiendo del tipo de EPES, los ensayos adecuados

de validación. El prototipo actual puede clasificarse como un EPES de Tipo 2, el cual debe tener un medio de ensayo periódico con el fin de revelar la posibilidad de existencia de un fallo peligroso. Además, toda avería que cause la pérdida de la capacidad de detección debe conducir a la posición de “desconectado”. En todo caso, cuando desaparezca la alimentación del EPES, el sistema tiene también que pasar a la posición de “desconectado”, de manera que se impida un funcionamiento de la máquina. Las propias pruebas de robustez realizadas constituyen un medio de ensayo para comprobar la detección, simulando las mismas condiciones en la máquina donde se instale el equipo. Una parte del ensayo pertenecerá a la propia máquina donde se instale el dispositivo de seguridad, como por ejemplo la comprobación de que el paso a “desconectado” se produce dentro de un tiempo admisible.

Adicionalmente, el prototipo debería cumplir las siguientes características:

- Conformidad con normas IEC, cuando proceda.
- Definir el rango de funcionamiento: margen de acción, valores característicos del fabricante y usarlo dentro de esos márgenes. Datos como la distancia el área máxima de detección o velocidad de máxima son parámetros a tener en cuenta.
- Protección contra choque eléctrico según IEC 60204-1.
- Protección contra sobre-intensidades según la misma de antes.
- Grado de polución, según la norma IEC 60439.
- Cableado según la norma anterior.
- Dispositivo de conmutación de la señal de salida: es el interruptor que para la máquina, como es el interruptor de paro de emergencia.
  - o El proveedor del EPES debe proporcionar:
    - Corriente de salida máxima y nominal en posición de CONECTADO.
    - Tensión máxima en posición de desconectado.
    - Máxima corriente de salida en posición de desconectado (de fuga).
    - Máxima carga capacitiva.

- Máxima resistencia de la conexión entre el OSSD (el conmutador) y la carga.

Por tanto, sería necesario establecer un protocolo para valorar el cumplimiento de estas características según la máquina en la que se aplica el dispositivo.

- **Luces indicadoras y pantallas:** tiene que haber una luz o una pantalla que indique cuándo se ha accionado el sistema de detección. El tiempo desde el accionamiento hasta que se alcance el 50% del brillo final y el tiempo hasta que el brillo se reduce al 50% cuando se desactiva el dispositivo deben superar 100 ms. El prototipo actual dispone de un LED que indica cuando el paro se ha producido. Además, dependiendo de la máquina y cuando el circuito de emergencia se haya disparado, es posible conectar otro indicador adicional.
- Luces indicadoras de la posición de “conectado” (verde) y “desconectado” (rojo).
- Cuando exista forma de que se desconecte el dispositivo de detección, la máquina tiene que pasar a “desconectado”.
- Requisitos del software: cuando en la conexión y la desconexión interviene software será necesario:
  - Cumplir la norma IEC 61508.
  - Tener pruebas documentales que demuestren que el dispositivo de seguridad funciona correctamente.
  - Plan de calidad documentado del software.
  - Haber analizado previamente los peligros y modos de fallo.

Estos aspectos no son de aplicación ahora, pero sí cuando se utilice el dispositivo en una máquina industrial en específico. También se enumeran otra serie de características, que serán de aplicación una vez se tenga validado el dispositivo para diferentes situaciones. Se pueden englobar en los siguientes bloques:

- **Requisitos del entorno:**
  - La norma se aplica entre 0 y 50°C
- **Perturbaciones eléctricas:** no debe haber fallos peligrosos descendiendo la tensión de alimentación cuando ésta se reduzca hasta cero y vuelva a subir a la nominal en un periodo de entre 10 y 20 s. También se enumeran una serie de

análisis respecto a la presencia de campos electromagnéticos, perturbaciones en la alimentación (huecos y transitorios) que deberán valorarse para cada caso específico.

- **Ensayos:** los ensayos se deben realizar en unas determinadas condiciones de tensión y frecuencia, temperatura, humedad y presión barométrica. Se dan también cotas de los errores de medición. Además, los ensayos deben estar documentados, se enumeran principalmente los siguientes tipos de ensayos de explotación:
  - o Función de detección
  - o Tiempo de respuesta
  - o Ensayos específicos cuando hay una máquina
  - o Efectos de las perturbaciones
  - o De campos electromagnéticos.
  - o Vibraciones
  - o Golpeteo
  - o Envolventes.

También hay que tener en cuenta que el fabricante del lector RFID empleado proporciona una declaración de conformidad CE, garantizando los requisitos esenciales de acuerdo al Acto de Equipos de Radio y Terminales de Telecomunicación (FTEG) y la Directiva 1999/5/CE (Directiva R&TTE).

Asimismo, en esta norma también se definen los documentos de acompañamiento y un conjunto de anexos con los valores de ciertos parámetros a considerar. Todos estos aspectos deben considerarse en cuenta en futuros estudios.

#### **1.4 NORMA UNE-EN 693. “Máquinas-herramienta. Seguridad. Prensas hidráulicas”**

En esta norma se tratan las medidas y requisitos técnicos de seguridad de las prensas hidráulicas, cuyo principal uso previsto es el trabajo de metales en frío, u otro tipo de materiales que vayan a trabajarse de la misma forma (tales como cartón, plástico, caucho o cuero). Debido a que los aspectos de aplicabilidad futura y las dificultades encontradas con el prototipo RFID ya comentadas en las dos normas anteriores, en este caso se harán este tipo de valoraciones en el mismo apartado.

Los aspectos que guardan mayor relación respecto a la aplicación del prototipo RFID como sistema de seguridad son los siguientes:

- **Se supone el acceso a la prensa desde todas las direcciones:** para esta característica el empleo de la radiofrecuencia supondría una ventaja. Como solución ideal se tendría la utilización de un método de calibrado para establecer una “cortina invisible” que englobe la zona de peligro. Evidentemente, habría que considerar ciertos problemas, como márgenes de error, interposición de objetos, degradación de la eficiencia del sistema con la velocidad, etc. Estos aspectos ya se han comentado en las dos normas anteriores.
- **Peligros de impacto (apartado 4 de la norma):** aplastamiento, cizalladura, corte o seccionamiento, enganche, arrastre o atrapamiento son el tipo de accidentes que el sistema RFID pretende evitar.
- Se especifican las medidas de seguridad tanto para el operario como para otras personas expuestas.

En el apartado 3 de la norma se establecen una serie de términos relacionados con las prensas hidráulicas. Respecto al prototipo RFID se pueden destacar los siguientes:

- **Tiempo total de parada (tiempo total de respuesta):** *“tiempo transcurrido desde la activación del dispositivo de protección hasta el cese del movimiento peligroso, o hasta que la máquina alcance una posición de seguridad”*. Tal y como se describió en la norma UNE-EN 999, la principal dificultad para definir este tiempo radica en la existencia de una incertidumbre en el momento de la excitación del dispositivo RFID. Dentro de las iniciativas futuras se pretende reducir dicha incertidumbre, pretendiéndose diseñar dispositivos basados en radiofrecuencia que permitan definir con mayor precisión los planos de detección.
- **Redundancia:** *“aplicación de más de un dispositivo o sistema, o parte de un dispositivo o sistema, con el objetivo de asegurar que, en el caso de fallo de una parte en la realización de su función, haya otra disponible para realizar esa función”*. El prototipo RFID también podría utilizarse como un sistema redundante, junto con otros dispositivos, de tal modo que, globalmente, se mejore la seguridad del sistema. Por tanto, el empleo de la tecnología por

radiofrecuencia no pretende necesariamente sustituir los actuales sistemas de seguridad, sino complementarlos aumentando la seguridad.

- **Resguardos:** la aplicación de la tecnología RFID podría reducir en gran parte la utilización de estos dispositivos, especialmente para aquellos casos donde su eliminación suponga una mayor comodidad en el trabajo, sin que ello suponga una disminución de la seguridad del operario. De este modo, la prensa hidráulica se pararía cuando, al estar realizando un movimiento peligroso, el operario introduce por ejemplo, su mano (Figura 2.25), sin tener que haber un resguardo necesariamente.

Por otra parte, en el apartado 5 de la norma se describen los requisitos y medidas de seguridad, junto con consideraciones básicas de diseño, posibles sistemas de protección frente a peligros mecánicos en la zona del troquel según los modos de producción y protección frente a peligros ocasionados por fallos o averías en el sistema.

Respecto a los peligros mecánicos en la zona del troquel (que es el apartado que guarda mayor relación con los propósitos del prototipo RFID) en la norma se enumeran las principales medidas de protección, como troqueles cerrados, resguardos fijos, dispositivos de mando a dos manos, et El prototipo RFID sería una opción más dentro de las posibilidades enumeradas por la norma, con la ventaja de que para ciertos casos puede ser la única solución de parada automática, sin descartarse además una combinación de medidas.

La norma también dice que la combinación de las medidas de protección debe proteger a las personas expuestas (aquellas que pueden acceder a la zona de peligro durante las actividades de funcionamiento normal, reglaje, mantenimiento, limpieza o inspección). Para el caso del equipo RFID propuesto, se necesita que los operarios lleven puestas las etiquetas RFID, por lo que el acceso a la maquinaria y la zona de riesgo debe estar controlado.

En la norma también se comentan los equipos de protección electrosensibles activos en forma de cortina de luz (AOPD, *Active Optoelectronic Protective Device*). Se puede hacer un símil con el prototipo RFID aquí propuesto, pero nuevamente se hace hincapié en que existe una casuística en la que los EPES tradicionales no podrían aplicarse. Basta con pensar en una situación en la que la superficie de peligro debe traspasarse por herramientas o el material que se esté trabajando, y además de una forma aleatoria, lo

que impediría la utilización de dispositivos AOPD con apertura prematura (que solo interrumpen el ciclo de funcionamiento cuando el movimiento peligroso en la zona de troquel ha pasado). En esos casos es donde la aplicación de la radiofrecuencia tiene un valor añadido, proporcionando un método de paro automático que discrimina entre el operario y las piezas que se están procesando. Además, también sería posible agregarle este sistema características de inhibición similares a las que pueden tener otros dispositivos de seguridad.

