



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Análisis de sistemas de detección e identificación de personas en ambiente de laboratorio utilizando radar y RFID

Sebastián Orjuela Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación.
Manizales, Colombia
2020

Análisis de sistemas de detección e identificación de personas en ambiente de laboratorio utilizando radar y RFID

Sebastián Orjuela Rodríguez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería - Automatización Industrial

Director:

Ph.D. Julio César García Álvarez

Línea de Investigación:

Propagación Electromagnética Aplicada

Grupo de Investigación:

Propagación Electromagnética Aplicada (PROPELA)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación.

Manizales, Colombia

2020

A mi abuelo Alfonso, por su increíble fortaleza.

A mis padres Sandra Liliana y Leonel Enrique, motivo de orgullo y de superación constante.

A mi hermana Marcela quien me apoya desde siempre.

Agradecimientos

Al profesor Julio César García Álvarez por su valiosa asesoría y tiempo dedicado en la dirección de esta tesis de maestría. A él muchas gracias por sus enseñanzas y principalmente por la confianza que depositó en mí.

A todos mis compañeros y compañeras del Laboratorio de Electricidad y Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. De todos sin excepción agradezco su apoyo y colaboración.

A mi universidad, gracias por haberme permitido formarme en ella, gracias a todas las personas que fueron partícipes de este proceso, ya sea de manera directa o indirecta, fueron ustedes los responsables de realizar su pequeño aporte, que el día de hoy se ve reflejado en la culminación de mi maestría.

A mi familia que me ha enseñado que la vida es hermosa, y una de las principales características de esta hermosura es que la podemos compartir y disfrutar con quienes amamos, gracias por apoyarme en todo momento.

Resumen

En este trabajo de tesis se presenta un análisis de sistemas de identificación, localización y seguimiento de personas. Con el fin de medir el flujo de usuarios en las salas de trabajo del laboratorio de Electricidad y Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales de forma automatizada.

El sistema propuesto consta de tres partes fundamentales: (1) un sistema de radar de onda continua modulado en frecuencia (FM-CW) con arquitectura MISO que opera a una frecuencia de entre 60 y 64 GHz el cual se encarga de la identificación de personas; (2) un Sistema de RFID de UHF con frecuencia de operación de entre 902 y 928 MHz que lee tarjetas RFID de tipo microstrip que se encarga del conteo de usuarios y (3) un algoritmo de IA basado en Lógica Difusa que se encargará de relacionar la información recibida del radar y el RFID y con la cual tomarán decisiones que le permitan al Laboratorio hacer una medición real del flujo de usuarios en sus salas y facilitará la presentación de estos al momento de realizar informes de gestión.

Palabras clave: Radar FM-CW, Radar UWB, RFID, Identificación de personas, RFID, Inteligencia Artificial .

Analysis of detection systems and identification of people in the environment laboratory using radar and RFID

Abstract In this thesis work, an analysis of systems for identifying, locating and tracking people is presented. In order to measure the flow of users in the work rooms of the Electricity and Electronics laboratory of the National University of Colombia - Manizales campus in an automated way.

The proposed system consists of three fundamental parts: (1) a frequency modulated continuous wave (FM-CW) radar system with MISO architecture that operates at a frequency between 60 and 64 GHz which is responsible for the identification of people ; (2) a UHF RFID System with an operating frequency between 902 and 928 MHz that reads microstrip RFID cards that is in charge of counting users and (3) an AI algorithm based on Fuzzy Logic that will be in charge of relating the information received from the radar and RFID and with which they will make decisions that allow the Laboratory to make a real measurement of the flow of users in their rooms and will facilitate their presentation when making management reports.

Keywords: FM-CW Radar, UWB Radar, RFID, People Identification.

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Lista de símbolos	XIII
1 Introducción	3
2 Estado del arte	5
2.1 Conteo de personas en el LEE	7
2.2 Sistemas de radar	7
2.2.1 Características del radar	8
2.2.2 Ecuación clásica de radar	11
2.2.3 Clasificación de los sistemas de radar	13
2.3 Sistemas de Detección de personas	17
2.3.1 Bandas de frecuencia utilizadas en radares de detección	17
2.3.2 Tipos de modulación	18
2.3.3 Detección e Identificación por Radiofrecuencia (RFID)	20
2.3.4 Detección e Identificación de personas	24
3 Metodología	27
3.1 Marco experimental	27
3.2 Determinación de los parámetros del sistema de radar	28
3.2.1 Cálculo del número de objetivos a identificar	28
3.2.2 Densidad de Identificación	29
3.3 Determinación de parámetros del sistema de RFID	31
3.4 Mapas de identificación	31
4 Resultados y Discusión	32
4.1 Escenarios evaluados	32
4.1.1 Usuarios registrados localizados en la mesa de trabajo asignada	32
4.1.2 Usuario no registrado que porta una etiqueta RFID	33
4.1.3 Usuarios registrados que no hacen uso de la mesa de trabajo	34
4.2 Sistema de radar	34
4.2.1 Radar FM-CW	34

4.2.2	Radar IR-UWB	37
4.3	Comparación de los sistemas de radar	38
4.4	Sistema RFID	39
4.4.1	Lector RFID	39
4.4.2	Etiqueta	39
5	Conclusiones y Recomendaciones	40
5.1	Conclusiones	40
5.2	Recomendaciones	40
	Bibliografía	42

Lista de Símbolos

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Nombre Unidad
A	Área de recepción	m^2	metro cuadrado
A_e	Área efectiva de recepción	m^2	metro cuadrado
G	Ganancia	adimensional	
G_t	Ganancia de la etiqueta RFID	adimensional	
G_T	Ganancia de la antena del lector	adimensional	
K_a	Eficiencia	adimensional	
L_t	Factor de pérdidas	dB	decibeles
M	Factor de modulación	adimensional	
P	Potencia	W	watt
P_E	Potencia Recibida	W	watt
P_{iso}	Potencia Isotrópica	W	watt
P_r	Potencia Reflejada	W	watt
P_r^J	Potencia Reflejada por la etiqueta RFID	W	watt
P_{sen}	Sensibilidad de Potencia	W	watt
P_t	Potencia Total emitida por el Radar	W	watt
P_t^J	Potencia Total emitida por el lector de RFID	W	watt
R	Rango	m	metro
R_1	Distancia entre la antena y el objetivo	m	metro
R_2	Distancia entre el objetivo y la antena	m	metro
$ s ^2$	Coeficiente de reflexión	adimensional	
$S_{activacion}$	Radio máximo de activación de la antena RFID	m	metro
S_{Datos}	Radio máximo de lectura de la etiqueta RFID	m	metro

Símbolo	Término	Unidad SI	Nombre Unidad
S_e	Densidad de Potencia en el sitio de recepción	$\frac{W}{m}$	watt por metro
S_g	Densidad de Potencia Direccional	$\frac{W}{m}$	watt por metro
S_u	Densidad de potencia omnidireccional	$\frac{W}{m}$	watt por metro
v	Velocidad relativa	$\frac{m}{s}$	metro por segundo
X_P	Coefficiente de Polarización	adimensional	
Z_a	Impedancia de entrada de antena	Ω	Ohms
$Z_{etiqueta}$	Impedancia de la etiqueta	Ohms	

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Nombre Unidad
σ	Sección Transversal Variable del Radar	m^2	metro cuadrado
λ	Longitud de Onda	m	metro
τ	Coefficiente de transmisión de potencia	adimensional	
τ_R	Tiempo de reflexión	s	segundo
Φ	Posición Angular	rad	Radián

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>AI</i>	Artificial Intelligence
<i>CPMA</i>	Circularly Polarized Microstrip Antenna
<i>CW</i>	Continuous Wave
<i>FMCW</i>	Frequency Modulated Continuous Wave
<i>HF</i>	High Frequency
<i>LADAR</i>	Laser Radar
<i>LF</i>	Low Frequency
<i>LIDAR</i>	Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging
<i>LPS</i>	Local Position System
<i>MIMO</i>	Multiple Input Multiple Output

Abreviatura Término

<i>MISO</i>	Multiple Input Simple Output
<i>MTI</i>	Moving Target Indication
<i>O</i>	Objetivo
<i>PPM</i>	Pulse Position Modulation
<i>PAM</i>	pulse-amplitude modulation
<i>RADAR</i>	Radio Detection and Ranging
<i>RCS</i>	Radar Cross Section
<i>RFID</i>	Radio Frequency Identification
<i>Rx</i>	Recepción
<i>SIMO</i>	Simple Input Multiple Output
<i>SISO</i>	Simple Input Simple Output
<i>Tx</i>	Transmisión
<i>UHF</i>	Ultra High Frequency
<i>UWB</i>	Ultra Wide Band

Lista de Figuras

2-1.	Diagrama de bloques del sistema propuesto	6
2-2.	Elementos básicos de un sistema de radar	8
2-3.	Reflexión e Interferencia Electromagnética	8
2-4.	Ganancia de una antena direccional y una isotrópica	9
2-5.	Área efectiva de una antena	10
2-6.	Arquitecturas de detección	14
2-7.	Tipos de radar	16
2-8.	Sistema multiestático de seguimiento basado en arquitectura MISO	18
2-9.	Esquema de un sistema RFID	21
2-10.	Identificación de objetivos por termografía	26
3-1.	Densidad de usuarios por mesa del LEE	29
3-2.	Sistema de Radar+RFID	30
4-1.	Usuarios registrados en la mesa correcta	32
4-2.	Usuario nuevo no identificado en la mesa de trabajo	33
4-4.	Identificación de un usuario adicional	34
4-5.	Sistema de radar IWR6843	35
4-6.	Diagrama de procesos radar IWR6843	36
4-7.	Sistema de radar X4M300 [x4m, 2019]	37
4-8.	Lector RFID	39
4-9.	Etiqueta RFID	39

Lista de Tablas

2-1.	Pérdidas promedio de los sistemas de radar	13
2-2.	Bandas de frecuencia de radares de detección	17
2-3.	Bandas de frecuencia de las etiquetas RFID	22
3-1.	Áreas de Experimentación del LEE	27
4-1.	Especificaciones del radar IWR6843	35
4-2.	Especificaciones del radar X4M300	37
4-3.	Tabla comparativa - Sistemas de radar	38

1 Introducción

En lugares como aeropuertos, industrias con líneas de ensamble, salones de clase, hospitales, carreteras, entre otros, se utiliza la detección automatizada para mantener la seguridad de las personas que las transitan, mediante sistemas de detección e identificación de personas u objetos. Estos sistemas han evolucionado en los últimos 15 años, gracias a tecnologías como la termografía y el radar. La detección mediante termografía utiliza cámaras térmicas que registran puntos de calor en movimiento; no obstante, la calibración de la cámara y el proceso de adquisición de las imágenes térmicas ha presentado inconvenientes debido a sus requerimientos de cómputo [de Oca and Flores, 2021].

El Laboratorio de Electricidad y Electrónica (LEE) de la Universidad Nacional de Colombia es la pista de aterrizaje natural para los proyectos de investigación y extensión referentes a la Cuarta Revolución Industrial (4.0); en ella el Grupo de Trabajo Académico (GTA) en Propagación Electromagnética Aplicada (PROPELA), ante la necesidad de implementar proyectos que permitan la apropiación de nuevas tecnologías por parte de toda la comunidad, plantea la opción de modernizar la forma de llevar el registro de usuarios que utilizan las mesas de trabajo: a saber, el registro de usuarios se realiza de forma manual, y se asume que éstos van a usar la mesa asignada. Sin embargo, la lejanía entre la oficina administrativa donde ellos se registran y la mesa de trabajo, hace necesario un mecanismo de verificación. Además, debido al creciente volumen de prácticas, es necesario agilizar o automatizar en proceso de registro antes mencionado. Sin embargo, las características de la sala no permiten un soporte únicamente basado en la implementación de técnicas de IA; mientras que posibilitan la implementación de sistemas de identificación por etiquetas en Radio-Frecuencia denominada RFID, que trabajan bajo los mismos principios de los sistemas de radar.

Este trabajo presenta el análisis de un sistema de detección y seguimiento de personas por medio de radar y RFID, con el fin de determinar las características de registro de usuarios de las salas del LEE; se realiza primero un estudio comparativo de dos de las técnicas más empleadas para la detección y seguimiento de personas por medio de radar, para así establecer las condiciones adecuadas de registro de usuarios y así poder determinar cual técnica de detección requiere de soporte de sistemas RFID para dar solución a este problema.

En el capítulo 2 se realiza una contextualización del tema del trabajo introduciendo brevemente la historia del radar y la RFID, centrándose en sistemas de identificación y detección de personas. El capítulo 3 se discutirán los parámetros y escenarios que a través de los cuales se analizará el sistema de radar y el sistema de RFID que al unirse permiten la identificación y seguimiento automatizado de personas. El capítulo 4 presenta los resultados obtenidos del análisis y presenta alternativas para el sistema de radar a implementar; además presenta los parámetros para el sistema de RFID que consiste de lo siguiente: (1) un sistema de radar que posee una medición precisa de distancias, velocidades relativas de las personas que permite la detección e identificación de objetos y (2) un dispositivo de identificación de soporte usando RFID que permite conteo de personas. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo y se muestran las proyecciones que se tienen para el sistema de Radar-RFID.

2 Estado del arte

Con la invención del radio de onda continua (CW), inicia la era de la comunicación por radio moderna. El término RADAR deriva del acrónimo inglés Radio Detection and Ranging, el dispositivo fue patentado por el físico escocés Robert Alexander Watson-Watt en 1935 [Watson, 1935]. De forma coyuntural con la Segunda Guerra Mundial, los fabricantes de radares apoyaron los sistemas de reconocimiento aéreo, naval y de artillería antiaérea. Años después de finalizar la guerra, institutos como el MIT trasladan las aplicaciones militares sobre el radar hacia aplicaciones civiles, tomando ventaja de desarrollos como el transistor, el circuito integrado, el microprocesador y protocolos en redes de comunicación. De esta forma, ellos pudieron implementar sistemas de radar con señales más claras, limpias y fáciles de interpretar. Comienza así la incursión del radar en aplicaciones de detección como el monitoreo de densidad de tráfico de automóviles en áreas urbanas [Baczyk et al., 2017].