Las características requeridas en los puntos c, y d del apartado 5.3.15 podrían mejorarse con la aplicación de un sistema basado en radiofrecuencia. Se justifican a continuación:

- *“Cuando sea posible permanecer entre el AOPD y la zona de peligro de la prensa, deben instalarse medios adicionales, por ejemplo otros haces, para detectar a una persona que allí permanezca (...)”*: mediante un sistema de localización esta situación no se daría como tal, ya que si un operario (que lleve etiquetas RFID o algún tipo de transmisor acoplado) se encuentra dentro de la zona de peligro, el sistema automáticamente lo estaría detectando.
- *“No debe ser posible iniciar ningún movimiento peligroso mientras que cualquier parte del cuerpo humano esté interrumpiendo el AOPD”*. Mediante el sistema RFID propuesto sería posible que cualquier elemento, por ejemplo una barra de metal atravesase la zona de peligro y la máquina continua realizando su ciclo de trabajo. Es cuando se detecta una etiqueta RFID cuando se produce el paro.

También, en este mismo apartado se describen las situaciones donde es necesario algún tipo de señalización, como por ejemplo cuando se produzca una desconexión del AOPD. Se habla de otros dispositivos, como los dispositivos de mando a dos manos y sus requisitos de aplicabilidad.

En el apartado 5.4 se comenta el sistema de mando y control, donde se establece que *“este aparato debe aplicarse a todos los componentes relacionados con la seguridad que mandan o controlan directa o indirectamente el funcionamiento de las partes móviles de la prensa o su troquel(...)”*. La placa de comunicación desarrollada permite conectar el lector RFID con el sistema de mando y control.

En los siguientes subapartados de la norma se establecen las condiciones que debe cumplir el sistema de mando cuando interviene un dispositivo de seguridad, como la necesidad de realizar un rearme manual, o la imposibilidad de una puesta en marcha intespestiva. Todas estas características son inherentes al sistema de mando y control de la prensa hidráulica.

- Se establecen los requisitos necesarios para el diseño del sistema de control, según si éste está sujeto a vibraciones y choques, posibilidades de inhibición, etc. Carece de sentido extenderse aquí en estos conceptos, ya que no dependen del prototipo RFID. Sí se obliga a la inclusión de un manual de instrucciones.

Para el caso del prototipo del lector RFID, habría que incluir:

- o Método de sintonía y comprobación de que se ha alcanzado el máximo rendimiento
- o Formas de integrar las etiquetas con el operario
- o Protocolo de prueba del equipo, de modo que se verifica que funciona adecuadamente, utilizando para ello las condiciones más severas.
- o Explicación de un método de calibración según la zona a cubrir

En el Anexo A de la norma se describe el cálculo de las distancias mínimas de seguridad, utilizándose la ecuación (IV.2). Como se vio, en esta ecuación influye el tiempo total de parada del sistema, que en este caso la norma lo divide en los siguientes elementos:

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + \Delta t, \quad (I.3)$$

Donde  $t_1$  representa el tiempo de parada de la propia prensa, inherente al modelo de la misma,  $t_2$  es el tiempo de respuesta del sistema de protección,  $t_3$  la suma de los restantes factores medibles del tiempo de respuesta, y  $\Delta t$  la incertidumbre del método de medida.

También, para el caso de AOPDs se consideran velocidades de acercamiento de 1600 y 2000 mm/s al igual que la norma UNE-EN 999. Para el cálculo de estos tiempos la norma establece que se tomen las condiciones más desfavorables. Por ejemplo, para  $t_1$ , en el Anexo B se establece un protocolo de medición para el tiempo de respuesta de un sistema hidráulico, debiéndose tomar el mayor valor del máximo medido o del promedio más tres veces la desviación típica. De una forma similar, pero ahora en

unidades de distancia, se puede estimar la distancia mínima de detección del prototipo RFID (ver pruebas de robustez del capítulo 3).

Por otra parte, en la norma se proporcionan un conjunto de tablas donde se resumen los requisitos para la protección del operador, así como los medios de verificación de las medidas de seguridad.

Desde un plano general, esta norma contempla las condiciones analizadas en las normas UNE-EN 999 y 61496-1:2004, pero de una manera más específica para el empleo de dispositivos de protección en prensas hidráulicas. En el Anexo E de la norma, se muestra un esquema ilustrativo para EPES utilizando dispositivos AOPDs, se muestra en la Figura I.1:

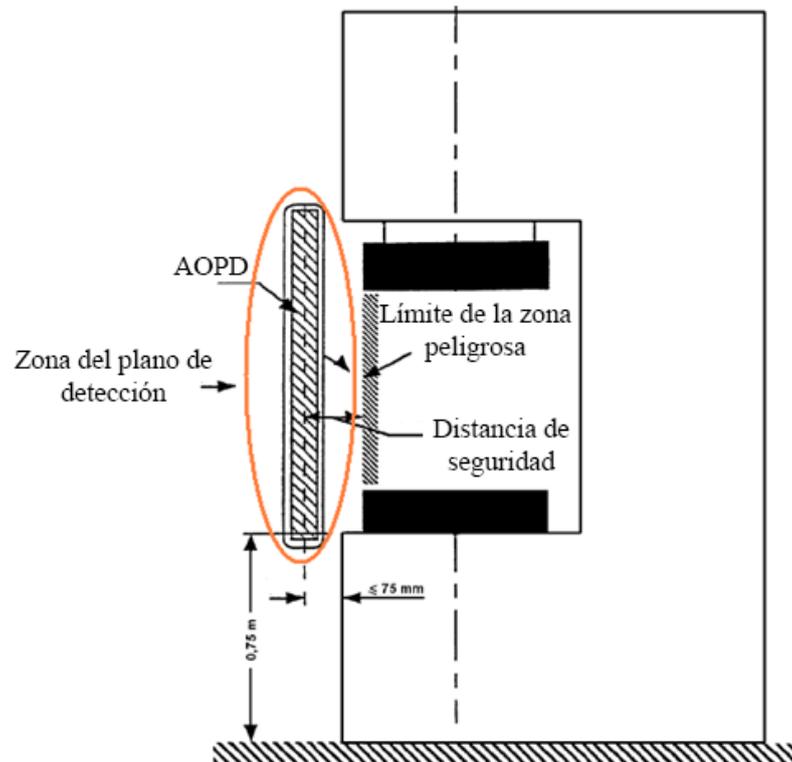


Figura I.1 Esquema de aplicación de EPES utilizando AOPDs en una prensa hidráulica (adaptada de la norma UNE-EN-693)

Como se puede observar en la figura anterior, la zona de instalación del sistema AOPD sería la equivalente al plano de detección del sistema de radiofrecuencia, de modo que cuando éste se sobrepase por alguna parte del cuerpo del operario el sistema realice una acción de emergencia. En el caso de poderse definir este plano con suficiente precisión (uno de los inconvenientes actuales del prototipo RFID), el sistema podría trabajar de forma similar a un AOPD, añadiendo como característica innovadora

(y comentada en más de una ocasión) la capacidad de discriminación entre objetos y partes del cuerpo humano. El principal parámetro a estimar por tanto es la distancia de seguridad respecto a la zona límite peligrosa.

---

## Apéndice II: Informes estadísticos

---

### 2.1 Introducción

En este apéndice se muestran, a modo de ejemplo, algunos de los informes generados por `wsnLocalize`. Concretamente, se muestran algunas de las simulaciones referentes al apartado 4.5.2, donde se distribuyen 200 nodos de forma aleatoria. Para cada una de las simulaciones se han realizado 40 iteraciones, obteniéndose finalmente los valores medios de cada uno de los parámetros, cuyo significado se puede consultar en el capítulo 4. El parámetro *time* se debe considerar como un valor relativo, ya que depende de los recursos del pc que se haya utilizado. En los informes presentados en este apéndice se utilizó un Pentium 2 con 2 GB de RAM y Windows XP SP3.



wsnLocalize. Mario L. Ruz ([mario.ruz@uco.es](mailto:mario.ruz@uco.es)). Localization algorithm: MDS-MAP(Distance)  
 Nodes = 200 | Anchors = 4 | noise = 2.0000 | R = 1.2000 | AvgConnectivity = 7.98

Err(%R)	maxErr	meanErr	stdErr	Err	stress	stresst	FrobNorm	time	ErrorNode
75.0079	3.5772	0.9001	0.6185	0.0688	0.1473	0.1230	1.2215	0.0457	0.7978
75.3481	3.5922	0.9042	0.6186	0.0691	0.1455	0.1234	1.2002	0.0483	0.7629
75.0261	3.5178	0.9003	0.6025	0.0688	0.1455	0.1231	1.2053	0.0455	0.7691
74.0164	3.4631	0.8882	0.5939	0.0679	0.1434	0.1210	1.1850	0.0460	0.7834
74.5287	3.5202	0.8943	0.6023	0.0683	0.1419	0.1220	1.1362	0.0758	0.7706
75.1412	3.4959	0.9017	0.6021	0.0689	0.1439	0.1220	1.1682	0.0479	0.7799
74.4883	3.4448	0.8939	0.5887	0.0683	0.1416	0.1196	1.1698	0.0460	0.8020
76.7146	3.5579	0.9206	0.6125	0.0703	0.1434	0.1231	1.1751	0.0466	0.8084
72.5373	3.4390	0.8704	0.5839	0.0665	0.1408	0.1191	1.1438	0.0454	0.7242
76.5522	3.4890	0.9186	0.6018	0.0702	0.1418	0.1230	1.1512	0.0456	0.8294
75.9857	3.6326	0.9118	0.6344	0.0697	0.1456	0.1234	1.1852	0.0456	0.8189
74.6020	3.4888	0.8952	0.6029	0.0684	0.1427	0.1229	1.1658	0.0669	0.7467
72.9395	3.4392	0.8753	0.5917	0.0669	0.1423	0.1222	1.1623	0.0456	0.7180
75.1775	3.5558	0.9021	0.6141	0.0689	0.1451	0.1234	1.1976	0.0453	0.7791
74.2666	3.5570	0.8912	0.6134	0.0681	0.1428	0.1214	1.1621	0.0472	0.7867
76.7286	3.5484	0.9207	0.6131	0.0703	0.1418	0.1219	1.1441	0.0480	0.8312
73.4446	3.4598	0.8813	0.5964	0.0673	0.1419	0.1212	1.1510	0.0458	0.7716
74.1191	3.4984	0.8894	0.6014	0.0679	0.1425	0.1214	1.1538	0.1085	0.7712
75.2941	3.5754	0.9035	0.6168	0.0690	0.1442	0.1225	1.1759	0.0920	0.7904
73.2962	3.5343	0.8796	0.6119	0.0672	0.1436	0.1220	1.1684	0.0457	0.7503
73.2734	3.4749	0.8793	0.6014	0.0672	0.1425	0.1204	1.1547	0.0745	0.7606
74.8698	3.5556	0.8984	0.6140	0.0686	0.1448	0.1215	1.1957	0.0518	0.7806
73.3215	3.4753	0.8799	0.5927	0.0672	0.1427	0.1202	1.1779	0.0519	0.7512
76.0543	3.5269	0.9127	0.6073	0.0697	0.1440	0.1226	1.1815	0.0458	0.8170
73.1885	3.4082	0.8783	0.5819	0.0671	0.1380	0.1190	1.1173	0.0478	0.7702
72.1207	3.4705	0.8654	0.5960	0.0661	0.1429	0.1215	1.1674	0.0459	0.7004
74.6539	3.5143	0.8958	0.6040	0.0684	0.1463	0.1227	1.2098	0.0455	0.7448
75.7694	3.5882	0.9092	0.6199	0.0695	0.1439	0.1212	1.1881	0.0460	0.7963
74.4930	3.4744	0.8939	0.5973	0.0683	0.1443	0.1217	1.1799	0.0470	0.8001
76.1990	3.5622	0.9144	0.6103	0.0699	0.1471	0.1226	1.2154	0.0457	0.8188
74.3017	3.5326	0.8916	0.6083	0.0681	0.1430	0.1224	1.1596	0.0683	0.7854
75.0209	3.5122	0.9003	0.6027	0.0688	0.1411	0.1214	1.1356	0.0673	0.7899
72.4344	3.4673	0.8692	0.5986	0.0664	0.1428	0.1211	1.1549	0.0773	0.7453
74.1208	3.5106	0.8894	0.6091	0.0679	0.1447	0.1215	1.1919	0.0613	0.7804
73.3302	3.5053	0.8800	0.6051	0.0672	0.1454	0.1212	1.1964	0.0496	0.7767
72.7615	3.4704	0.8731	0.5953	0.0667	0.1418	0.1192	1.1600	0.0542	0.7480
73.0465	3.4739	0.8766	0.6021	0.0670	0.1434	0.1208	1.1717	0.0458	0.7683
76.0083	3.5132	0.9121	0.6039	0.0697	0.1450	0.1235	1.1873	0.0464	0.7915
75.7977	3.5534	0.9096	0.6109	0.0695	0.1456	0.1224	1.1924	0.0456	0.8211
73.0578	3.4670	0.8767	0.5968	0.0670	0.1398	0.1202	1.1402	0.0539	0.7544

\*\*\*\*\*Averaged Values\*\*\*\*\*  
 74.4760 3.5111 0.8937 0.6045 0.0683 0.1434 0.1217 1.1725 0.0539 0.7773

wsnLocalize. Mario L. Ruz ([mario.ruz@uco.es](mailto:mario.ruz@uco.es)). Localization algorithm used: MDS-MAP(Distance)  
 Nodes = 200 | Anchors = 4 | noise = 5.0000 | R = 1.2000 | AvgConnectivity = 7.98

Err(%R)	maxErr	meanErr	stdErr	Err	stress	stresst	FrobNorm	time	ErrorNode
76.2126	3.4324	0.9146	0.5851	0.0699	0.1432	0.1273	1.1177	0.0467	0.7217
78.7063	3.5715	0.9445	0.6178	0.0722	0.1417	0.1269	1.0992	0.0546	0.7978
76.3624	3.7814	0.9163	0.6574	0.0700	0.1414	0.1262	1.1033	0.0473	0.7682
71.5386	3.4695	0.8585	0.5894	0.0656	0.1307	0.1191	0.9935	0.0466	0.6335
70.8883	3.4394	0.8507	0.5848	0.0650	0.1266	0.1146	0.9319	0.0460	0.7216
67.4261	3.1421	0.8091	0.5319	0.0618	0.1333	0.1173	1.0107	0.0466	0.6432
68.3296	3.3041	0.8200	0.5514	0.0626	0.1287	0.1167	1.0048	0.0467	0.5878
75.6096	3.4745	0.9073	0.5951	0.0693	0.1374	0.1240	1.0360	0.0468	0.7862
74.0506	3.5063	0.8886	0.6078	0.0679	0.1371	0.1256	1.0783	0.0881	0.6962
74.4589	3.3853	0.8935	0.5699	0.0683	0.1365	0.1224	1.0780	0.0490	0.7382
71.4832	3.3268	0.8578	0.5597	0.0655	0.1385	0.1209	1.0842	0.0465	0.7132
75.9134	3.5141	0.9110	0.6016	0.0696	0.1406	0.1263	1.1112	0.0579	0.7555
73.1102	3.5237	0.8773	0.6115	0.0670	0.1462	0.1272	1.1399	0.0466	0.7208
73.7766	3.4593	0.8853	0.5943	0.0676	0.1332	0.1197	0.9998	0.0462	0.7824
75.4363	3.6181	0.9052	0.6301	0.0692	0.1398	0.1244	1.1077	0.0556	0.7784
72.9253	3.5332	0.8751	0.6053	0.0669	0.1359	0.1220	1.0256	0.0493	0.7453
72.6185	3.4209	0.8714	0.5818	0.0666	0.1362	0.1223	1.0473	0.0463	0.7082
78.1205	3.8353	0.9374	0.6756	0.0716	0.1470	0.1297	1.1587	0.0536	0.8670
75.4148	3.5436	0.9050	0.6080	0.0691	0.1374	0.1245	1.0369	0.0461	0.7731
71.8677	3.3203	0.8624	0.5565	0.0659	0.1387	0.1223	1.0776	0.0459	0.6383
74.9909	3.6089	0.8999	0.6199	0.0687	0.1399	0.1241	1.0944	0.0457	0.7299
76.6905	3.5836	0.9203	0.6157	0.0703	0.1421	0.1271	1.0900	0.0460	0.8239
74.3623	3.5567	0.8923	0.6042	0.0682	0.1320	0.1180	1.0147	0.0793	0.7696
66.9274	3.3139	0.8031	0.5626	0.0614	0.1327	0.1177	1.0419	0.0657	0.5707
72.8327	3.3989	0.8740	0.5742	0.0668	0.1384	0.1170	1.1237	0.0455	0.7352
74.9741	3.5798	0.8997	0.6174	0.0687	0.1396	0.1207	1.1101	0.0582	0.7992
73.6074	3.5242	0.8833	0.6014	0.0675	0.1344	0.1211	1.0563	0.0463	0.7230
74.6941	3.4454	0.8963	0.5854	0.0685	0.1344	0.1237	0.9908	0.0513	0.7583
72.3110	3.4212	0.8677	0.5763	0.0663	0.1388	0.1237	1.1000	0.0457	0.7091
77.3262	3.6680	0.9279	0.6408	0.0709	0.1440	0.1301	1.1349	0.0467	0.7535
79.5454	3.7135	0.9545	0.6440	0.0729	0.1463	0.1292	1.1495	0.0546	0.8389

71.3130	3.3254	0.8558	0.5619	0.0654	0.1386	0.1232	1.0785	0.0460	0.7109
78.1802	3.4656	0.9382	0.5884	0.0717	0.1357	0.1241	1.0230	0.0456	0.8293
67.8665	3.2453	0.8144	0.5633	0.0622	0.1343	0.1208	1.0293	0.0489	0.6190
75.9469	3.3203	0.9114	0.5671	0.0696	0.1364	0.1226	1.0804	0.0456	0.7982
77.9335	3.6855	0.9352	0.6304	0.0714	0.1436	0.1275	1.1294	0.0461	0.7517
76.1767	3.6329	0.9141	0.6288	0.0698	0.1431	0.1276	1.1062	0.0747	0.7529
74.6119	3.7384	0.8953	0.6360	0.0684	0.1377	0.1232	1.0444	0.0819	0.7114
80.5251	3.7936	0.9663	0.6597	0.0738	0.1430	0.1266	1.1394	0.0779	0.8438
75.0285	3.5876	0.9003	0.6148	0.0688	0.1403	0.1239	1.1313	0.0461	0.7520

\*\*\*\*\*Averaged Values\*\*\*\*\*  
 74.2523 3.5053 0.8910 0.6002 0.0681 0.1381 0.1233 1.0728 0.0528 0.7389

wsnLocalize. Mario L. Ruz (mario.ruz@uco.es). Localization algorithm used: MDS-MAP(Distance)  
 Nodes = 200 | Anchors = 4 | noise = 10 % | R = 1.2000 | AvgConnectivity = 7.98