A pesar de las ventajas que estaban ofreciendo en esa época los sistemas de radar en la detección de objetos y personas, aumentó la necesidad de mejorar la precisión y la velocidad en la detección, desarrollándose así nuevas técnicas paralelas al radar. En 1998 se desarrolló un sistema en tiempo real denominado Hydra, el cual permite detectar un número determinado de personas de un grupo, empleando la técnica de visión artificial de análisis de siluetas registradas mediante cámaras digitales [Haritaoglu et al., 1999]; en 2005, se desarrollaron técnicas de detección basadas en la integración de imágenes tomadas con cámaras digitales de vídeo [Muñoz-Salinas et al., 2007]. En el año 2014, se desarrollan técnicas más eficientes de detección y seguimiento de personas a partir de cámaras térmicas; sin embargo, esta última técnica paralela al radar requiere equipos calibrados para la adquisición y procesamiento de este tipo de imágenes, y para definir el modelo de transferencia de calor a partir de análisis de las imágenes de la superficie, dado que allí se presenta una fuerte dispersión térmica [Ramírez Roza, 2013, Fandiño Toro, 2012]. Por lo anterior, los sistemas termográficos requieren de una capacidad importante tanto de software como de hardware para lograr buenos resultados [Gaszczak et al., 2011]; por ejemplo al emplearlas a bordo de plataformas aéreas en investigaciones de búsqueda y rescate [Portmann et al., 2014], el hardware no permite modificaciones o instalación de equipos de cómputo de alto proceso.

Dados los inconvenientes de detección usando cámaras termográficas, se ha retomado el uso del radar para mejorar la identificación y el seguimiento de objetos al menos en entornos interiores. Así, los radares han empezado a combinarse junto con sensores de procesamiento autónomo o redes sensóricas que consisten en la interconexión de sensores sin necesidad de cableado [Wetzel et al., 2018, Álvarez Aparicio et al., 2019]. Sin embargo, estos sistemas no son óptimos para el seguimiento de largo alcance, debido a que generan muchos errores durante la localización y el seguimiento en interiores; por ejemplo las señales de detección de imágenes láser (LIDAR) y la detección por láser (LADAR) se degradan por interferencia ambiental [Ramírez Castillo, 2009]. Las tecnologías de Banda Ultra Ancha (UWB) y onda continua modulada en frecuencia (FMCW), son por consiguiente posibles soluciones para la detección, localización y seguimiento de objetos en ambientes interiores requeridos para el problema [Nguyen and Pyun, 2015, Sharafi et al., 2011]. Para mejorar el índice de detección, se usa como soporte una red RFID que es un sistema de almacenamiento y recuperación de datos remoto que usa dispositivos denominados etiquetas, tarjetas o transpondedores [Landt, 2005, Tu et al., 2018]. RFID es un termino derivado de Radio Frequency Identification (identificación por radiofrecuencia) [Choudhury and Swarnabha, 2018]. Los sistemas de posicionamiento RFID poseen ventajas de un tamaño pequeño y cálculo de posición rápida, en comparación con las técnicas impementadas sobre los estándares IEEE802.15 (Bluetooth), IEEE802.15.4 (Zigbee) o IEEE802.11 (Wi-Fi) [Zhou, 2014]. También cubre la necesidad de rastrear mejor el inventario y las materias primas en empresas minoristas y manufactureras [Shaari and Nor, 2017]. La capacidad de posicionamiento **RFID** se ha convertido en una de sus principales fortalezas que con el paso del tiempo la ha convertido en una herramienta versátil que reduce el tiempo de procesamiento para la identificación de objetos en la termografía y que puede ser utilizada tanto en ambientes académicos [Chen et al., 2003], tecnologicos [Fortin-Simard et al., 2015] y militares [Kelvie and Kraft, 2002].

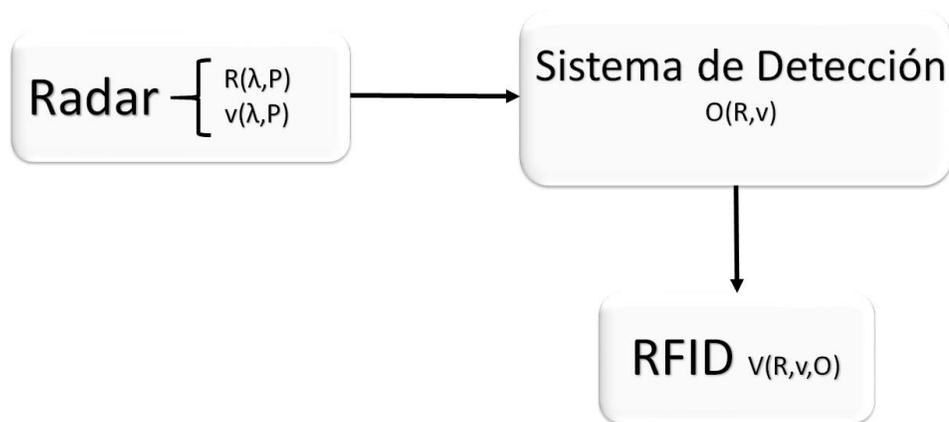


Figura 2-1: Diagrama de bloques del sistema propuesto

2.1. Conteo de personas en el LEE

En la actualidad, para presentar sus informes de gestión el LEE necesita medir la cantidad de usuarios atendidos en cada una de las salas de trabajo, para ello se lleva a cabo el siguiente proceso:

1. **Préstamo de mesa de trabajo.** En esta etapa el estudiante debe diligenciar un formato de forma manual donde se indique el nombre y documento de identidad de cada una de las personas que conforman el grupo de trabajo y además debe indicar la mesa de trabajo a utilizar.
2. **Distribución por día.** Una vez devuelta y revisada la mesa de trabajo utilizada, los formatos se remiten a un armario de madera que cuenta con 31 divisiones donde se deben organizar por el día del mes en que la mesa de trabajo fue utilizada.
3. **Sistematización de Datos.** Cada quince días un funcionario del LEE retira las hojas de préstamo del armario, las organiza y las sube al sistema en el cual se especifica el tipo de práctica y el número de prácticas y usuarios por mesa de trabajo, entre otras.
4. **Disposición Final.** Finalmente, una vez sistematizados todos los datos pertenecientes a un mes de operación del LEE los formatos de préstamo se organizan y se guardan en una caja perteneciente al archivo facilitativo de la dependencia.

El proceso anteriormente descrito puede tardar entre 3 y 4 horas por cada mes sistematizado y debe hacerse de forma regular. Sin embargo, al implementar un sistema automatizado se puede adelantar este proceso en tiempo real con lo cual no solo se podría establecer el flujo de usuarios sino también establecer tiempos de mantenimiento, calibración y reemplazo de equipos.

2.2. Sistemas de radar

El Radar es un sistema cuya función consiste en detectar la posición y velocidad de un objeto, esta formado de un transmisor y un receptor de ondas electromagnéticas: el transmisor envía la onda con una potencia P_t hacia un objetivo y el receptor recibe la onda con potencia p_r , resultado del reflejo en el objetivo (Figura 2-2). La forma básica de radar consiste de una antena transmisora de ondas de radio (radiación electromagnética generada por un oscilador); y un detector que recibe una porción de la señal refractada por este en todas direcciones [Lopez, 2011]; parte de esta señal llega de vuelta al radar, donde la antena receptora la recibe y la envía al receptor, donde se procesa para detectar la presencia del objeto, extrayéndose su localización a partir de la longitud de onda y la relación de potencia recibida $R(\lambda, P)$ y velocidad relativa $v(\lambda, P)$].

En teoría, la distancia al objeto se determina mediante la medición del tiempo empleado por el pulso desde que éste es emitido hasta que se recibe de vuelta como se ilustra en la Figura 2-2, por lo que ésta es una función de la potencia recibida y la longitud de onda. La dirección o posición angular del objeto se determina a partir de la dirección de llegada del frente de onda reflejado [Nguyen and Pyun, 2015, Choi et al., 2016]. Como se ilustra en la Figura 2-2.

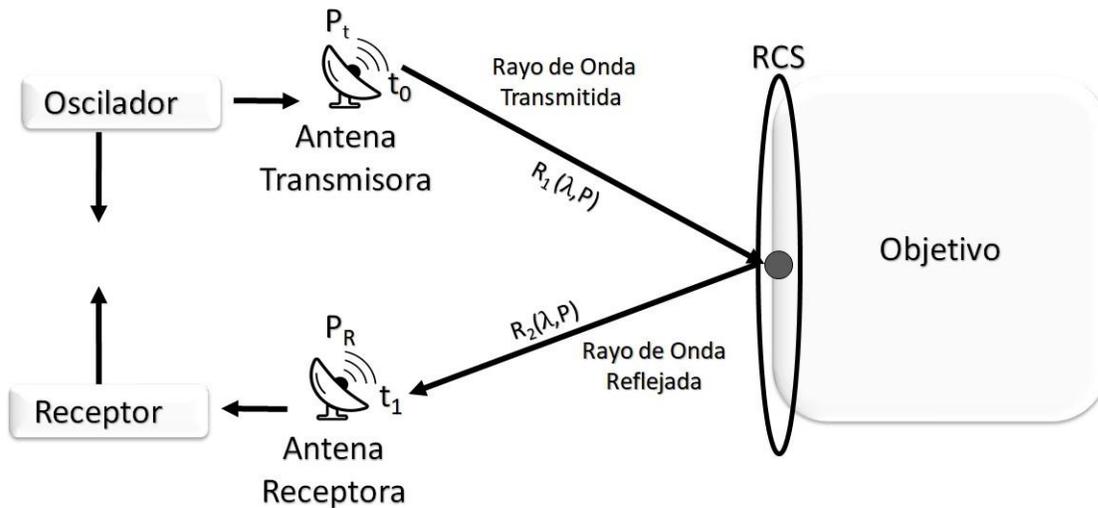


Figura 2-2: Elementos básicos de un sistema de radar

2.2.1. Características del radar

Las ondas electromagnéticas, a diferencia de las mecánicas, no necesitan un medio material para poder propagarse, pero si presentan propiedades similares como la reflexión [Ishimaru, 2017]. En sistemas de radar, la **reflexión** (Figura 2-3) se presenta cuando una onda electromagnética choca con un objetivo y parte de la potencia se refleja en una nueva dirección de acuerdo con las propiedades del objetivo (Figura 2-2) [Lekner, 2018].

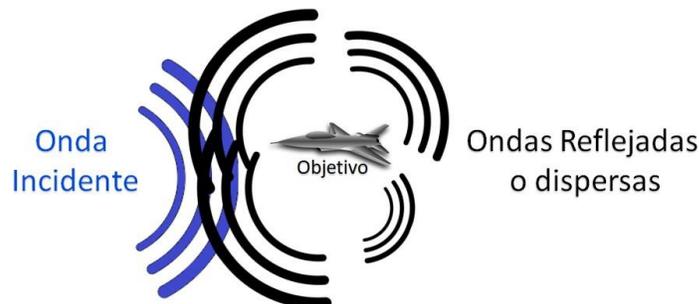


Figura 2-3: Reflexión e Interferencia Electromagnética

A continuación se presentan los siguientes conceptos que nos llevan a deducción de $R(\lambda, P)$ y $v(\lambda, P)$. Para ello se asume que las ondas electromagnéticas se propagan bajo condiciones ideales, es decir sin dispersión. Por tal motivo, las áreas con la misma densidad de energía forman esferas alrededor de la antena transmisora (Figura 2-4)[Chernyak, 2018].

En adelante reduciremos el término densidad de potencia a densidad. Se considera la **densidad isotrópica** S_u como la relación entre la potencia transmitida P_t y un radio R_1 (Figura 2-4) que equivale a la distancia entre la antena y el objetivo (O), asumiendo que esta densidad está uniformemente distribuida en una esfera de radio R_1 :

$$S_u = \frac{P_t}{4\pi * R_1^2} \quad (2-1)$$

Debido a que un segmento esférico emite radiación en todas las direcciones de forma homogénea (potencia de transmisión constante), si la potencia irradiada es redistribuida para proporcionar más radiación en una dirección, se produce un aumento en la densidad hacia dicha dirección (Figura 2-4).

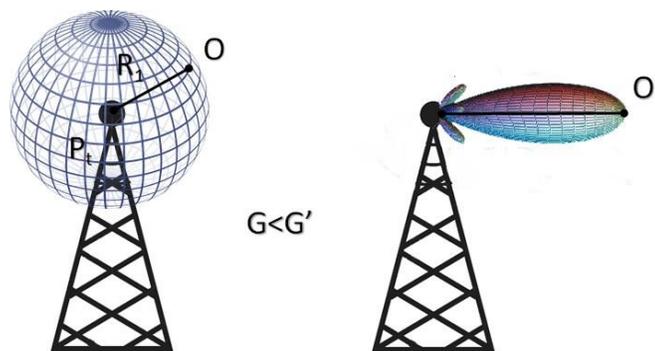


Figura 2-4: Ganancia de una antena direccional y una isotrópica

Este parámetro es llamado **ganancia** de antena G . La densidad direccional S_g dependiente de la ganancia es:

$$S_g = S_u * G \quad (2-2)$$

Así, la ganancia se calcula de la siguiente manera:

$$G = \frac{S_g}{S_u} \quad (2-3)$$

La detección de un objetivo no depende únicamente de la densidad irradiada hacia el objetivo, sino se debe tener en cuenta la cantidad de potencia reflejada desde el objetivo hacia el radar con el fin de definir la **Potencia Reflejada** P_r .