Err(%R)	maxErr	meanErr	stdErr	Err	stress	stresst	FrobNorm	time	ErrorNode
75.0619	3.2787	0.9007	0.5432	0.0688	0.1283	0.1272	0.8308	0.0513	0.7178
79.9856	3.2681	0.9598	0.5710	0.0733	0.1268	0.1231	0.8718	0.0475	0.9305
81.5788	4.0866	0.9789	0.7105	0.0748	0.1341	0.1299	0.8801	0.0486	0.7153
73.0574	3.3184	0.8767	0.5617	0.0670	0.1321	0.1264	0.9303	0.0470	0.6854
66.3761	3.3025	0.7965	0.5694	0.0609	0.1288	0.1258	0.8139	0.0551	0.4816
78.6849	3.7139	0.9442	0.6490	0.0721	0.1432	0.1384	0.9401	0.0469	0.7055
72.1195	3.1103	0.8654	0.5462	0.0661	0.1239	0.1218	0.8247	0.0465	0.8702
68.7503	3.0702	0.8250	0.5302	0.0630	0.1262	0.1259	0.7939	0.0676	0.6951
84.9857	4.0375	1.0198	0.7255	0.0779	0.1483	0.1449	0.9744	0.0977	0.7430
82.2100	3.7248	0.9865	0.6454	0.0754	0.1380	0.1350	0.9660	0.3336	0.8537
79.9438	3.7374	0.9593	0.6628	0.0733	0.1414	0.1337	1.0132	0.0539	0.8291
75.4467	3.3554	0.9054	0.5884	0.0692	0.1408	0.1340	0.9898	0.0932	0.7469
72.5053	3.4176	0.8701	0.6071	0.0665	0.1343	0.1303	0.9064	0.1412	0.6887
68.8304	3.2228	0.8260	0.5493	0.0631	0.1253	0.1228	0.8223	0.0493	0.6501
82.6763	4.0442	0.9921	0.7381	0.0758	0.1476	0.1391	1.0464	0.0727	0.8250
68.6474	3.2717	0.8238	0.5718	0.0629	0.1214	0.1192	0.7933	0.0517	0.6553
73.8449	3.4934	0.8861	0.6043	0.0677	0.1276	0.1251	0.7732	0.0559	0.8595
78.2839	3.5620	0.9394	0.6186	0.0718	0.1363	0.1323	0.9002	0.0489	0.7456
77.9198	3.6016	0.9350	0.5954	0.0714	0.1319	0.1281	0.8586	0.0811	0.7055
75.2676	3.2144	0.9032	0.5516	0.0690	0.1289	0.1258	0.8906	0.0500	0.7131
73.0163	3.5363	0.8762	0.6133	0.0669	0.1327	0.1297	0.8319	0.0555	0.5481
68.0531	2.9467	0.8166	0.4920	0.0624	0.1216	0.1184	0.7900	0.0521	0.6640
70.9513	3.2213	0.8514	0.5447	0.0650	0.1239	0.1235	0.7958	0.0497	0.5917
69.5569	3.2152	0.8347	0.5560	0.0638	0.1248	0.1226	0.8314	0.0585	0.6951
89.0148	4.0081	1.0682	0.7020	0.0816	0.1441	0.1411	0.9414	0.1433	0.9872
84.0442	3.6475	1.0085	0.6345	0.0770	0.1453	0.1367	1.0388	0.0905	0.8385
72.5619	3.5330	0.8707	0.6417	0.0665	0.1391	0.1319	0.9505	0.0494	0.7237
79.5582	3.8427	0.9547	0.6619	0.0729	0.1447	0.1367	1.0495	0.0517	0.8831
74.7372	3.2075	0.8968	0.5359	0.0685	0.1232	0.1223	0.8038	0.0499	0.8077
76.6791	3.5883	0.9201	0.6242	0.0703	0.1308	0.1252	0.9002	0.0498	0.6609
75.4548	3.3600	0.9055	0.5769	0.0692	0.1310	0.1276	0.8920	0.0502	0.7162
88.4635	3.9247	1.0616	0.6881	0.0811	0.1473	0.1445	0.9556	0.0478	0.9222
73.6647	3.5115	0.8840	0.6070	0.0675	0.1358	0.1312	0.8862	0.0479	0.6218
75.8842	3.5978	0.9106	0.6192	0.0696	0.1327	0.1274	0.9044	0.0638	0.8253
78.4239	3.9862	0.9411	0.7242	0.0719	0.1496	0.1400	1.0537	0.0496	0.7269
78.2632	3.5647	0.9392	0.6046	0.0717	0.1364	0.1302	0.9334	0.0484	0.8860
67.4675	3.1454	0.8096	0.5455	0.0619	0.1193	0.1191	0.7733	0.0492	0.7242
83.1292	4.2185	0.9976	0.7730	0.0762	0.1501	0.1423	1.0216	0.0494	0.8192
72.2023	3.4888	0.8664	0.6015	0.0662	0.1310	0.1276	0.8835	0.1000	0.6505
77.2002	3.3471	0.9264	0.5796	0.0708	0.1388	0.1345	0.9287	0.0790	0.6987

\*\*\*\*\*Averaged Values\*\*\*\*\*  
 76.1126 3.5181 0.9134 0.6116 0.0698 0.1342 0.1300 0.8996 0.0694 0.7452

wsnLocalize. Mario L. Ruz (mario.ruz@uco.es). Localization algorithm used: MDS-MAP(Distance)  
 Nodes = 200 | Anchors = 4 | noise = 15.0000 | R = 1.2000 | AvgConnectivity = 7.98

Err(%R)	maxErr	meanErr	stdErr	Err	stress	stresst	FrobNorm	time	ErrorNode
74.8954	3.2651	0.8987	0.5511	0.0687	0.1263	0.1261	0.6689	0.0455	0.6937
86.2750	3.3224	1.0353	0.5628	0.0791	0.1394	0.1392	0.7994	0.0457	0.8378
86.1351	4.5538	1.0336	0.8390	0.0790	0.1566	0.1566	0.9141	0.0467	0.7032
94.8007	3.8859	1.1376	0.6941	0.0869	0.1383	0.1376	0.7539	0.0503	1.1107
74.3881	3.6738	0.8927	0.6336	0.0682	0.1335	0.1335	0.7478	0.0516	0.9430
81.1058	3.6222	0.9733	0.5980	0.0744	0.1401	0.1388	0.7817	0.0465	0.6123
94.7394	3.8644	1.1369	0.6968	0.0869	0.1537	0.1537	0.8997	0.0462	1.1765
62.0646	2.8267	0.7448	0.4762	0.0569	0.1127	0.1127	0.6352	0.0474	0.4698
66.8020	2.9502	0.8016	0.4965	0.0612	0.1236	0.1197	0.5945	0.0474	0.5677
72.2950	3.5057	0.8675	0.6227	0.0663	0.1391	0.1377	0.8586	0.0459	0.4496
72.3086	3.1952	0.8677	0.5435	0.0663	0.1289	0.1288	0.7055	0.0817	0.7835
90.4913	4.3096	1.0859	0.7541	0.0830	0.1465	0.1464	0.8161	0.0844	0.8731
71.1896	3.0318	0.8543	0.5354	0.0653	0.1335	0.1334	0.7197	0.0455	0.5895
80.2051	3.8103	0.9625	0.6902	0.0735	0.1517	0.1515	0.9137	0.0461	0.4883
72.1434	3.1145	0.8657	0.5050	0.0661	0.1241	0.1224	0.6309	0.0456	0.8054
78.0060	3.5487	0.9361	0.6005	0.0715	0.1315	0.1295	0.6345	0.0457	0.9480

67.3878	2.7245	0.8087	0.4834	0.0618	0.1277	0.1235	0.6865	0.0459	0.2609
72.8880	3.5791	0.8747	0.6143	0.0668	0.1298	0.1297	0.7241	0.0471	0.7455
70.1057	2.6315	0.8413	0.5172	0.0643	0.1430	0.1334	0.6492	0.0462	0.5336
83.7080	3.6149	1.0045	0.6257	0.0767	0.1434	0.1434	0.8044	0.0501	0.9127
81.9248	3.9890	0.9831	0.7181	0.0751	0.1508	0.1507	0.7972	0.0463	0.7965
72.4311	3.5948	0.8692	0.6490	0.0664	0.1351	0.1351	0.7046	0.0462	0.7223
75.6571	3.6076	0.9079	0.6380	0.0694	0.1299	0.1274	0.6325	0.0460	0.7477
98.5432	4.5975	1.1825	0.7915	0.0903	0.1596	0.1579	0.8910	0.0469	1.0994
76.1947	4.1078	0.9143	0.7464	0.0699	0.1354	0.1333	0.6480	0.0692	0.8191
84.5293	3.6767	1.0144	0.6330	0.0775	0.1498	0.1497	0.9179	0.0902	0.5391
82.2758	3.6087	0.9873	0.6435	0.0754	0.1359	0.1344	0.6495	0.0460	0.9686
76.6263	3.3994	0.9195	0.6253	0.0702	0.1429	0.1429	0.8336	0.0455	0.5185
89.0535	4.1786	1.0686	0.7402	0.0816	0.1534	0.1532	0.9127	0.0457	1.0429
88.8523	4.5797	1.0662	0.7948	0.0815	0.1530	0.1530	0.8440	0.0473	0.8045
84.7143	3.4884	1.0166	0.6055	0.0777	0.1390	0.1390	0.8528	0.0459	0.8582
79.9497	3.8287	0.9594	0.6781	0.0733	0.1343	0.1343	0.7724	0.0456	0.7479
61.7147	2.6195	0.7406	0.4519	0.0566	0.1250	0.1218	0.5921	0.0459	0.5380
63.1564	2.8151	0.7579	0.4889	0.0579	0.1217	0.1209	0.6506	0.0488	0.6627
89.0740	4.7173	1.0689	0.8664	0.0817	0.1640	0.1634	0.8787	0.0463	0.8563
75.7954	3.6464	0.9095	0.6348	0.0695	0.1425	0.1425	0.7699	0.0466	0.6637
76.6145	3.3935	0.9194	0.5697	0.0702	0.1322	0.1321	0.7921	0.0459	0.6937
80.6276	3.5719	0.9675	0.6199	0.0739	0.1472	0.1472	0.8662	0.0457	0.6861
65.9197	3.4837	0.7910	0.6645	0.0604	0.1377	0.1377	0.7672	0.1059	0.5855
69.0190	3.2412	0.8282	0.5596	0.0633	0.1190	0.1189	0.6539	0.0811	0.5937

\*\*\*\*\*Averaged Values\*\*\*\*\*  
 78.1152 3.5794 0.9374 0.6290 0.0716 0.1383 0.1373 0.7591 0.0525 0.7362

wsnLocalize. Mario L. Ruz (mario.ruz@uco.es). Localization algorithm used: MDS-MAP(Distance)  
 Nodes = 200 | Anchors = 4 | noise = 20.0000 | R = 1.2000 | AvgConnectivity = 7.98

Err(%R)	maxErr	meanErr	stdErr	Err	stress	stresst	FrobNorm	time	ErrorNode
94.9050	4.5390	1.1389	0.8608	0.0870	0.1547	0.1535	0.7852	0.0471	1.0154
82.8402	3.8868	0.9941	0.6545	0.0759	0.1605	0.1458	0.6860	0.0476	0.7441
98.2410	4.6287	1.1789	0.8449	0.0901	0.1812	0.1759	0.8823	0.0495	0.8393
87.5670	3.3590	1.0508	0.5719	0.0803	0.1666	0.1510	0.7477	0.0491	1.1885
101.1910	3.9966	1.2143	0.6903	0.0928	0.1765	0.1449	0.7186	0.0497	0.9941
89.8137	3.1811	1.0778	0.5569	0.0823	0.1706	0.1610	0.7630	0.0479	1.0390
64.0606	2.6601	0.7687	0.5131	0.0587	0.1494	0.1352	0.6543	0.0783	0.1651
75.6353	3.4958	0.9076	0.6652	0.0693	0.1603	0.1530	0.7260	0.0671	0.4708
88.5269	4.4268	1.0623	0.7777	0.0812	0.1589	0.1497	0.7241	0.0494	0.7594
82.5646	3.8512	0.9908	0.7134	0.0757	0.1460	0.1436	0.6827	0.0477	0.7185
59.7761	2.6823	0.7173	0.4931	0.0548	0.1291	0.1227	0.6267	0.0474	0.4937
95.0701	4.6602	1.1408	0.8491	0.0872	0.1658	0.1645	0.9618	0.0496	0.9423
88.7871	4.1268	1.0654	0.7211	0.0814	0.1736	0.1630	0.8344	0.0496	0.4366
90.9587	4.0215	1.0915	0.7123	0.0834	0.1641	0.1484	0.7511	0.0476	0.8702
74.0459	3.5468	0.8886	0.6596	0.0679	0.1453	0.1416	0.7192	0.0497	0.5258
103.0639	4.3716	1.2368	0.8274	0.0945	0.1999	0.1874	0.9819	0.0473	0.8751
92.7498	4.0642	1.1130	0.7382	0.0850	0.1734	0.1683	0.8274	0.0484	1.1555
88.1671	3.7586	1.0580	0.7459	0.0808	0.1703	0.1685	0.8789	0.0495	0.4511
88.2344	4.5979	1.0588	0.8259	0.0809	0.1606	0.1583	0.8681	0.0490	0.7896
94.3439	4.2818	1.1321	0.7780	0.0865	0.1657	0.1638	0.8965	0.0496	0.9146
78.9918	2.6985	0.9479	0.4560	0.0724	0.1398	0.1363	0.6963	0.0916	0.5760
66.6940	3.1999	0.8003	0.5754	0.0611	0.1441	0.1306	0.5761	0.1025	0.1765
69.8163	3.0223	0.8378	0.5299	0.0640	0.1453	0.1307	0.6280	0.0485	0.5953
77.6094	3.2394	0.9313	0.5733	0.0711	0.1482	0.1340	0.5975	0.0475	0.7555
85.2401	4.3137	1.0229	0.7619	0.0781	0.1722	0.1685	0.8429	0.0466	0.5857
83.7348	4.8940	1.0048	0.8910	0.0768	0.1581	0.1556	0.7899	0.0559	0.6940
89.4439	4.2332	1.0733	0.7087	0.0820	0.1707	0.1552	0.7722	0.0473	1.1082
87.8980	3.7483	1.0548	0.6477	0.0806	0.1595	0.1528	0.7559	0.0491	0.7774
88.4800	2.9295	1.0618	0.5292	0.0811	0.1707	0.1557	0.7354	0.0491	0.9805
76.9928	3.0916	0.9239	0.5064	0.0706	0.1435	0.1373	0.6466	0.0538	0.4890
101.5451	4.2268	1.2185	0.7570	0.0931	0.1960	0.1789	0.8960	0.0493	0.6887
77.4477	3.4358	0.9294	0.5742	0.0710	0.1636	0.1387	0.6807	0.0492	0.6711
74.9100	3.2413	0.8989	0.5891	0.0687	0.1490	0.1439	0.7101	0.0765	0.6901
70.5770	3.4028	0.8469	0.6596	0.0647	0.1490	0.1403	0.6397	0.0975	0.4181
81.3364	3.5980	0.9760	0.6173	0.0746	0.1578	0.1483	0.6914	0.0492	0.5440
82.0621	3.5239	0.9847	0.6197	0.0752	0.1547	0.1498	0.7335	0.0481	0.6198
69.9867	3.7714	0.8398	0.6406	0.0642	0.1432	0.1353	0.6377	0.0461	0.5465
101.0876	4.9235	1.2131	0.8628	0.0927	0.1633	0.1627	0.8727	0.0465	1.1450
86.5776	4.0227	1.0389	0.7822	0.0794	0.1907	0.1697	0.8365	0.0462	0.7296
73.6457	4.0327	0.8837	0.7432	0.0675	0.1688	0.1526	0.7208	0.0460	0.3649

\*\*\*\*\*Averaged Values\*\*\*\*\*  
 84.1155 3.7922 1.0094 0.6806 0.0771 0.1615 0.1519 0.7544 0.0542 0.7136

wsnLocalize. Mario L. Ruz (mario.ruz@uco.es). Localization algorithm used: ARAP  
 Nodes = 200 | Anchors = 4 | noise = 2.0000 | R = 1.2000 | AvgConnectivity = 7.98

Err(%R)	maxErr	meanErr	stdErr	Err	stress	stresst	FrobNorm	time	ErrorNode
15.2706	2.9327	0.1832	0.3737	0.0140	0.0514	0.0514	1.1673	4.8915	0.0669
17.5452	2.7119	0.2105	0.3317	0.0161	0.0497	0.0495	1.2075	5.1658	0.1433
17.3079	2.8588	0.2077	0.3528	0.0159	0.0509	0.0509	1.2042	5.1514	0.0893
19.1521	3.0400	0.2298	0.3822	0.0176	0.0568	0.0567	1.1524	5.0295	0.1044
15.8241	3.0475	0.1899	0.3857	0.0145	0.0528	0.0528	1.2083	5.2884	0.0474
17.1036	2.0099	0.2052	0.3090	0.0157	0.0497	0.0497	1.1520	5.0481	0.1060
17.5539	3.0137	0.2106	0.3769	0.0161	0.0543	0.0543	1.1550	5.1473	0.1241
17.8225	2.9422	0.2139	0.3600	0.0163	0.0526	0.0525	1.1671	5.1547	0.1606
21.1502	2.9192	0.2538	0.3492	0.0194	0.0553	0.0553	1.1765	5.1418	0.1415
16.7352	2.7428	0.2008	0.3377	0.0153	0.0493	0.0492	1.2297	4.8621	0.0927
17.6427	2.6545	0.2117	0.3236	0.0162	0.0484	0.0483	1.1825	4.9271	0.1270
17.2796	2.8239	0.2074	0.3465	0.0158	0.0505	0.0505	1.1741	5.1283	0.1077
20.4987	2.8836	0.2460	0.3530	0.0188	0.0543	0.0542	1.2135	5.1070	0.1498
16.9533	2.6887	0.2034	0.3302	0.0155	0.0487	0.0487	1.1481	5.0727	0.1379
17.4161	2.9993	0.2090	0.3769	0.0160	0.0543	0.0542	1.1578	4.9214	0.0803
19.8130	1.6735	0.2378	0.2535	0.0182	0.0471	0.0471	1.1985	4.8423	0.1436
16.2678	2.8694	0.1952	0.3565	0.0149	0.0512	0.0511	1.1668	4.8567	0.0957
14.9939	1.2770	0.1799	0.1961	0.0137	0.0372	0.0372	1.1770	4.8975	0.1068
17.4306	1.7321	0.2092	0.2629	0.0160	0.0465	0.0465	1.1775	4.8301	0.0919
19.6840	1.4673	0.2362	0.2197	0.0180	0.0468	0.0466	1.1940	5.2289	0.1761
20.3568	2.8697	0.2443	0.3398	0.0187	0.0535	0.0534	1.2036	4.9067	0.1878
16.5449	1.7207	0.1985	0.2667	0.0152	0.0450	0.0449	1.1604	4.8371	0.1318
18.8790	1.9610	0.2265	0.3033	0.0173	0.0511	0.0511	1.1776	4.9491	0.1408
17.9026	2.9765	0.2148	0.3666	0.0164	0.0531	0.0530	1.1851	4.8930	0.1147
17.5729	1.3907	0.2109	0.2057	0.0161	0.0414	0.0414	1.1577	5.0392	0.1639
16.3744	2.9111	0.1965	0.3673	0.0150	0.0519	0.0519	1.1702	4.9727	0.0919
16.8671	2.9439	0.2024	0.3666	0.0155	0.0528	0.0528	1.1437	4.9377	0.1052
18.2110	2.6548	0.2185	0.3214	0.0167	0.0490	0.0489	1.1599	5.1374	0.1490
18.2383	3.2080	0.2189	0.4055	0.0167	0.0588	0.0588	1.1953	4.8573	0.0721
15.6109	1.7039	0.1873	0.2725	0.0143	0.0444	0.0443	1.2082	4.8647	0.0772
21.6896	2.6498	0.2603	0.3161	0.0199	0.0521	0.0520	1.2036	4.8246	0.1887
17.6991	2.7228	0.2124	0.3349	0.0162	0.0495	0.0495	1.1895	4.8025	0.1374
18.3839	2.9330	0.2206	0.3564	0.0169	0.0529	0.0528	1.1852	4.9440	0.1098
16.2885	3.0879	0.1955	0.3922	0.0149	0.0538	0.0538	1.2145	4.8452	0.0579
16.9401	1.6569	0.2033	0.2567	0.0155	0.0457	0.0457	1.1651	5.0547	0.0937
16.3471	2.1408	0.1962	0.3424	0.0150	0.0525	0.0525	1.1858	4.8872	0.0599
14.7568	2.1131	0.1771	0.3468	0.0135	0.0501	0.0499	1.1617	5.6026	0.0539
16.3537	3.1910	0.1962	0.4107	0.0150	0.0579	0.0577	1.1392	6.3278	0.0799
16.8450	3.0639	0.2021	0.3903	0.0154	0.0544	0.0544	1.1832	6.4365	0.1133
17.3378	3.0130	0.2081	0.3828	0.0159	0.0551	0.0550	1.1654	6.2786	0.1001