También, es necesario conocer la **sección transversal de radar** o RCS (Figura 2-2) por sus siglas en inglés (Radar Cross-Section) que es una medida de la porción de potencia que refleja el objeto [Dybdal, 1987] y está definida por la Ecuación 2-4.

$$\sigma = 4\pi * R_1^2 * G \quad (2-4)$$

Un RCS mayor indica que un objeto es más fácil de detectar, ya que la energía reflejada es proporcional al área del objeto [Chen, 2008]. Por tanto, la potencia reflejada P_r en un radar depende de la densidad S_u , la ganancia G de la antena y la sección transversal del radar σ :

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi * R_1^2} * G * \sigma \quad (2-5)$$

Debido a que un objetivo posee una potencia reflejada P_r , éste se presenta como un transmisor ante el receptor, haciendo válida la Ecuación 2-2 para este caso. Luego, la potencia la **Potencia Recibida** dependerá de la potencia reflejada dado que la reflexión se da en condiciones similares a la potencia transmitida, el rango R_2 equivale entonces a la distancia entre el objetivo y la antena. La densidad producida en el receptor S_e , está dada por:

$$S_e = \frac{P_r}{4\pi * R_2^2} \quad (2-6)$$

El **área efectiva de recepción** se deriva del hecho de que una antena sufre pérdidas, por lo tanto se debe tener en cuenta su eficiencia K_a . A partir de la geometría se define un área de recepción A y por tanto un área efectiva de recepción se expresa de la siguiente manera:

$$A_e = A * K_a \quad (2-7)$$

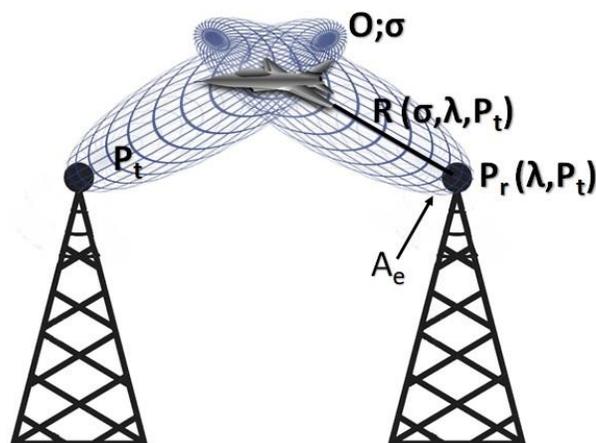


Figura 2-5: Área efectiva de una antena

En el receptor del radar, la potencia recibida P_e depende de la densidad de la potencia en el sitio de recepción S_e y el área efectiva de la antena receptora A_e (2-5).

$$P_{e1} = S_e * A_e \quad (2-8)$$

2.2.2. Ecuación clásica de radar

La ecuación característica de radares inicia con el cálculo de la potencia en el receptor reemplazando La Ecuación 2-7 en la Ecuación 2-8:

$$P_{e2} = S_e * A * K_a \quad (2-9)$$

La potencia en el receptor de acuerdo con la distancia al transmisor, se obtiene reemplazando la Ecuación 2-6 en la Ecuación 2-9.

$$P_{e2} = \frac{P_r}{4\pi * R_2^2} * A * K_a \quad (2-10)$$

El próximo paso es relacionar las ondas transmitidas y reflejadas; ya que asumimos que ambas recorren la misma distancia (los rangos R_1 y R_2 son iguales) las potencias también lo serán ($P_e = P_{e1} = P_{e2}$). Por lo tanto podemos reemplazar la Ecuación 2-5 en la Ecuación 2-10 obteniendo:

$$P_e = \frac{P_t * G * \sigma}{(4\pi)^2 * R^4} * A * K_a \quad (2-11)$$

Adicionalmente, la ganancia de transmisión G de una antena puede escribirse en función del área efectiva A_e y de la longitud de onda (λ) que es la distancia que recorre una perturbación periódica que se propaga por un medio [Lekner, 2018].

$$G = \frac{4\pi * A_e}{\lambda^2} \quad (2-12)$$

El área de recepción A se obtiene reemplazando la Ecuación 2-7 en la Ecuación 2-12:

$$A = \frac{\lambda^2 * G}{4\pi * K_a} \quad (2-13)$$

La potencia de recepción del radar se calcula reemplazando la Ecuación 2-13 en la Ecuación 2-11:

$$P_e = \frac{P * G^2 * \sigma * \lambda^2}{(4\pi)^3 * R^4} \quad (2-14)$$

Finalmente, se obtiene la ecuación clásica de radar [Narayanan et al., 2014], despejando el rango R en la ecuación 2-11

$$R = \sqrt[4]{\frac{S * P * G^2 * \lambda^2 * \sigma}{P_e * (4\pi)^3}} \quad (2-15)$$

De esta forma, obtenemos el valor de distancia R .

Ejemplo 1: El sistema de radar IWR6843 aplica una onda de en la banda 60-64GHz, a una potencia de 10dB y una longitud de onda $\lambda = 9\text{mm}$ a un objeto con RCS (-8dB) y ganancia de antenas de transmisión y recepción de 97 dB cada una, éste es detectado con un radio $R=12\text{m}$ [Reiher, 2012, Schubert et al., 2013]

Radio Máximo

El máximo radio ($\max|R|$) a la que un objeto puede ser detectado, ocurre cuando la potencia recibida del eco de la señal, es igual a la mínima señal detectable ($\min|P_e|$), cualquier potencia más pequeña, será absorbida por el ruido en trayectoria hacia el receptor [Liang, 2016]. Por tal motivo, la ecuación 2-15 queda definida de la siguiente manera:

$$\max|R| = \sqrt[4]{\frac{P_t * G^2 * \lambda^2 * \sigma}{\min|P_e| * (4\pi)^3}} \quad (2-16)$$

Ejemplo 2: El máximo radio que podemos obtener para el radar IWR6843 del Ejemplo 1 es de 6.3m.

Pérdidas de un sistema de radar

El cálculo de la ecuación de radar se consideró bajo condiciones ideales. Sin embargo, en la práctica existen pérdidas que reducen considerablemente su eficacia (Tabla 2-1). En la ecuación del radar se debe incluir entonces un factor de pérdida L_t donde se incluyen pérdidas de atenuación (Transmisión y recepción), pérdidas de fluctuación durante el reflejo, pérdidas atmosféricas (propagación y atenuación) y pérdidas internas (Geometría, filtros, etc.), por tanto una ecuación más acertada a un escenario práctico será:

$$\max|R| = \sqrt[4]{\frac{P_t * G^2 * \lambda^2 * \sigma}{\min|P_e| * (4\pi)^3 * L_t}} \quad (2-17)$$

Debido a que las potencias reflejadas, transmitidas y las de pérdida suelen expresarse en decibeles (dB), se debe ajustar matemáticamente la ecuación 2-17 de la siguiente manera:

$$10 \log(\max|R|) = 10 \log \sqrt[4]{\frac{P_t * G^2 * \lambda^2 * \sigma}{\min|P_e| * (4\pi)^3 * L_t}}$$

$$10 \log(\max|R|) = 10 \frac{1}{4} \log \frac{P_t * G^2 * \lambda^2 * \sigma}{\min|P_e| * (4\pi)^3 * L_t}$$

$$10 \log(\max|R|) = 10 \left[\frac{1}{4} \log(P_t) + \frac{1}{2} \log(G) + \frac{1}{2} \log(\lambda) + \frac{1}{4} \log(\sigma) - \frac{1}{4} \log(\min|P_e|) - \frac{3}{4} \log(4\pi) - \frac{1}{4} \log(L_t) \right] \quad (2-18)$$

A partir del último factor de la ecuación 2-18 que hace referencia a las pérdidas del radar, se presentan en la Tabla 2-1 los valores promedio de las pérdidas que afectan a un sistema de radar.

Tipo de pérdida	Pérdida en dB
Amplitud de rayo	1.2
Atmosférica	1.2
Forma del Haz	1.3
Filtro	1.2
Fluctuación	7.8
Integración	3.2
Linea Receptora	1
Linea Transmisora	1
Procesamiento de señales	3

Tabla 2-1: Pérdidas promedio de los sistemas de radar.

Ejemplo 3: De acuerdo con la ecuación 2-17, el radar del ejemplo 1 posee un factor de pérdida de $L_t = 14\text{dB}$ donde se consideran pérdidas atmosféricas, de transmisión, de recepción, de fluctuación y de procesamiento de señales (Figura 2-1), su rango de detección máximo es de 14.2m.

2.2.3. Clasificación de los sistemas de radar

Como se observa en la Tabla 2-1 existe una gran variedad de factores que producen pérdidas de potencia. Estas pérdidas varían de acuerdo a las características de los objetivos y al número de transmisores y receptores. Por lo tanto, existen diferentes técnicas de radar que se pueden clasificar en los siguientes tipos(1) según el número de antenas, (2) según el tipo de objetivo y (3) según su finalidad.

Según el número de antenas. Existen dos arquitecturas fundamentales en las que se basan los sistemas de comunicación. La arquitectura SISO (Figura 2-6a) que opera solo con un transmisor y un receptor[Zhou et al., 2018] y la arquitectura MIMO (Figura 2-6b) que emplea múltiples transmisores y receptores distribuidos alrededor del espacio y que se aplica a sistemas de detección e identificación, sistemas de comunicación Wifi y WiMax[Haimovich et al., 2008, Hanzo et al., 2013].

De la combinación de los sistemas SISO y MIMO han surgido nuevas arquitecturas como SIMO (Figura 2-6c) que opera con un transmisor y múltiples receptores [Friedlander, 2009, Vaidyanathan and Pal, 2009] y MISO (Figura 2-6d) que basa su funcionamiento en múltiples antenas emisoras y un solo receptor [Stralka et al., 2011].

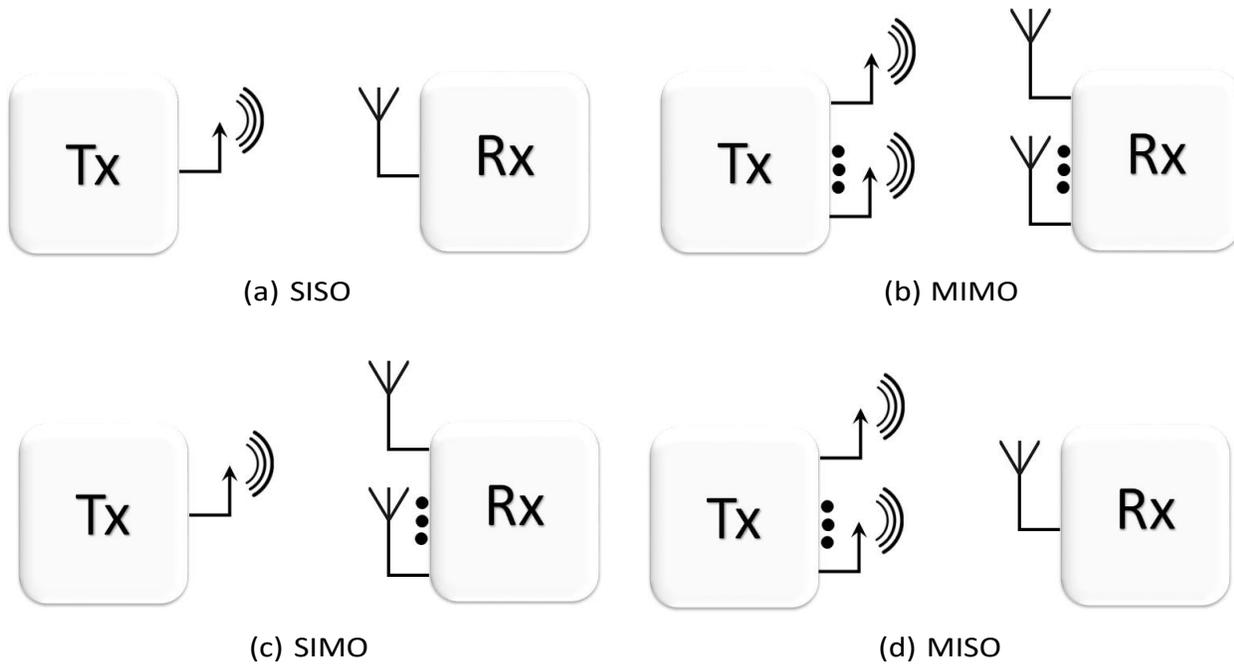


Figura 2-6: Arquitecturas de detección

De acuerdo con lo anterior, los sistemas de radar se clasifican según su número de antenas en los siguientes:

- **Radar Monoestático:** Se caracteriza por utilizar únicamente arquitectura SISO, lleva a cabo la transmisión y la recepción en la misma antena (Figura 2-7a). En sistemas de detección genera una desventaja y es que la señal entrante suele interferir con la señal recibida por la antena, su rango es determinado por la Ecuación 2-9, generalmente es utilizado en sistemas de radar de onda continua (CW) [Prabowo and Zulkifli, 2017].
- **Radar Biestático:** Es la configuración típica de un radar (Figuras 2-7b y 2-7c), se caracteriza por utilizar una arquitectura SISO de dos antenas, una para la transmisión y otra para la recepción. La distancia entre emisor y receptor es del orden de la distancia comparable a la distancia al objetivo previsto [Yan et al., 2008]. Este tipo de radar presenta desventajas de complejidad del sistema y mala cobertura a baja altura lo que dificulta su implementación en sistemas de identificación, debido a la necesidad de tener línea de visión desde varios lugares.

- **Radar Multiestático:** Es un sistema que contiene múltiples subsistemas de radar (estáticos y/o biestáticos), por tal motivo puede configurarse con arquitecturas MISO, SIMO o MIMO que permiten tener una zona compartida de cobertura; en este tipo de sistema los datos se fusionan y permiten que se vean simultáneamente diferentes aspectos de un objetivo [Varshney, 2001]. En la Figura 2-7d se ilustra un sistema de radar de este tipo.