\*\*\*\*\*Averaged Values\*\*\*\*\*  
 17.5661 2.5550 0.2108 0.3331 0.0161 0.0508 0.0508 1.1791 5.1023 0.1130

wsnLocalize. Mario L. Ruz (mario.ruz@uco.es). Localization algorithm used: ARAP  
 Nodes = 200 | Anchors = 4 | noise = 5.0000 | R = 1.2000 | AvgConnectivity = 7.98

Err(%R)	maxErr	meanErr	stdErr	Err	stress	stresst	FrobNorm	time	ErrorNode
28.3803	3.3336	0.3406	0.4280	0.0260	0.0809	0.0795	1.0419	7.1432	0.2299
23.7369	3.3356	0.2848	0.4248	0.0218	0.0653	0.0646	1.0809	6.8812	0.1157
17.3290	1.4063	0.2079	0.2413	0.0159	0.0407	0.0407	1.1721	6.2099	0.1428
13.7662	0.8005	0.1652	0.1309	0.0126	0.0298	0.0296	1.0894	6.6493	0.1497
18.8062	2.8876	0.2257	0.3583	0.0172	0.0522	0.0516	1.0813	6.2888	0.2012
18.2355	1.7177	0.2188	0.2761	0.0167	0.0488	0.0486	1.0421	6.7061	0.1090
19.2044	1.2848	0.2305	0.1945	0.0176	0.0409	0.0407	1.0604	6.7531	0.1740
17.6318	2.8343	0.2116	0.3554	0.0162	0.0511	0.0510	1.0304	6.2648	0.1354
22.8315	2.6373	0.2740	0.3093	0.0209	0.0520	0.0518	1.0755	6.1531	0.2325
20.8632	3.0306	0.2504	0.3723	0.0191	0.0586	0.0581	1.0461	6.7935	0.1700
16.9773	1.3692	0.2037	0.2118	0.0156	0.0400	0.0400	1.1108	6.1536	0.1588
16.8676	2.4067	0.2024	0.3048	0.0155	0.0459	0.0459	1.0815	6.2700	0.0434
17.2640	1.7340	0.2072	0.2800	0.0158	0.0395	0.0392	1.0664	6.0152	0.0971
27.6241	1.2500	0.3315	0.1757	0.0253	0.0478	0.0477	0.9901	6.3621	0.3830
20.2009	3.3931	0.2424	0.4530	0.0185	0.0660	0.0652	1.0741	6.2628	0.1571
23.9203	2.8827	0.2870	0.4359	0.0219	0.0710	0.0707	1.1301	6.5142	0.1556
15.7506	1.8214	0.1890	0.2784	0.0144	0.0443	0.0441	1.1718	6.5812	0.1215
19.4622	2.3976	0.2335	0.3620	0.0178	0.0547	0.0538	1.0430	6.2044	0.0885
21.5215	1.1518	0.2583	0.1878	0.0197	0.0453	0.0452	1.1533	6.2392	0.1617
19.0876	1.5892	0.2291	0.2489	0.0175	0.0452	0.0452	1.0595	6.0174	0.1544
15.7763	1.3721	0.1893	0.2081	0.0145	0.0397	0.0397	1.1409	6.1933	0.1456
15.6152	1.2939	0.1874	0.2186	0.0143	0.0399	0.0398	1.0606	5.9754	0.0996
19.5148	2.8689	0.2342	0.3492	0.0179	0.0517	0.0511	1.0165	6.0516	0.2096
19.4490	1.9604	0.2334	0.3181	0.0178	0.0519	0.0510	1.0121	6.4628	0.1594
14.4472	2.8851	0.1734	0.3687	0.0132	0.0521	0.0513	1.0860	6.3300	0.0331
18.2884	2.5946	0.2195	0.3133	0.0168	0.0486	0.0485	1.0465	6.1821	0.1694
23.8186	1.8884	0.2858	0.3045	0.0218	0.0567	0.0567	1.1114	6.5035	0.1476
22.0654	3.1238	0.2648	0.3930	0.0202	0.0567	0.0563	1.0417	6.0953	0.1723
20.5416	2.1928	0.2465	0.3844	0.0188	0.0561	0.0550	1.0695	6.0604	0.0381
21.0357	1.8735	0.2524	0.3232	0.0193	0.0517	0.0504	1.0392	6.3291	0.1771

24.9330	3.2340	0.2992	0.3916	0.0229	0.0637	0.0633	1.1008	6.2907	0.1910
22.5482	1.4245	0.2706	0.2196	0.0207	0.0461	0.0457	1.0160	6.6806	0.1553
18.8273	2.7984	0.2259	0.3295	0.0173	0.0497	0.0494	1.0953	6.4980	0.0673
19.7915	1.7346	0.2375	0.2767	0.0181	0.0502	0.0502	1.1857	6.1240	0.1422
20.7913	1.7872	0.2495	0.2913	0.0191	0.0491	0.0491	1.0467	6.1273	0.1438
17.3264	2.0074	0.2079	0.3308	0.0159	0.0506	0.0502	1.0873	6.0887	0.1144
28.0152	1.5515	0.3362	0.2253	0.0257	0.0546	0.0544	1.1502	6.1437	0.1987
23.3600	2.7713	0.2803	0.3159	0.0214	0.0539	0.0538	1.0767	6.5707	0.1482
25.9514	2.3953	0.3114	0.3071	0.0238	0.0542	0.0539	1.1061	6.1049	0.2995
17.7138	1.8340	0.2126	0.2806	0.0162	0.0480	0.0478	1.0111	6.0322	0.1382

\*\*\*\*\*Averaged Values\*\*\*\*\*  
 20.2318 2.1714 0.2428 0.3045 0.0185 0.0511 0.0508 1.0775 6.3327 0.1533

wsnLocalize. Mario L. Ruz (mario.ruz@uco.es). Localization algorithm used: ARAP  
 Nodes = 200 | Anchors = 4 | noise = 10.0000 | R = 1.2000 | AvgConnectivity = 7.98

Err(%R)	maxErr	meanErr	stdErr	Err	stress	stresst	FrobNorm	time	ErrorNode
26.5757	3.5549	0.3189	0.4818	0.0244	0.0859	0.0795	0.7828	5.0406	0.2626
24.9137	3.2487	0.2990	0.5178	0.0228	0.0766	0.0757	0.9099	5.0788	0.1718
22.6196	2.8555	0.2714	0.3524	0.0207	0.0553	0.0549	0.9295	5.4218	0.2301
19.5626	0.8944	0.2348	0.1531	0.0179	0.0456	0.0353	0.8300	5.3894	0.2199
23.4753	1.7946	0.2817	0.2955	0.0215	0.0542	0.0542	0.9431	5.4163	0.2500
23.5224	1.2123	0.2823	0.1870	0.0216	0.0432	0.0431	1.0310	6.1572	0.3964
31.0311	3.7458	0.3724	0.5008	0.0284	0.0779	0.0724	0.8436	7.7093	0.2577
82.3707	2.8862	0.9884	0.4925	0.0755	0.1417	0.1357	0.8753	6.3554	0.8710
29.1835	1.3512	0.3502	0.1962	0.0268	0.0521	0.0520	0.9697	6.3309	0.2731
25.0797	1.0485	0.3010	0.1902	0.0230	0.0454	0.0454	0.9482	6.1283	0.2852
25.6987	2.4737	0.3084	0.4493	0.0236	0.0668	0.0660	0.9732	6.0582	0.1680
24.0493	1.0847	0.2886	0.1636	0.0220	0.0470	0.0458	0.9664	6.2291	0.3112
42.9724	1.1109	0.5157	0.2101	0.0394	0.0670	0.0665	0.8771	5.9760	0.5885
20.7980	2.5650	0.2496	0.3193	0.0191	0.0519	0.0518	0.9992	6.2512	0.0940
23.6784	1.2423	0.2841	0.1888	0.0217	0.0508	0.0506	0.9186	5.8277	0.1792
25.5500	3.1120	0.3066	0.3498	0.0234	0.0579	0.0577	0.9515	5.4594	0.2373
51.7290	2.3538	0.6207	0.4140	0.0474	0.0784	0.0780	0.9050	6.2556	0.5059
78.5942	4.6197	0.9431	0.7501	0.0721	0.1268	0.1246	0.8331	5.9077	0.5981
28.0110	3.4618	0.3361	0.4355	0.0257	0.0692	0.0676	0.7922	5.8823	0.2553
76.7647	3.6755	0.9212	0.7246	0.0704	0.1303	0.1274	0.8541	5.5983	0.7411
21.9081	2.5854	0.2629	0.3162	0.0201	0.0546	0.0538	0.9512	5.6333	0.0997
28.9485	3.4173	0.3474	0.4917	0.0265	0.0842	0.0787	0.8306	5.9304	0.1310
28.5055	2.5853	0.3421	0.2961	0.0261	0.0554	0.0533	0.9146	6.0616	0.2561
23.9029	3.3895	0.2868	0.4447	0.0219	0.0704	0.0660	0.7561	6.2740	0.1540
41.0933	1.1076	0.4931	0.1672	0.0377	0.0723	0.0723	0.9749	5.8868	0.3989
42.7010	2.7446	0.5124	0.3203	0.0391	0.0824	0.0778	0.8396	5.8718	0.3905
21.4022	1.3407	0.2568	0.2115	0.0196	0.0508	0.0422	0.8209	5.7209	0.1186
19.6379	2.6686	0.2357	0.3191	0.0180	0.0479	0.0478	0.9581	5.6239	0.2361
32.0857	1.9741	0.3850	0.3466	0.0294	0.0692	0.0634	0.9212	5.3324	0.4282
30.6451	2.7199	0.3677	0.3548	0.0281	0.0633	0.0619	0.9664	6.2059	0.2555
22.3147	1.0651	0.2678	0.1948	0.0205	0.0498	0.0498	1.0395	6.0906	0.1865
24.7696	2.5846	0.2972	0.3057	0.0227	0.0562	0.0556	0.9057	5.5498	0.4149
32.9852	1.8151	0.3958	0.2821	0.0302	0.0636	0.0624	0.8556	5.9132	0.3513
33.3408	2.3249	0.4001	0.2935	0.0306	0.0605	0.0602	0.8099	5.3300	0.3410
41.7712	2.6445	0.5013	0.3076	0.0383	0.0683	0.0683	1.0476	5.5749	0.5096
24.0483	1.1634	0.2886	0.1935	0.0220	0.0560	0.0560	0.9601	5.7862	0.3069
22.0799	2.7149	0.2650	0.3302	0.0202	0.0564	0.0561	1.0101	5.4714	0.2553
27.9964	2.1312	0.3360	0.3503	0.0257	0.0634	0.0616	0.9903	5.0555	0.1736
24.8535	1.6210	0.2982	0.2781	0.0228	0.0491	0.0445	0.8170	4.9158	0.1017
23.4529	2.4265	0.2814	0.3121	0.0215	0.0528	0.0527	0.9691	4.8506	0.2036

\*\*\*\*\*Averaged Values\*\*\*\*\*  
 31.8656 2.3329 0.3824 0.3372 0.0292 0.0663 0.0642 0.9118 5.7888 0.3052

wsnLocalize. Mario L. Ruz (mario.ruz@uco.es). Localization algorithm used: ARAP  
 Nodes = 200 | Anchors = 4 | noise = 20.0000 | R = 1.2000 | AvgConnectivity = 7.98

Err(%R)	maxErr	meanErr	stdErr	Err	stress	stresst	FrobNorm	time	ErrorNode
109.7044	5.1872	1.3165	0.7979	0.1006	0.1964	0.1883	0.8105	5.9218	1.3621
76.2022	6.6053	0.9144	1.1488	0.0699	0.1679	0.1629	0.8006	5.9579	0.4065
195.3126	6.2603	2.3438	1.1906	0.1791	0.3757	0.3171	0.5991	6.2091	3.2905
71.3979	4.2086	0.8568	0.8679	0.0655	0.1768	0.1556	0.7581	5.9851	0.2531
78.8280	6.8306	0.9459	1.3406	0.0723	0.2631	0.2438	0.7257	5.8556	0.5478
43.3129	2.2789	0.5198	0.3985	0.0397	0.0855	0.0769	0.6633	5.8943	0.3152
33.7691	3.3501	0.4052	0.4114	0.0310	0.0923	0.0781	0.5660	5.8983	0.0886
33.8357	2.7090	0.4060	0.3497	0.0310	0.0845	0.0751	0.6912	5.9485	0.1074
47.4944	1.6504	0.5699	0.2836	0.0435	0.0967	0.0818	0.5226	5.9998	0.3958
149.4765	4.5140	1.7937	0.8575	0.1370	0.2722	0.2515	0.8236	5.9551	1.8538
38.6337	3.0594	0.4636	0.4858	0.0354	0.0924	0.0882	0.7361	5.9627	0.1857
184.2553	10.0885	2.2111	2.3188	0.1689	0.4106	0.3796	0.7203	5.9540	1.7883
362.8010	10.4411	4.3536	2.2931	0.3326	0.3591	0.3181	0.6643	5.9996	5.5640
49.6172	2.7028	0.5954	0.4476	0.0455	0.1082	0.0759	0.7187	5.9683	0.4099

61.2307	3.7613	0.7348	0.6973	0.0561	0.1608	0.1432	0.6820	6.2712	0.3127
189.6163	6.6911	2.2754	1.1622	0.1738	0.4078	0.3381	0.8779	6.1331	1.9020
63.7663	3.1285	0.7652	0.5116	0.0585	0.1211	0.1177	0.9268	5.9044	0.6671
186.3907	8.6418	2.2367	1.6083	0.1709	0.4189	0.3633	0.5820	5.9296	1.7470
61.3588	2.0130	0.7363	0.4073	0.0563	0.1212	0.0986	0.5514	5.9746	0.8086
150.1006	5.4632	1.8012	1.0849	0.1376	0.3190	0.2826	0.7369	6.1741	1.5173
90.4562	4.1276	1.0855	0.8543	0.0829	0.2045	0.1787	0.7799	6.0540	0.6893
70.6800	5.6495	0.8482	0.9641	0.0648	0.2131	0.1815	0.5798	5.9939	0.5392
66.3716	2.3478	0.7965	0.3164	0.0608	0.1268	0.1090	0.7963	5.8809	0.8927
59.2948	5.9204	0.7115	0.9516	0.0544	0.1670	0.1643	0.6941	5.9096	0.2672
66.7271	6.6137	0.8007	1.3196	0.0612	0.2613	0.2556	0.7064	5.8155	0.4486
90.2787	5.7399	1.0833	0.8692	0.0828	0.1869	0.1537	0.7072	6.2983	0.7107
184.4304	6.7149	2.2132	1.3007	0.1691	0.3656	0.3166	0.7902	6.0615	1.0506
93.6363	3.5067	1.1236	0.6457	0.0858	0.2016	0.1887	0.6570	5.9324	1.1138
158.0463	5.2015	1.8966	1.0898	0.1449	0.3395	0.2951	0.7546	5.9636	1.1527
45.1678	3.3407	0.5420	0.5077	0.0414	0.1049	0.0933	0.7134	6.0119	0.2544
182.4343	6.0333	2.1892	1.0910	0.1672	0.3640	0.3059	0.5833	5.8110	0.6725
69.8148	2.0654	0.8378	0.3127	0.0640	0.1215	0.1131	0.8216	6.0613	0.7157
74.0129	2.4970	0.8882	0.3714	0.0679	0.1357	0.1135	0.5940	6.1001	0.7105
35.4260	2.8581	0.4251	0.3221	0.0325	0.0778	0.0717	0.7478	5.9567	0.4070
103.2086	6.3273	1.2385	1.1536	0.0946	0.1938	0.1770	0.7246	5.9442	0.8735
51.6661	3.8008	0.6200	0.5377	0.0474	0.1205	0.1144	0.7447	5.9071	0.1868
166.2091	5.4682	1.9945	1.1702	0.1524	0.2784	0.2632	0.8628	5.9318	1.9206
178.7943	5.4078	2.1455	1.2723	0.1639	0.3934	0.3320	0.6092	6.1938	1.2703
137.0224	4.4249	1.6443	0.9944	0.1256	0.2477	0.2328	0.9984	6.0189	1.3985
97.8064	4.0445	1.1737	0.6632	0.0897	0.1791	0.1507	0.6126	6.0577	1.1921

\*\*\*\*\*Averaged Values\*\*\*\*\*  
 105.2147 4.7919 1.2626 0.8843 0.0965 0.2153 0.1912 0.7159 5.9950 0.9998

wsnLocalize. Mario L. Ruz (mario.ruz@uco.es). Localization algorithm used: MDS-MAP(Distance)  
 Nodes = 200 | Anchors = 4 | noise = 20.0000 | R = 1.5000 | AvgConnectivity = 12.21