Según el tipo de objetivo. En este trabajo, se consideran las personas como el objetivo. Dada las condiciones del objeto, el sistema de radar puede clasificarse como:

- **Radar Primario:** También se conoce como radar convencional; identifica objetos detectando reflexiones de señales de radiofrecuencia en dichos objetos. En la Figura 2-7a se ilustra un sistema de radar de este tipo.
- **Radar Secundario:** El radar secundario mantiene una interacción base radar y objetivo, donde codifica mensajes en forma de pulsos modulados en amplitud o fase, los cuales son enviados constantemente al objetivo mediante trenes el cual los detecta, decodifica y responde en consecuencia [Meikle, 2008], este tipo de radar es utilizado en sistemas de detección e identificación de objetivos. En la Figura 2-7b se ilustra un sistema de radar de este tipo.

Según su finalidad. Como los objetivos a considerar en este trabajo presentan movimiento alrededor del área de estudio, los radares pueden considerarse como:

- **Radar de seguimiento de blancos (tracking radar):** Es capaz de seguir el movimiento de un blanco, utiliza antenas para transmitir energía electromagnética, estas antenas se comunican por medio de un tren de pulsos que les permite identificar en que lugar del espacio se encuentra el objetivo; se caracteriza por tener una frecuencia de repetición de pulso muy alta, un ancho de pulso muy estrecho y un ancho de haz muy estrecho. Estas características, le permiten tener gran precisión pero limitan el rango y dificultan la detección inicial del objetivo. [Meikle, 2008, Chernyak, 2018]. En la Figura 2-7c se ilustra un sistema de radar de este tipo.
- **Radar de exploración:(scanning radar)** Es capaz de explorar todo el espacio, o un sector de él, mostrando todos los objetivos que aparecen, posee largo alcance, alta precisión, velocidad de medición y una excelente penetración de materiales; este tipo de radar es aplicado a sistemas de detección e identificación de personas. En la Figura 2-7d se ilustra un sistema de radar de este tipo.

Para realizar la identificación, el objetivo debe estar ubicado dentro del radio máximo de cualquier par transmisor-receptor que para el caso del LEE será el área ocupada por una mesa de trabajo. En muchos casos, esta trayectoria será más estrecha que el ancho del haz de un patrón de antena direccional, y en el caso de un sistema omnidireccional (Figura 2-4), produce un rango preciso y una restricción de ángulo [Kabakchiev et al., 2013, Kaiser et al., 2016]. Desde la perspectiva multiestática con un sistema compuesto por más de un par de transmisores y/o receptores. Por lo anterior la ecuación de radar (Ecuación 2-16) aplicada al sistema de radar multiestático secundario de exploración que se va a utilizar y se define por medio de la Ecuación 2-19:

$$f(\lambda) = \frac{S}{\sum_{i=1}^N \frac{P_t * G^2 * \lambda^2 * \sigma}{\min|P_e| * (4\pi)^3 * L_t}} \tag{2-19}$$

$$\sum_{i=1}^N f(\lambda)_i \tag{2-20}$$

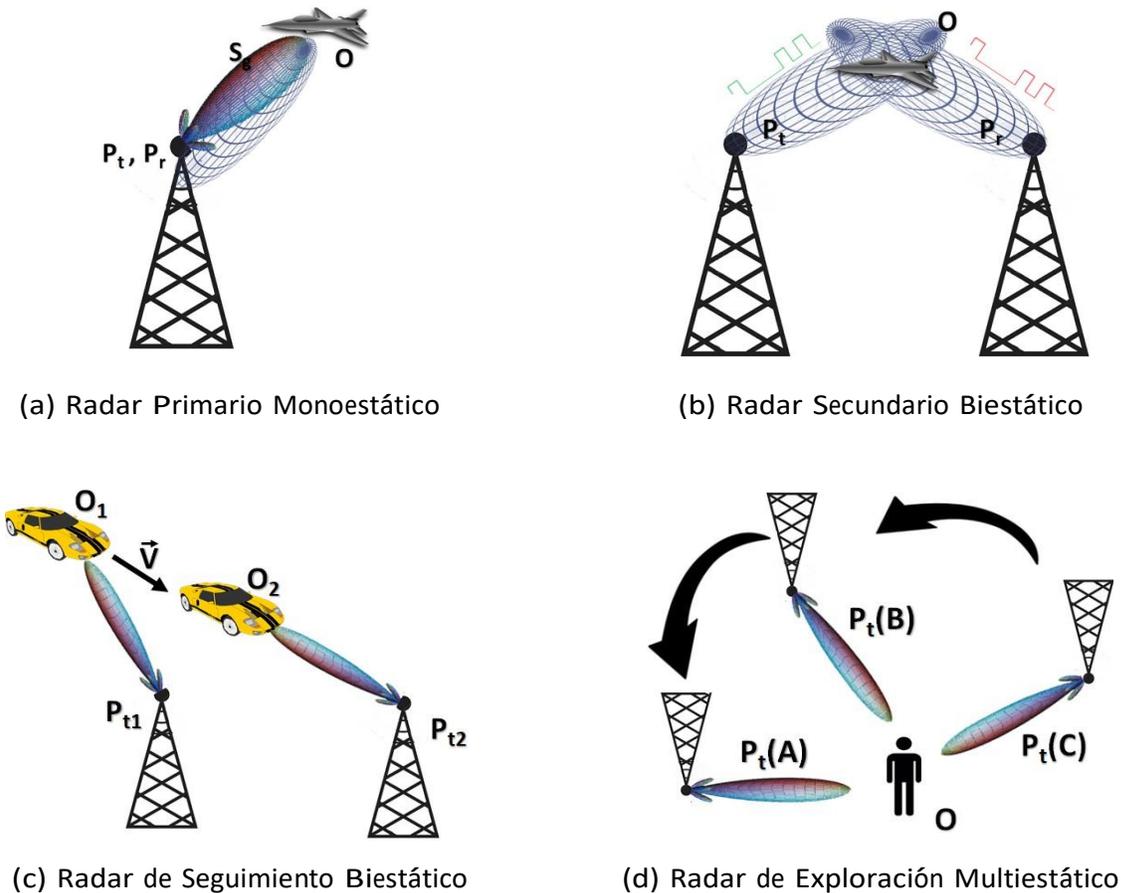


Figura 2-7: Tipos de Radar

2.3. Sistemas de Detección de personas

2.3.1. Bandas de frecuencia utilizadas en radares de detección

Una de las ventajas sobre el uso de radar, además de su aplicación en varias áreas, es que ocupan una parte reducida del espectro radioeléctrico internacional. Su ocupación del espectro suele ser inferior al 5 % respecto al resto de aplicaciones bajo el mismo espectro [Hamid and Bjorsell, 2011]. Por ejemplo, las bandas del espectro asignadas a radares de detección de la Tabla 2-2, donde observamos que un radar UWB ubicado en la banda S se encuentra ubicado entre 2,7 y 2,9 GHz, dejando una banda de 0.2 GHz ante el rango total de 3 GHz, es decir, una porción del 6 %. Cabe anotar que en esta banda se asignan aplicaciones variadas como Bluetooth, hornos microondas, wifi en sus versiones IEEE 802.11b y 802.11g y Wimax [Yujong et al., 2012].

Banda	Frecuencia	Tipo de Modulación
HF	3-30 MHz	CW, FM-CW
UHF	300-1000 MHz	FM-CW
L	1-2 GHz	UWB
S	2-4 GHz	UWB,FM-CW
C	4-8 GHz	UWB
X	8-12 GHz	UWB
V	40-75 GHz	FM-CW
W	75-110 GHz	FM-CW
mm	110-300 GHz	UWB

Tabla 2-2: Bandas de frecuencia de radares de detección

Con todo lo anterior definimos que los sistemas de radar en las bandas X y V son adecuados para cumplir los requerimientos del problema ya que la longitud de onda relativamente corta en estas bandas de frecuencias, permite obtener una resolución bastante alta en la proyección de imagen del radar, permitiendo así la identificación y discriminación de personas [Meikle, 2008, Granstrom et al., 2015]. El sistema propuesto opera en la banda V (Tabla 2-2), ya que su cobertura estará entre los 60 y 64 GHz con ancho de banda continuo de 4 GHz.

Una vez determinado el tipo de radar (Radar secundario multiestático y de seguimiento), la banda de frecuencia (Banda V, con modulación en frecuencia) del radar y la arquitectura a emplear (MISO) procedemos a explicar la aplicación de los sistemas en radar en la detección de personas.

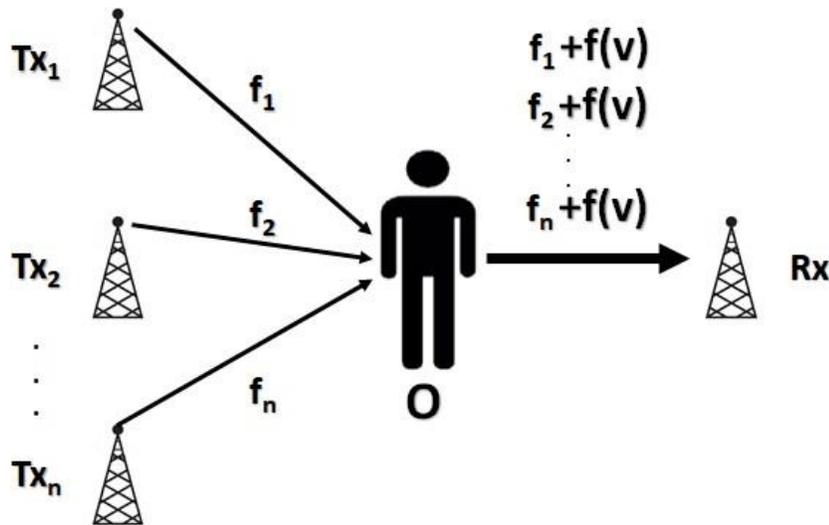


Figura 2-8: Sistema multiestático de seguimiento basado en arquitectura MISO

2.3.2. Tipos de modulación

En el año 2005, se usan radares de onda continua (CW) para la detección y clasificación de personas, utilizando Transformación de Fourier para el análisis de la firma Doppler que se produce cuando las partes del cuerpo humano entran en movimiento [Otero, 2005], el efecto Doppler se presenta cuando el objetivo se mueve a velocidad constante y como consecuencia se genera una variación en la frecuencia de la señal reflejada [Chen et al., 2006].

Con la evolución de los radares CW, en 2017 es presentado un nuevo sistema de radar FM-CW que permite resoluciones de alta sensibilidad y alcances menores a 1.5m, el cual emplea el procesamiento de la señal de indicación de objetivo en movimiento (MTI) lo que permite relaciones más altas de potencia (P_e) de señal a ruido y señal a interferencia, que pueden intercambiarse para lograr un mayor rango y un orden de magnitud menor en comparación con los sistemas banda ultraancho (UWB) [Chetty et al., 2017].

Desarrollándose paralelamente, surge como apoyo a operaciones de rescate un método donde se aplica un radar de banda ultra ancha (UWB) para el rastreo de personas [Zübeyde Gürbüz, 2009] aprovechando que las ondas electromagnéticas en las bandas L, S y C (Figura 2-2), penetran la mayoría de los materiales no metálicos, permitiendo la identificación de seres

vivos atrapados al interior de escombros [Zaikov, 2010]. Años mas tarde aparece un algoritmo de detección de personas basado en un sistema de radar de banda ultra ancha de radio por impulso [Choi et al., 2016]; en 2018, basado en la teoría del radar UWB que dice que la frecuencia central más baja es la que tiene el mejor radio de penetrabilidad y cuanto mayor sea el ancho de banda, mayor será la resolución del alcance del radar se implementa un sistema de radar IR-UWB [Li et al., 2018].

Radar de onda continua (CW y FM-CW)

Como su nombre lo indica, el radar CW utiliza ondas con forma sinusoidal continuas. Se pueden clasificar según la forma de onda en: radares sin modular que basan su funcionamiento en el desplazamiento frecuencial entre la señal recibida y la señal transmitida producida por el movimiento del blanco, se fundamenta en el efecto Doppler y no permite calcular distancia, solo velocidad; y radares modulados, en este caso, el sistema transmite una señal que varía dentro de un rango determinado de frecuencias durante un periodo de tiempo determinado por una señal de modulación, siendo las más comunes las de forma sinusoidal, diente de sierra y triangular[Liaño, 2015].

El radar modulado comúnmente usado en detección es el radar de onda continua modulada en frecuencia FM-CW el cual transmite señales generalmente de forma sinusoidal, la frecuencia de estas señales cambia con el tiempo, recorriendo un ancho de banda establecido. La diferencia de frecuencia entre la señal transmitida y la señal recibida (reflejada) se determina mezclando las dos señales para generar una nueva señal a partir de la cual se puede determinar la distancia o la velocidad (Figura 2-8); sin embargo, el tiempo que tarda la onda para alcanzar al objetivo no se puede medir directamente debido a que este tipo de radar basa su funcionamiento en una transmisión continua. Los radares FMCW son aplicados en las bandas del V y W del espectro radioeléctrico (Tabla 2-2).

Radar de banda ultra ancha (UWB)

Debido a que la captura y el análisis del movimiento humano se han convertido en un área de investigación muy activa surge el radar UWB como una alternativa mas eficiente a la vigilancia, detección y seguimiento de personas [Chen, 1992]; se caracteriza por tener un ancho de banda operativo que oscila entre las bandas L, S, C y X del espectro (Tabla 2-2) que combinado con una alta estabilidad de tiempo y al no utilizar la conversión ascendente de frecuencia, le permite tener penetración de materiales como yeso, madera y paredes de concreto[Chunming and Guoliang, 2012]. La penetración de materiales es una ventaja fundamental para el radar UWB ya que permite su instalación detrás de paredes y paneles de electrodomésticos sobre techos y debajo de pisos[McEwan, 1994].

Este sistema de radar cuenta con características como largo alcance, alta precisión, velocidad de medición y un bajo consumo de potencia, características que le permiten sobresalir en otras áreas como la comunicación inalámbrica UWB (Ultra Wide Band) que se caracteriza ser una comunicación de corta distancia y alta velocidad. En la actualidad este sistema de radar se puede aplicar en el ejército [Lu et al., 2005], en la medicina [Liu et al., 2011] o aplicaciones de red de tráfico inteligente [Yarovoy et al., 2006].

Radar de banda ultra ancha de radio de impulso (IR-UWB)

El radar de Banda Ultra Ancha de Radio de Impulso (IR-UWB), surge como una forma de señalización del amplio espectro de ancho de banda ultra ancho (UWB), donde la tecnología UWB de radio de impulso (IR) juega un papel importante para lograr la detección de objetivos humanos. En este sistema de comunicaciones se utiliza un radar secundario con arquitectura MISO (Figura 2-8), que envía un tren de pulsos y la información generalmente se transmite por las posiciones o las amplitudes de los pulsos, que corresponden a la modulación de la posición del pulso (PPM) y la modulación de la amplitud del pulso (PAM) en un canal adicional, respectivamente [Gezici and Sahinoglu, 2007]. El radar **IR-UWB** tiene propiedades que lo hacen un candidato viable para comunicaciones de corto alcance en entornos densos utilizando arquitecturas MIMO y MISO, ya que para evitar colisiones de pulsos multiusuario asigna un canal a cada secuencia de pulsos [Win and Scholtz, 1998].

Los sistemas de radar (IR-UWB) han logrado gran desempeño en ambientes abiertos [Li et al., 2013]; por este motivo pueden aplicarse en carreteras, donde permiten predecir movimientos de automoviles [Khan et al., 2017]; en espacios cerrados los radares **IR-UWB** han presentado mejor rendimiento que los sistemas de posicionamiento geográfico en cuanto a detección y seguimiento de personas [Nguyen and Pyun, 2015] incluso debido a su precisión han podido abrirse paso en el campo de la medicina donde son usados para la detección de la frecuencia respiratoria [Schleicher et al., 2013] e incluso para estudios bioquímicos no invasivos de tejidos blandos, estudios no invasivo de procesos metabólicos e imágenes espectrales infrarrojas [Staderini, 2002].

2.3.3. Detección e Identificación por Radiofrecuencia (RFID)

La RFID se utiliza como una forma adecuada de realizar seguimiento del inventario y como un sustituto de los códigos de barras, como es el caso del seguimiento y posicionamiento de objetos en movimiento [Vilcapoma Villalba, 2019]. El sistema de identificación RFID funciona de la siguiente forma: una etiqueta se instala en un objeto con el propósito de identificarlo o localizarlo utilizando señales de radio [Ni et al., 2011], de acuerdo con las técnicas de procesamiento de señal se puede obtener la incorporación sobre ángulos, intensidad de la señal y tiempos de vuelo de las señales transmitidas y reflejadas de la etiqueta [Costanzo et al., 2013]; logrando así resolver el problema del cierre o estrechamiento que impide o dificulta

el paso de la onda electromagnética hacia el objeto (oclusión), ya que la comunicación de la RFID no requiere estar en la línea de visión. El posicionamiento RFID también tiene las ventajas de un tamaño pequeño y una deducción de posición rápida, en comparación con las técnicas de posicionamiento Bluetooth o Wi-Fi [Zhou, 2014].

A pesar de ello, la precisión de posicionamiento es limitada ya que la RFID no proporciona información de distancia ni demora sobre la etiqueta, por este motivo permite a otras técnicas como la visión por computadora monitorear objetos [Li et al., 2019], la tecnología láser 2D localizar objetos en movimiento [Fu et al., 2018], a la odometría controlar el movimiento de robots móviles en entornos desconocidos [Liu et al., 2012], los sensores Web gestionar y preservar eficientemente reliquias culturales inteligentes (SCRMS) ya que la RFID evita el escaneo de objetos que en su mayoría son sensibles a la luz o a la radiación [Xiao et al., 2017]. Al fusionar RFID con radar, se obtiene un sistema que aprovecha la capacidad de identificación y conteo de la RFID y la capacidad de seguimiento y ubicación del radar para lograr la detección, localización y seguimiento de personas. El uso del radar ofrece ventajas en el manejo de datos ya que requiere menor equipo especializado que otras técnicas de detección como la termografía y los sistemas basados en cámaras fotográficas y de vídeo que además presentan radios de alcance limitados.

Para sistemas de detección que utilizan RFID se han empezado a implementar algoritmos basados en Lógica Difusa que permiten a partir de datos recopilados por lectores de RFID realizar estudios para monitoreo [Min and Yih, 2011] y localización en recintos cerrados [Fortin-Simard et al., 2012]. La unión de RFID, lógica difusa y sistemas de radar han logrado la navegación de robots [Gueaieb and Miah, 2008], el posicionamiento en interiores [Chen et al., 2010], análisis del clima para realizar entregas de productos [Ben Saber and Elloumi, 2016], entre otras.

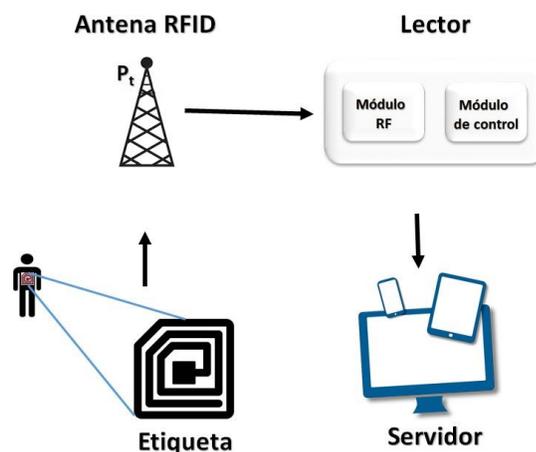


Figura 2-9: Esquema de un sistema RFID

Clasificación de las etiquetas RFID

Según su fuente de energía

- **Activas:** Poseen su propia fuente de energía y pueden transmitir información activamente al lector.
- **Pasivas:** No poseen fuente de energía y utilizan la energía de la señal recibida para dar una respuesta. Por tal motivo son mas pequeñas y ligeras que las activas.
- **Semi-pasivas:** Poseen una fuente de energía para hacer funcionar la circuitería interna del chip pero utilizan parte de la energía de la señal recibida para comunicarse con el lector.

También se pueden clasificar las etiquetas RFID según si llevan incorporado un chip (se denominan IC tags) o no [Roberts, 2006], y según el rango de frecuencias (Tabla 2-3).

Banda	Frecuencia
LF	125 - 135 kHz
HF	10 - 20 MHz
UHF	860-960 MHz
UHF (Microondas)	2.5 - 5.8 GHz

Tabla 2-3: Bandas de frecuencia de las etiquetas RFID

El sistema propuesto utiliza sensores y etiquetas pasivas UHF, pues usan solo el 3.7 % del ancho de la banda total disponible lo que los hace de bajo costo comparado con otras aplicaciones actuales de detección inalámbrica que utilizan sensores alimentados por batería [Bhattacharyya et al., 2010]. El sistema de RFID se encargará del conteo de usuarios por mesa y el radar permitirá el seguimiento por medio del posicionamiento de cada uno de los usuarios (objetivos), todo articulado por medio de un algoritmo de lógica difusa que relacione datos obtenidos por ambos sistemas.

Parámetros de diseño de las etiquetas RFID

Para que la comunicación Etiqueta-Lector (Figura 2-9) pueda darse es necesario establecer correctamente los valores de potencia transmitida P_t^J y recibida P_r^J . En primer lugar para activar la etiqueta P_t^J debe tener un valor mayor a la sensibilidad P_{sen} . P_t puede calcularse mediante la ecuación de Friss para la transmisión en espacio libre [Balanis, 2016]:

$$P_t^J = \frac{\lambda^2}{4\pi * r^2} P_{iso} X_P G_t \tau \geq P_{sen} \quad (2-21)$$

Donde, λ es la longitud de onda en el espacio libre, r es el radio de lectura, P_{iso} es la potencia isotrópica radiada por el lector, X_P es el coeficiente de polarización [López Soriano, 2019], G_t es la ganancia de la antena de la etiqueta y τ es el coeficiente de transmisión de potencia [Marrocco, 2008]. El coeficiente de transmisión de potencia esta dado por la Ecuación 2-22.

$$\tau = 1 - |s|^2 \quad (2-22)$$

Siendo $|s|^2$ el coeficiente de reflexión de potencia entre la antena y la etiqueta (Ecuación 2-23).

$$|s|^2 = \frac{Z_{etiqueta} - Z_a^*}{Z_{etiqueta} + Z_a} \quad (2-23)$$

Donde Z_a es la impedancia de entrada de la antena ($A_a = R_a + jX_a$) y $Z_{\mu-chip}$ es la impedancia de entrada de la etiqueta ($Z_{etiqueta} = R_{etiqueta} + jX_{etiqueta}$) [Nikitin et al., 2005].

En segundo lugar debe realizarse el balance de potencias para la transferencia de datos. Para ello tras activarse la etiqueta, modula la señal obtenida del lector (Información a transmitir) y la refleja hacia la antena receptora. Para que el receptor reciba la señal reflejada por la etiqueta, P_r debe ser mayor que la sensibilidad del receptor P_{sen} [López Soriano, 2019]. Una vez obtenidas las potencias recibidas por el lector y la etiqueta se puede calcular el rango de lectura máximo alcanzado por la etiqueta tanto para su activación (Ecuación 2-24), como para la transmisión de datos (Ecuación 2-25).

$$\text{Max}|S_{activacion}| = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{G_T * X_P * G_t * \tau}{P_{sen}} \quad (2-24)$$

$$\text{Max}|S_{Datos}| = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{\text{Max}|P^J|}{G_T * X_P * G_t} \frac{1}{P_r^J} M \quad (2-25)$$

Donde G_T es la ganancia de la antena del lector y M el factor de modulación [Griffin and Durgin, 2009].

La pérdida de potencia debido al desacople de las antenas de la etiqueta y el lector se calcula con la Ecuación 2-21 mediante el término X_P . Las antenas comerciales en su mayoría están polarizadas circularmente por lo tanto X_P sera igual a 0.5 tanto para la activación de la etiqueta como para la transmisión de datos [López Soriano, 2019]. El ancho de banda de una etiqueta depende del mínimo rango de lectura requerido por la aplicación[López Soriano, 2019]. En consecuencia, de la relación entre el ancho de banda y la ganancia de la antena de la etiqueta (Ecuación 2-24) dependerá la estabilidad en frecuencia y el rango de lectura del sistema [Balanis, 2016]. Por tanto, el ancho de banda es un parámetro decisivo en el rendimiento del sistema pues depende de la impedancia de la etiqueta que puede verse afectada por interferencia o incluso etiquetar otro elemento del entorno.

Toda etiqueta necesita una antena para capturar la señal y en ocasiones para actuar como un conductor de energía del lector a la etiqueta. La forma y las dimensiones de una antena determinan el rango de frecuencia que captura, así como otras características de rendimiento[Hassan and Chatterjee, 2006]. Existen 4 tipos de antenas de etiqueta: (1)Las antenas dipolo son una línea recta cuya longitud influye en el rango de frecuencia [Harrison and R. King, 1961, Morishita et al., 2001]; (2)Las antenas microstrip, que forman parte de una placa de circuito impreso con un rectángulo en el extremo cuya longitud y ancho influyen en la frecuencia [Nasimuddin et al., 2010]; (3)Las antenas de ranura son tiras cortadas de una superficie metálica [Calabrese and Marrocco, 2008] y (4)Las antenas en espiral son cables dispuestos en forma plana enrollada o enrollados alrededor de un núcleo conductor [Fotopolou and Flynn, 2007], el sistema propuesto usara antenas microstrip debido a que se han empezado a utilizar en sistemas de identificación en la banda UHF[Ukkonen et al., 2006].

2.3.4. Detección e Identificación de personas

En los últimos 10 años han surgido sistemas que permiten la detección y seguimiento de personas. Por ejemplo, en la Biblioteca Municipal de Meco (Madrid) se emplea un sistema basado en RFID y comunicación inalámbrica que permite guiar a las personas gracias a la visualización de la información en pantallas[Castaño et al., 2013]. En el campo de la robótica sistemas de detección de este tipo han empezado a implementarse, por ejemplo, uno basado en RFID y una fusión multisensor que permite a un robot de servicio identificar a una persona objetivo en ambientes interiores[Kristou et al., 2011]; otro presenta un robot capaz de seguir a una persona en un entorno abarrotado de seres humanos [Germa et al., 2010].

Debido a la compatibilidad de sistemas RFID con otros sistemas de posicionamiento han empezado aplicarse sistemas híbridos para la detección y seguimiento de personas; Por ejemplo, un sistema RFID-LPS sigue una metodología bayesiana de estimación de la posición a partir de la fuerza de las señales de RF recibidas para la localización de personas en ambientes interiores[Seco et al., 2013]; Sensores RFID [Zhang et al., 2017] pueden combinarse con

transmisores de radio de banda ultra ancha (IR-UWB) de baja potencia para lograr mayor efectividad en la identificación y seguimiento de objetivos [Bao et al., 2018]. Para algunas aplicaciones se han empezado a combinar etiquetas RFID con sistemas FM-CW para identificar objetos [Kunkel et al., 2009, Hofbauer, 2007], por tanto el sistema híbrido radar-RFID propuesto pretende aprovechar la versatilidad de las etiquetas RFID con antena microstrip para lograr la localización, detección y seguimiento de personas.