Err(%R)	maxErr	meanErr	stdErr	Err	stress	stresst	FrobNorm	time	ErrorNode
30.3342	1.4992	0.4550	0.2304	0.0348	0.0667	0.0566	0.9184	9.7075	0.5371
15.4882	0.6430	0.2323	0.1233	0.0177	0.0473	0.0414	0.6720	9.9232	0.0626
30.8757	1.0882	0.4631	0.1943	0.0354	0.0660	0.0577	0.8993	9.9665	0.3290
17.6101	0.7718	0.2642	0.1577	0.0202	0.0557	0.0419	0.7135	9.6732	0.0875
16.3287	1.0198	0.2449	0.1636	0.0187	0.0486	0.0419	0.6740	9.7545	0.1298
26.9317	1.1217	0.4040	0.2079	0.0309	0.0595	0.0524	0.8580	9.8282	0.4965
17.8539	0.6941	0.2678	0.1403	0.0205	0.0411	0.0370	0.7468	9.8902	0.1922
16.9170	0.8111	0.2538	0.1435	0.0194	0.0474	0.0419	0.6414	9.9590	0.2783
24.8466	1.0580	0.3727	0.1959	0.0285	0.0598	0.0510	0.8121	9.6917	0.4111
22.6303	0.8443	0.3395	0.1675	0.0259	0.0532	0.0526	0.7160	9.7937	0.3283
17.8441	0.8368	0.2677	0.1378	0.0204	0.0483	0.0424	0.7125	9.7779	0.2300
22.6357	0.7723	0.3395	0.1803	0.0259	0.0730	0.0528	0.9609	9.9089	0.3708
20.0849	1.0515	0.3013	0.1488	0.0230	0.0441	0.0426	0.6246	9.8949	0.3129
19.7186	0.8431	0.2958	0.1856	0.0226	0.0576	0.0450	0.7859	9.7325	0.4723
23.8796	1.1323	0.3582	0.1834	0.0274	0.0680	0.0549	0.6535	9.9170	0.3197
32.2887	1.2567	0.4843	0.2384	0.0370	0.0779	0.0676	0.8626	9.7917	0.3138
21.3888	1.1752	0.3208	0.2023	0.0245	0.0730	0.0494	0.7782	9.7723	0.2934
18.3408	0.7196	0.2751	0.1479	0.0210	0.0533	0.0391	0.7985	9.8316	0.3049
19.1133	1.0628	0.2867	0.2055	0.0219	0.0611	0.0502	0.9392	10.5032	0.1507
29.6021	1.5287	0.4440	0.3153	0.0339	0.0815	0.0659	0.6779	9.8876	0.3909
17.5665	0.8260	0.2635	0.1342	0.0201	0.0633	0.0471	0.7419	9.7586	0.1650
17.6976	0.6459	0.2655	0.1135	0.0203	0.0457	0.0437	0.4705	9.6863	0.2989
17.9885	0.7204	0.2698	0.1641	0.0206	0.0619	0.0447	0.9149	9.7744	0.1341
22.0451	1.2625	0.3307	0.2357	0.0253	0.0620	0.0582	0.7171	9.8327	0.3058
29.1308	1.0075	0.4370	0.2021	0.0334	0.0606	0.0546	0.8123	9.7893	0.5946
13.6986	0.6824	0.2055	0.1175	0.0157	0.0449	0.0370	0.6752	9.6589	0.3556
22.3615	2.1079	0.3354	0.3064	0.0256	0.0678	0.0580	0.7221	10.2202	0.4332
20.3601	1.0406	0.3054	0.1914	0.0233	0.0396	0.0377	0.5425	9.8976	0.0832
26.5389	2.7606	0.3981	0.4314	0.0304	0.0947	0.0734	0.6982	9.9718	0.1833
17.2587	0.7098	0.2589	0.1451	0.0198	0.0455	0.0374	0.6661	10.3098	0.3343
17.7131	0.6481	0.2657	0.1347	0.0203	0.0345	0.0321	0.4678	9.9464	0.1608
21.8638	1.4688	0.3280	0.2000	0.0251	0.0508	0.0445	0.7910	9.8326	0.4603
16.0998	0.7569	0.2415	0.1283	0.0184	0.0528	0.0437	0.7322	9.7606	0.2263
15.2479	0.8238	0.2287	0.1568	0.0175	0.0536	0.0416	0.7840	9.9047	0.2731
16.6596	0.7744	0.2499	0.1587	0.0191	0.0679	0.0484	0.8274	9.8112	0.3670
16.3243	0.8486	0.2449	0.1672	0.0187	0.0623	0.0437	0.7624	9.7552	0.2270
14.9981	0.6563	0.2250	0.1415	0.0172	0.0416	0.0365	0.6049	10.1253	0.1371
24.6094	0.9216	0.3691	0.1679	0.0282	0.0657	0.0500	1.2127	9.9525	0.3862
19.4991	1.3670	0.2925	0.2099	0.0223	0.0627	0.0576	0.6587	9.9894	0.1114
20.0626	0.8429	0.3009	0.1520	0.0230	0.0528	0.0460	0.5410	9.6788	0.1876

\*\*\*\*\*Averaged Values\*\*\*\*\*  
 20.8109 1.0201 0.3122 0.1832 0.0238 0.0578 0.0480 0.7447 9.8715 0.2859

wsnLocalize. Mario L. Ruz (mario.ruz@uco.es). Localization algorithm used: ARAP  
 Nodes = 200 | Anchors = 4 | noise = 20.0000 | R = 1.5000 | AvgConnectivity = 12.21

```

=====
Err(%R)  maxErr  meanErr  stdErr  Err    stress  stresst  FrobNorm  time  ErrorNode
26.6216  1.3326  0.3993  0.2693  0.0305  0.0491  0.0476  0.6825  9.8655  0.5633
19.8680  0.8721  0.2980  0.1431  0.0228  0.0422  0.0407  0.5077  9.8286  0.2095
14.8411  0.8085  0.2226  0.1249  0.0170  0.0467  0.0375  0.6909  9.9676  0.3226
17.0626  0.8520  0.2559  0.1208  0.0196  0.0425  0.0425  0.6008  9.8466  0.0983
17.6165  0.6808  0.2642  0.1324  0.0202  0.0492  0.0361  0.7277  9.9469  0.3610
25.6647  1.0641  0.3850  0.1793  0.0294  0.0666  0.0501  0.7503  9.9575  0.2866
29.0158  0.8732  0.4352  0.1754  0.0333  0.0562  0.0492  0.6347  9.6546  0.6466
18.5341  1.3470  0.2780  0.1961  0.0212  0.0609  0.0508  0.9591  9.7736  0.0977
20.7119  0.8749  0.3107  0.1599  0.0237  0.0463  0.0440  0.6524  9.8431  0.4383
20.7410  0.9159  0.3111  0.1413  0.0238  0.0454  0.0373  0.6212  9.8881  0.4386
19.4618  0.8009  0.2919  0.1492  0.0223  0.0549  0.0454  0.6798  9.8002  0.2826
16.2859  0.8406  0.2443  0.1552  0.0187  0.0531  0.0426  0.5589  9.6568  0.2432
15.2779  0.9652  0.2292  0.1382  0.0175  0.0411  0.0353  0.6504  9.7657  0.2292
14.6413  0.6010  0.2196  0.1287  0.0168  0.0454  0.0349  0.7305  9.9468  0.1746
28.6155  1.2223  0.4292  0.1589  0.0328  0.0588  0.0476  0.7935  9.9127  0.3960
28.7109  1.1036  0.4307  0.1939  0.0329  0.0588  0.0516  0.6332  9.7033  0.4999
26.3187  1.3361  0.3948  0.2031  0.0302  0.0543  0.0449  0.7234  9.8775  0.2379
28.5344  0.9855  0.4280  0.1788  0.0327  0.0639  0.0569  0.6441  9.8277  0.4845
28.8192  1.8266  0.4323  0.3020  0.0330  0.0807  0.0548  0.6902  9.6656  0.2595
20.8507  1.3672  0.3128  0.2059  0.0239  0.0567  0.0444  0.5928  10.0663  0.4414
23.7027  2.9450  0.3555  0.4739  0.0272  0.0840  0.0748  0.9342  9.9763  0.2274
17.5368  0.7337  0.2631  0.1599  0.0201  0.0524  0.0428  0.5985  9.9027  0.3138
18.9707  0.9514  0.2846  0.1595  0.0217  0.0565  0.0443  0.7555  9.8157  0.2386
19.6906  0.8638  0.2954  0.1525  0.0226  0.0610  0.0417  0.9377  9.9395  0.4976
17.4752  0.9321  0.2621  0.1547  0.0200  0.0522  0.0431  0.6665  9.9821  0.1801
71.7037  3.7963  1.0756  0.7051  0.0822  0.1843  0.1649  0.7854  9.8898  0.9393
18.2711  0.7544  0.2741  0.1447  0.0209  0.0528  0.0420  0.8281  9.9809  0.1771
22.0390  1.1757  0.3306  0.1944  0.0253  0.0577  0.0478  0.6816  9.9044  0.2961
19.3870  0.8235  0.2908  0.1689  0.0222  0.0569  0.0430  0.7107  9.9860  0.1068
21.8955  1.0222  0.3284  0.1774  0.0251  0.0517  0.0458  0.7399  9.9285  0.4085
17.9682  0.7705  0.2695  0.1477  0.0206  0.0531  0.0451  0.6890  10.2580  0.1775
19.5674  0.7948  0.2935  0.1477  0.0224  0.0482  0.0335  0.8280  9.9837  0.4323
29.6142  1.6069  0.4442  0.2026  0.0339  0.0609  0.0541  0.6173  9.9201  0.6022
27.3759  3.1663  0.4106  0.3787  0.0314  0.0775  0.0703  0.6398  9.6494  0.3384
14.4841  0.6485  0.2173  0.1346  0.0166  0.0458  0.0412  0.5831  9.9276  0.1201
16.0415  1.6128  0.2406  0.1868  0.0184  0.0559  0.0450  0.7544  9.9788  0.0824
19.5254  0.9333  0.2929  0.1562  0.0224  0.0498  0.0435  0.7378  10.0061  0.3389
20.2544  1.0700  0.3038  0.2054  0.0232  0.0544  0.0433  0.7116  10.2139  0.2337
15.4528  0.9967  0.2318  0.1362  0.0177  0.0456  0.0368  0.6732  9.8421  0.1066
21.5326  2.1083  0.3230  0.3134  0.0247  0.0721  0.0557  0.7222  9.7486  0.2119

*****Averaged Values*****
22.2671  1.2094  0.3340  0.1989  0.0255  0.0586  0.0488  0.7030  9.8907  0.3185
  
```