La inteligencia artificial (AI) es la combinación de algoritmos complejos que le permite a las máquinas adquirir capacidades que igualan o superan a las humanas en tareas especializadas como toma de decisiones, identificación y seguimiento. Este conjunto de técnicas se aplica en áreas como transporte, logística, ingenierías y medicina [Rodríguez Carmona and Rodelgo, 2019, Villota, 2019, Chacón Rangel et al., 2015].

En detección y seguimiento de personas se han empezado a implementar técnicas de AI como lógica difusa, machine learning, clustering, entre otras que han permitido la implementación de radares en ambientes interiores por medio del aprendizaje automático [Castanheira et al., 2019] que diferencia características físicas de los seres humanos como por ejemplo los gestos humanos [Park and Cho, 2016], los movimientos al caminar [Banitaan et al., 2016], entre otros. A pesar que han logrado ser muy efectivos al momento de identificar objetivos, sus requerimientos computacionales y tecnológicos los hacen costosos y complejos al momento de su implementación.

Detección por técnicas de Inteligencia Artificial

En la termografía hay muchos algoritmos que permiten a partir del dominio térmico el seguimiento de seres humanos (Figura 2-10). Los algoritmos de base térmica están inspirados en los procesos biológicos de caza, alimentación y supervivencia de muchos animales e insectos, que se ven afectados por la presencia de energía térmica en su entorno [Treptow et al., 2006]. Sin embargo, al momento de aplicar algoritmos basados en IA suelen presentarse fallos. En algoritmos de agrupamiento (Clustering) que consisten en un procedimiento de agrupación de una serie de vectores de acuerdo con un criterio, por lo general distancia o similitud, se presentan fallas de identificación si los objetos están muy próximos. En Machine Learning la dificultad se centra en lograr diferenciar un ser humano de otro ya que sus mapas de calor suelen ser muy parecidos y al utilizar matrices de covarianza se requiere un alto nivel de procesamiento por computador [Banitaan et al., 2016, Park and Cho, 2016].

Por otra parte, en la visión por computadora, se usan cámaras de video que deben realizar búsquedas en bases de datos que les permita identificar rasgos físicos de las personas que pasen por el rango de visión. Debido a que estas cámaras generalmente se encuentran estáticas, no alcanzan a realizar una identificación clara de la persona antes que esta salga de su

radio de alcance [Garcia-Alvarez and Castellanos, 2009]. Sin embargo, La RFID reduce ésta información a un número, permitiendo así tener una búsqueda en bases mucho más ágil y eficiente. A pesar de ello la RFID se limita al número de etiquetas necesitando por ende la aplicación de una técnica de IA que haga esta identificación mucho más dinámica.

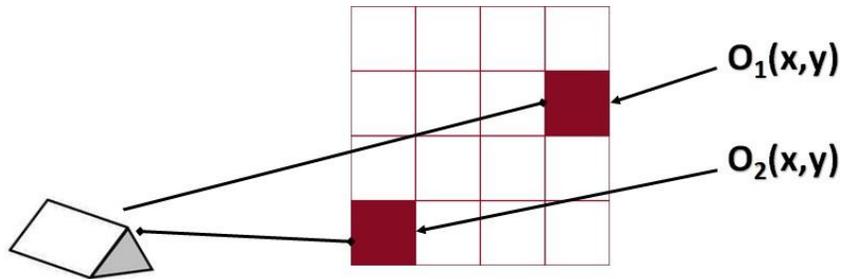


Figura 2-10: Identificación de objetivos por termografía

3 Metodología

En esta sección se discutirán los procedimientos de evaluación del sistema Radar-RFID de identificación y seguimiento automatizado de personas y cómo con su implementación se satisfacen los requerimientos del problema de conteo y detección automatizada de personas utilizando técnicas de radar soportadas por RFID. Las áreas del laboratorio donde se debe implementar el sistema se ilustran en la Tabla 3-1.

Área de experimentación	Área (m^2)	Puestos de trabajo	Cantidad Máxima de Usuarios Permitidos
Sala de Trabajo 1	64.05	12	36
Sala de Trabajo 2	67.1	14	42
Sala de Trabajo 3	81.92	17	51
Sala de Máquinas	168	6	24
Sala de Automatización	79.6	15	30
Sala de Simulación	118.57	42	42

Tabla 3-1: Áreas de Experimentación del LEE

3.1. Marco experimental

Analizando la dinámica de los usuarios que utilizan los espacios descritos en la Tabla 3-1 se define la siguiente nomenclatura para el uso adecuado de los puestos de trabajo dentro del LEE. Se establece un número máximo de $N(i)$ usuarios registrados por cada i -ésima mesa; al usuario $U(i)$ se le asigna la j -ésima etiqueta. Así, al momento de ingresar, el usuario queda registrado como $U(i,j)$ al ubicarse en la mesa.

Así, el sistema de identificación dará cuenta de los siguientes escenarios:

- a: Usuarios con igual etiqueta que se encuentran en una mesa que no corresponde. Se presenta cuando un usuario $U(i,j)$ se encuentra dentro del rango de una mesa diferente. $R_{U(i,j)} < R_{MaxU'(i,j)}$
- b: Más de un usuario en la mesa, es decir hay dos etiquetas iguales en la misma mesa.
- c: Usuarios no registrados en la mesa.
- d: Usuarios que no se registraron pero portan una tarjeta RFID.

Por consiguiente, el proceso experimental se lleva a cabo de la siguiente forma:

1. Un número N de usuarios ingresa al LEE y se organiza en una sala de tal forma que exista un usuario como mínimo y 3 como máximo en cada uno de los puestos de trabajo.
2. Se asignan etiquetas RFID por puesto de trabajo de tal forma que haya un ID diferente en cada grupo.
3. Se identifican usuarios tanto por el radar como por el sistema de RFID.
4. Por medio de un algoritmo de IA se dibujan los mapas de detección e identificación determinando los tiempos y el índice de clasificación con porcentaje de acierto.

3.2. Determinación de los parámetros del sistema de radar

El sistema de radar a implementar debe ser multiestático (Figura 2-7d) con arquitectura MISO (Figura 2-6d) y que utilice modulación FM-CW ó UWB. Debe ser un radar de tamaño reducido y que sea de fácil instalación y permita la localización y seguimiento de al menos 3 objetivos en un área de $1m^2$ que representa el área ocupada por una mesa de trabajo.

3.2.1. Cálculo del número de objetivos a identificar

Para calcular el número de objetivos se utilizó la Ecuación 3-1, que permite calcular densidad de usuarios P_D a partir de la cantidad de usuarios N_P y el área ocupada A_L (Circulo azul en la Figura 3-2a) que se toma de referencia y permite el calculo del promedio de usuarios por estación de trabajo que fue observado y medido durante un periodo de 8 meses (Enero-Agosto de 2019) en cada una de las salas del LEE y cuyo resultado se observa en la Figura 3-1.

$$P_D = \frac{N_P}{A_L} \quad (3-1)$$

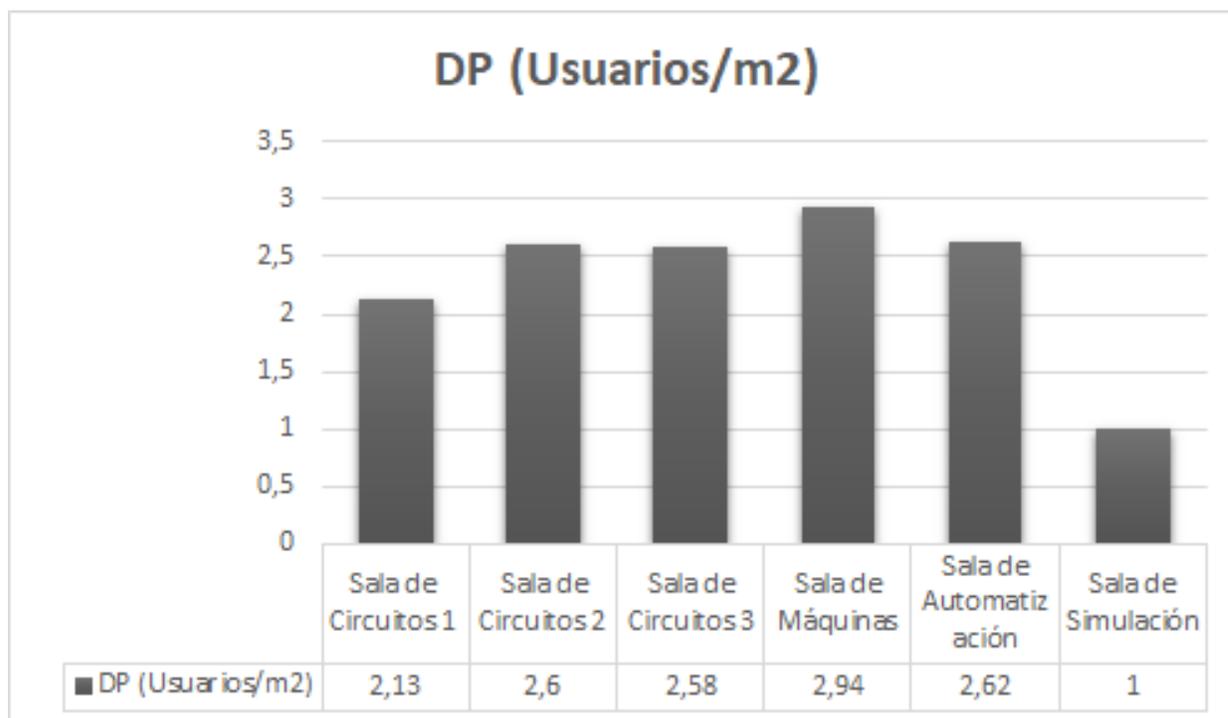
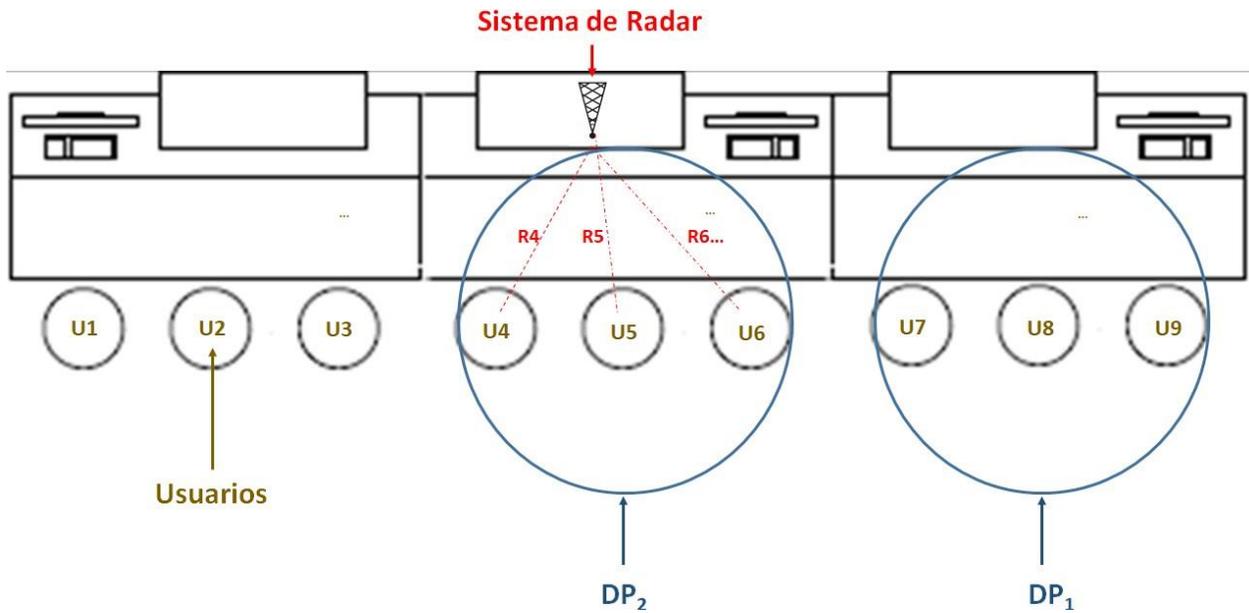


Figura 3-1: Densidad de usuarios por mesa del LEE

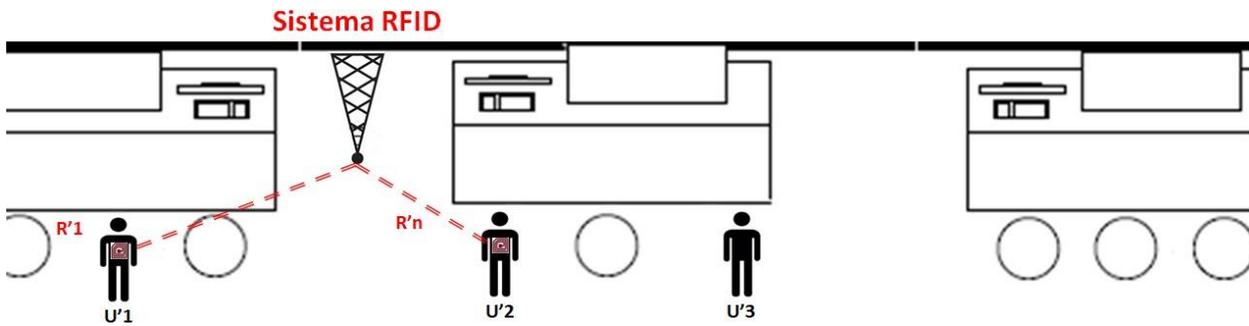
En la Figura 3-1 se observa la densidad de usuarios que el sistema de radar debe ser capaz de detectar debido a que el valor de la Sala de máquinas se encuentra en $2,94 \frac{\text{Usuarios}}{\text{m}^2}$, por tratarse de una variable contable, se redondea a 3 la cantidad de objetivos. Otros requerimientos como el ancho de banda, banda de operación y radio óptimo de detección se presentan en las Tablas 4-1 y 4-2 para dos sistemas estudiados.

3.2.2. Densidad de Identificación

Los sistemas de radar y RFID deben ser sistemas complementarios de tal forma que uno tenga un mayor rango de detección (RFID) y el otro logre identificación y seguimiento de todos los objetivos (Radar). En la Figura 3-2 se observa al proceso de detección tanto del sistema de radar como de RFID el cual nos permitirá generar el primer algoritmo de aciertos relacionando los usuarios detectados por el radar ($U(i)_1, U(i)_2, U(i)_3 \dots U(i)_n$) con los usuarios contados por el sistema RFID ($U(j)_1, U(j)_2, U(j)_3 \dots U(j)_n$). En la Figura 3-2a se observa el proceso de detección por radar que muestra la ubicación de los usuarios en los puestos de trabajo. En la Figura 3-2b se observa el sistema de RFID, que permitirá contar los usuarios.



(a) Detección Sistema de Radar



(b) Detección Sistema RFID

Figura 3-2: Sistema de Radar+RFID

3.3. Determinación de parámetros del sistema de RFID

El sistema RFID debe llevar a cabo el conteo de personas, para ello debe implementarse con etiquetas pasivas y antenas microstrip de tal forma que utilice banda UHF (Tabla **2-2**), además, debe presentar una arquitectura SISO que funcione en un canal adicional, permitiendo así la integración por medio de Lógica Difusa con el sistema de radar. El sistema RFID se ilustra **3-2b**. Debe contar con un radio máximo mayor al radar para lograr identificar incluso los usuarios que se encuentren al interior de las salas pero lejos de los puestos de trabajo.

3.4. Mapas de identificación

Al momento de realizar la detección e usuarios se debe asegurar que cualquier usuario que se encuentre en la sala sea identificado, por tanto el radio máximo del sistema RFID debe ser mayor al radio máximo del radar para poder contar y localizar los usuarios que no se encuentren en el puesto de trabajo asignado.

4 Resultados y Discusión

4.1. Escenarios evaluados

Para la implementación del sistema de Radar-RFID se hace necesaria la instalación de por lo menos un radar por cada dos mesas de trabajo y dos o tres lectores de RFID por cada sala dependiendo del área. Además, el LEE debe garantizar que cada uno de los usuarios posea una tarjeta RFID al hacer uso de la estación de trabajo. En esta sección se presentan los escenarios que fueron analizados y que permitirán llevar a cabo no solo la identificación y detección de usuarios si no también brindará los parámetros para el algoritmo de IA.

4.1.1. Usuarios registrados localizados en la mesa de trabajo asignada

Debido a que cada usuario tendrá una etiqueta RFID, al momento de realizar el barrido de usuarios en la estación de trabajo por parte tanto del RFID como del radar, el sistema puede detectar y localizar si todos los usuarios registrados en una estación de trabajo se encuentran en la mesa correcta. Figura 4-1, en este escenario el sistema no tomará ninguna acción.

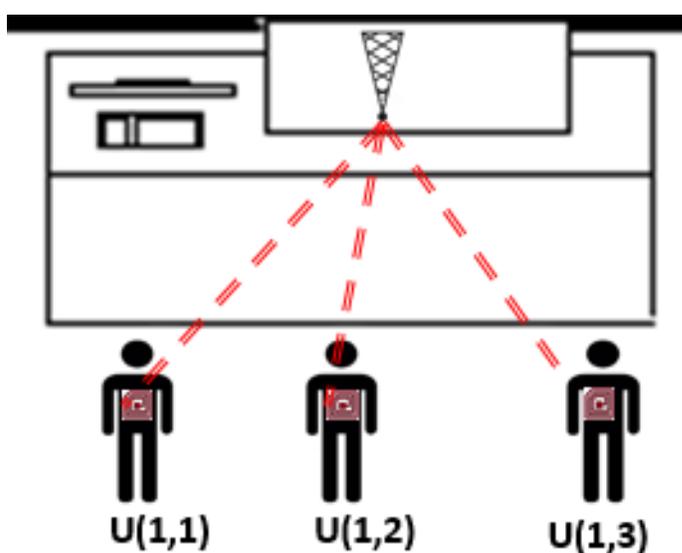


Figura 4-1: Usuarios registrados en la mesa correcta

4.1.2. Usuario no registrado que porta una etiqueta RFID

Si al momento de la detección de objetivos, el sistema detecta un usuario nuevo en una mesa (Figura 4-2). El sistema RFID deberá entonces identificar si este usuario se encuentra registrado en una mesa de trabajo diferente y deberá determinar el tiempo de permanencia en este espacio para saber si es un usuario cuya localización es transitoria en la mesa censada, o si por el contrario es un usuario de la estación de trabajo que no ha sido registrado previamente.

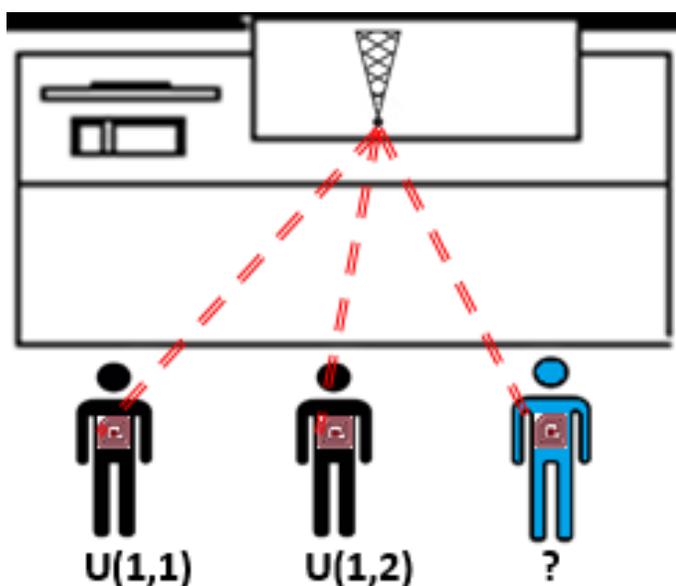
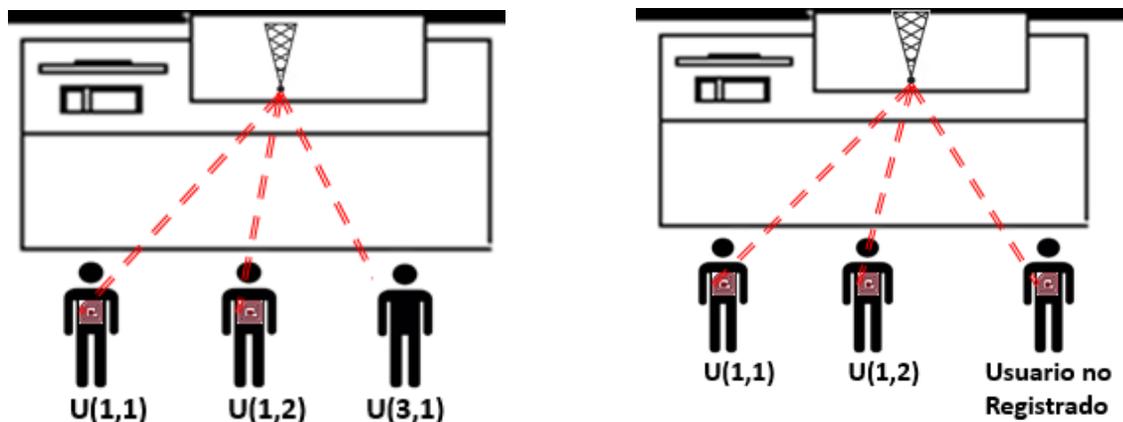


Figura 4-2: Usuario nuevo no identificado en la mesa de trabajo

En el primer escenario (Figura 4-3a), el sistema debe comparar las etiquetas RFID previamente registradas en toda la sala; En caso que el usuario detectado pertenezca a otra estación de trabajo no deberá tomar ninguna acción. Caso contrario (Figura 4-3b), el sistema deberá establecer el tiempo de permanencia en la mesa de trabajo, para un tiempo menor a 30 minutos sin registro previo en la sala éste, será identificado como visitante de la sala; por el contrario si su permanencia es de más de 30 minutos, deberá entonces ser registrado como usuario activo de la mesa censada.



(a) Usuario perteneciente a otra mesa de trabajo

(b) Usuario sin registro previo

Figura 4-3: Identificación de un usuario adicional

4.1.3. Usuarios registrados que no hacen uso de la mesa de trabajo

En este escenario, el sistema debe ser capaz de localizar los usuarios que se registraron en la estación de trabajo censada y en caso que sean considerados como usuarios activos en otra mesa, deberá entonces hacer sonar una alarma que le avise al personal del laboratorio que una mesa se encuentra abierta y no posee usuarios activos en ella.

4.2. Sistema de radar

A partir de los requerimientos del sistema de radar y luego de estudiar las posibilidades de sistemas que ofrece el mercado, se seleccionan dos opciones que permitirán al LEE cumplir con el registro de usuarios de manera automatizada y que a su vez permiten la interacción con sistemas de RFID.

4.2.1. Radar FM-CW

El sistema de radar IWR6843 (Figura 4-4) permite el conteo, la detección y el seguimiento de seres humanos, posee antenas que permiten trabajar con ondas milimétricas moduladas en frecuencia (FM-CW), sus procesos de transmisión y recepción se llevan a cabo en la banda V del espacio radioeléctrico ya que posee un ancho de banda de 60 a 64 GHz (Tabla 2-2).

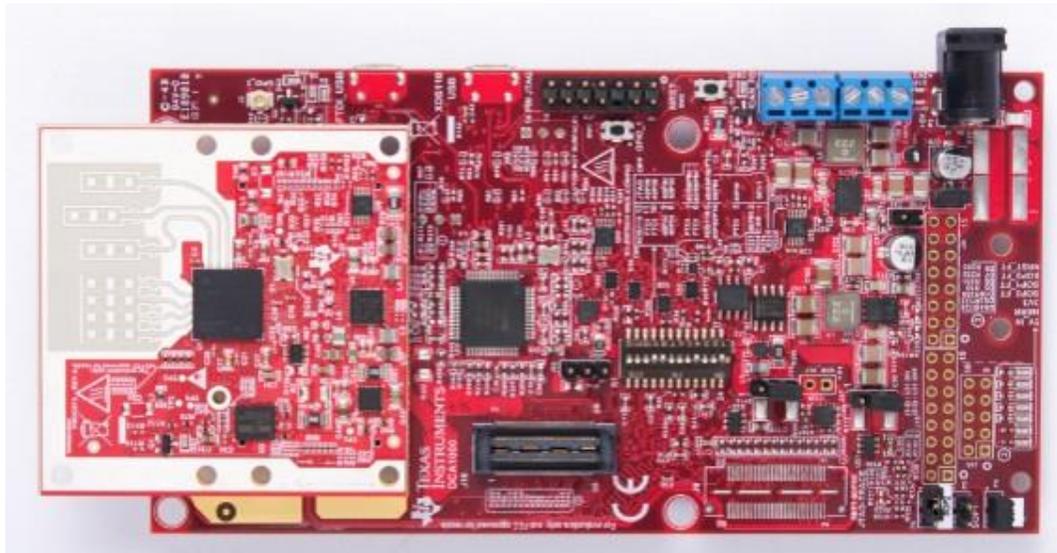


Figura 4-4: Sistema de radar IWR6843

Es aplicado principalmente en espacios interiores ya que permite una medición precisa de distancias, velocidades relativas de las personas y otros objetos; El uso de ondas milimétricas en frecuencia modulada permite eliminar las pérdidas atmosféricas y reducir las pérdidas de fluctuación (Figura 2-1). El radio máximo depende de la configuración, posee una configuración de corto alcance que permite alcanzar hasta 6.3 metros y una configuración de largo alcance que permite alcanzar un máximo de 14 metros (Tabla 4-1). El sistema de radar realiza un procesamiento de datos por medio de algoritmos de extracción de Doppler para la obtención de información permitiendo así la localización de objetos.

Parámetros de Rendimiento	Configuración	
	Corto Alcance	Largo Alcance
Radio Máximo	6.3 m	14 m
Rango de identificación	5.5 cm	12 cm
Velocidad Máxima	23, 6 $\frac{Km}{h}$	23, 6 $\frac{Km}{h}$
Canales de Transmisión	3	3
Canales de Recepción	1	1
Frecuencia de operación	60-64 GHz	60-64 GHz
Objetivos por m^2	3	3

Tabla 4-1: Especificaciones del radar IWR6843

El proceso de conteo de personas usado por el IWR6843 consta de tres partes, (1) la interfaz que representa las antenas y el transceptor RF analógico, el transmisor y el receptor FMCW y diversas operaciones de acondicionamiento de señales basadas en hardware; cuenta también con el ADC que es el elemento que se conecta a la cadena DSP. (Figura 4-5a), (2) el procesamiento digital de señales (DSP) se lleva a cabo por un núcleo de procesamiento de señal digital (C674x) que implementa la configuración del extremo delantero y ejecuta las principales operaciones de procesamiento de señal sobre los datos. (Figura 4-5c) y (3) el modulo de seguimiento (Arm R4F - Arm MCU) ejecuta un código de aplicación que incluye otras operaciones de procesamiento de señal. En esta aplicación, se implementa el grupo rastreador y los relés de datos de destino junto con dos algoritmos para realizar el mapa de calor y lograr así la detección de objetos (Figura 4-5b). El diagrama del proceso se observa en el Figura 4-5.

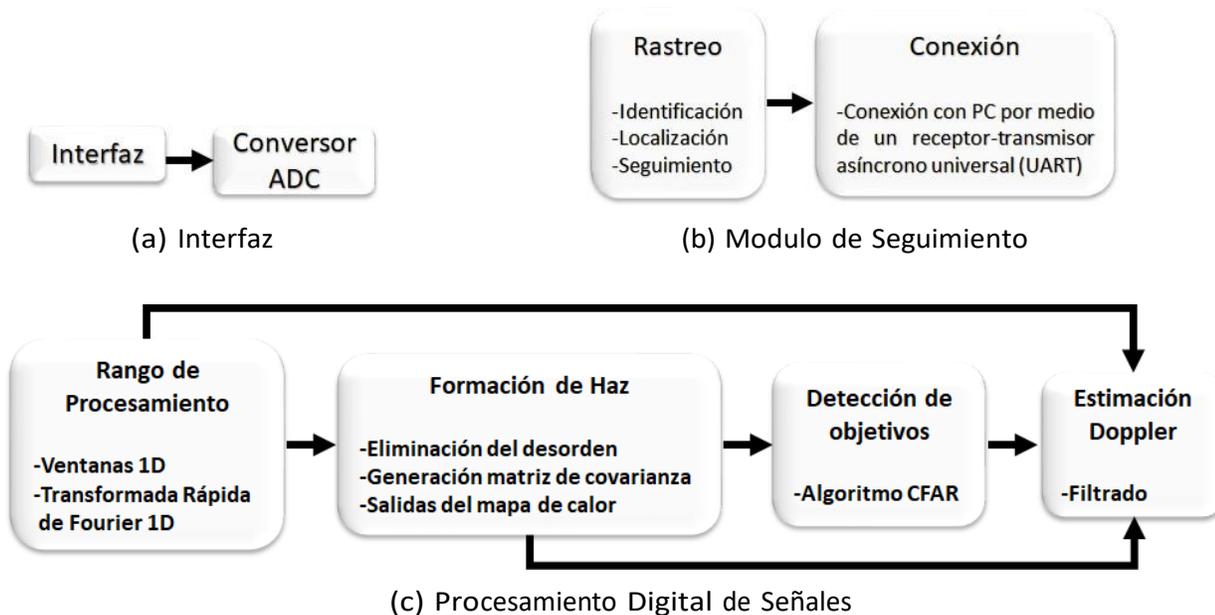


Figura 4-5: Diagrama de procesos radar IWR6843

4.2.2. Radar IR-UWB

El sistema de radar X4M300 (Figura 4-6) es un sistema de radar monoestático que permite la identificación y seguimiento de personas. Es un radar UWB-IR, sus procesos de transmisión y recepción se llevan a cabo en las bandas S y C del espacio radioeléctrico dependiendo la configuración, posee un ancho de banda de 6.0 a 10 GHz (Tabla 2-2)



Figura 4-6: Sistema de radar X4M300 [x4m, 2019]

Está diseñado para trabajar en espacios interiores ya que posee una gran gran sensibilidad. Esta diseñado para eliminar las pérdidas atmosféricas (Figura 2-1). El radio máximo de operación es de 9.4 metros y el mínimo de 0.4 metros (Tabla 4-2).

Parámetros de Rendimiento	
Radio Máximo	9.4
Rango de identificación	5.14 cm
Canales de Transmisión	1
Canales de Recepción	1
Frecuencia de operación	6 - 10 GHz
Objetivos	cos 7
	En movimiento 4

Tabla 4-2: Especificaciones del radar X4M300

El proceso de detección y seguimiento del radar X4M300 consta de 3 etapas: (1) un algoritmo de firmware compuesto de dos matrices de rango-Doppler que se ejecutan en paralelo para mitigar las señales de interferencia y disminuir las pérdidas del sistema (Tabla 2-1). (2) Una etapa de procesamiento digital de señales que toma los resultados del firmware donde se representan como matrices de rango-Doppler todas las reflexiones a diferentes distancias y frecuencias durante el último período de tiempo. Todas las reflexiones con frecuencia Doppler 0 (reflexiones estáticas) se eliminan antes de que el procesamiento se lleve a cabo, La forma en que el sistema entrega los datos utiliza intervalos de 5,14 cm. de detección y localización, estos pasan a (3) una etapa de conexión que permite exportar los datos por los puertos de comunicación UART, USB o USRT.

4.3. Comparación de los sistemas de radar

Parámetro	FM-CW	IR-UWB
Radio Máximo (m)	6.3	9.4
Rango de identificación (cm)	5.5	5.14
Canales de Transmisión	3	1
Canales de Recepción	1	1
Arquitectura	MISO	SISO
Frecuencia de operación	60 - 64 GHz	6 - 10 GHz

Tabla 4-3: Tabla comparativa - Sistemas de radar

Luego de revisar las características de los dos sistemas de radar y basándose en los datos de la Tabla 4-3 el sistema que mas se ajusta a las necesidades del LEE es el radar IWR6843. Pues, a pesar que posee un costo mayor y consume mas potencia, este sistema de radar puede implementarse con cualquier arquitectura (Figura 2-6) esto le da una ventaja ya que permite vincular mejor al sistema de identificación RFID.

4.4. Sistema RFID

4.4.1. Lector RFID

El lector RFID debe trabajar en la banda UHF (Tabla 2-2) con frecuencia de operación entre 902 y 928MHz, debe tener largo alcance con un rango de aproximadamente 12m de distancia, debe tener un puerto de comunicación USB. El sistema propuesto se ilustra en la Figura 4-7.

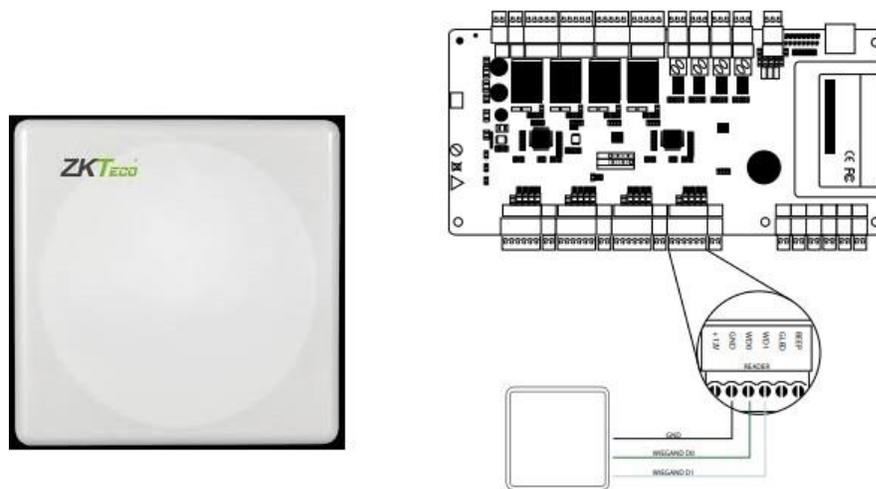


Figura 4-7: Lector RFID

4.4.2. Etiqueta

Las etiquetas para el sistema propuesto son de tipo microstrip que trabajan a una frecuencia de operación de 915MHz (Figura 4-8).



Figura 4-8: Etiqueta RFID

5 Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

La constante actualización y versatilidad de tecnologías como el radar y la RFID suponen un desafío para las instituciones a nivel mundial, en Colombia con la llegada de la cuarta revolución tecnológica las instituciones de educación superior que hasta ahora estaban logrando avances enfocados al sistema de procesamiento y muestreo de la imagen, deben ahora analizar y aplicar a sus procesos sistemas capaces de obtener información que les permita un mayor desarrollo en la optimización de procesos que se llevan a cabo por cada una de sus dependencias. A pesar del avance en los últimos 15 años de la tecnología del radar, actualmente los sistemas de radar UWR y FMCW no presentan todas las ventajas necesarias para resolver todas las necesidades que la localización, detección y seguimiento requieren, por ello éstos deben fusionarse con otros sistemas que les permita **suplir todas aquellas ventajas** que presentan.

Para el caso estudiado se concluye que para llevar a cabo el flujo de usuarios al interior del laboratorio de electricidad y electrónica **se requiere de la implementación de un sistema híbrido entre radar y RFID apoyado de una técnica de algoritmo de lógica difusa.** Se presentan las características del sistema de radar y se presentan dos alternativas presentes en el mercado, así como las características del sistema de RFID.

zuric
2021-08-25 09:55:19
El hecho de que la estrategia planteada como alternativa de solución para el problema no implica que sea "requerida". Puede haber otras soluciones viables.

5.2. Recomendaciones

Como trabajo futuro se requiere de la implementación de los sistemas de radar y RFID junto a un algoritmo de lógica difusa servirá como soporte para el mejoramiento en estos sistemas. Sin embargo este trabajo puede tomar de 2 a 4 años para llevarse a cabo ya que requiere de la parametrización de cada uno de los sistemas y de la implementación de un algoritmo que permita la interacción entre ambos y que arroje datos que permitan al laboratorio una medición mas acertada de la cantidad de usuarios que utilizan todos sus espacios y a su vez entregue insumos que permitan mejorar los informes de gestión y obtener datos que lleven al Laboratorio de Electricidad y Electrónica a plantear con mucha mas confiabilidad sus

procesos de adquisición, calibración y reposición de equipos.

Bibliografía

2019. URL <https://www.xethru.com/x4m300-presence-sensor.html>.

R. A. Watson. Improvements in or relating to wireless systems, 1935.

M. K. Baczyk, P. Samczynski, P. Krysik, and K. Kulpa. Traffic density monitoring using passive radars. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 32(2):14–21, February 2017. doi: 10.1109/MAES.2017.150271.

I. Haritaoglu, D. Harwood, and L. S. Davis. Hydra: multiple people detection and tracking using silhouettes. In *Proceedings 10th International Conference on Image Analysis and Processing*, pages 280–285, 1999.

R. Muñoz-Salinas, E. Aguirre, and M. García-Silvente. People detection and tracking using stereo vision and color. *Image and Vision Computing*, 25(6):995 – 1007, 2007. ISSN 0262-8856.

T. J. Ramírez Rozo. Evaluación de calidad de imágenes en ensayo termográfico no destructivo. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, 2013. URL <http://bdigital.unal.edu.co/12425/>.

H. A. Fandiño Toro. Diagnóstico e identificación de fallas en motores industriales a través del análisis de imágenes termográficas. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, 2012. URL <http://bdigital.unal.edu.co/7187/>.

A. Gaszczak, Breckon T., and J. Han J. Real-time people and vehicle detection from UAV imagery. In Juha Röning, David P. Casasent, and Ernest L. Hall, editors, *Intelligent Robots and Computer Vision XXVIII: Algorithms and Techniques*, volume 7878, pages 71 – 83. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2011. doi: 10.1117/12.876663. URL <https://doi.org/10.1117/12.876663>.

J. Portmann, S. Lynen, M. Chli, and R. Siegwart. People detection and tracking from aerial thermal views. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1794–1800, May 2014. doi: 10.1109/ICRA.2014.6907094.

J. Wetzel, S. Zeitvogel, A. Laubenheimer, and M. Heizmann. Towards global people detection and tracking using multiple depth sensors. In *2018 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, pages 1–4, 2018.

- C. Álvarez Aparicio, Á. M. Guerrero-Higueras, F. J. Rodríguez-Lera, J. G. Clavero, F. M. Rico, and V. Matellán. People detection and tracking using lidar sensors. *Robotics*, 8(3), 2019. ISSN 2218-6581. URL <https://www.mdpi.com/2218-6581/8/3/75>.
- S Ramírez Castillo Ramírez Castillo. *Estudio de las interferencias en detección de blancos para un sistema lidar FMCW*. PhD thesis, Escola Tècnica Superior D'enginyeria, 2009.
- V. Nguyen and J Pyun. Location detection and tracking of moving targets by a 2d ir-uwb radar system. *Sensors*, 15(3):6740–6762, 2015. ISSN 1424-8220. doi: 10.3390/s150306740. URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/15/3/6740>.
- A. Sharafi, M. Baboli, M. Eshghi, and A. Ahmadian. Respiration-rate estimation of a moving target using impulse-based ultra wideband radars. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, 35(1):31–39, 2011. doi: 10.1007/s13246-011-0112-2.
- J. Landt. The history of rfid. *IEEE Potentials*, 24(4):8–11, Oct 2005. doi: 10.1109/MP.2005.1549751.
- M. Tu, W. Choi, and P. Cheong. Defected ground structure of uwb chipless rfid tag for fmcw radar. In *2018 IEEE International Conference on RFID Technology Application (RFID-TA)*, pages 1–4, Sep. 2018. doi: 10.1109/RFID-TA.2018.8552781.
- B. Choudhury, S. and Sinha and S. Swarnabha. Real time location sensing in mining - operators share of the pie. *Telecom Business Review*, 11(1):17–24, 2018. URL <http://ezproxy.unal.edu.co/docview/2297150294?accountid=150292>. Copyright - Copyright Publishing India Group 2018; Última actualización - 2019-09-26.
- JR Zhou. *Investigación sobre localización en interiores utilizando el sistema RFID*. PhD thesis, Universidad de Zhejiang, China, 2014.
- A. Malik Shaari and N. Safwati Mohd Nor. Position and orientation detection of stored object using rfid tags. *Procedia Engineering*, 184:708 – 715, 2017. ISSN 1877-7058. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.146>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581731651X>.
- Y.S. Chen, T.C. Kao, and J.P. Sheu. A mobile learning system for scaffolding bird watching learning. *Journal of Computer Assisted Learning*, 19(3):347–359, 2003. doi: 10.1046/j.0266-4909.2003.00036.x. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.0266-4909.2003.00036.x>.
- D. Fortin-Simard, J. Bilodeau, K. Bouchard, S. Gaboury, B. Bouchard, and A. Bouzouane. Exploiting passive rfid technology for activity recognition in smart homes. *IEEE Intelligent Systems*, 30(4):7–15, July 2015. doi: 10.1109/MIS.2015.18.

- B. Kelvie and M. Kraft. Technology in the mortgage industry: The fannie mae experience. *IT Professional*, 7(03):27–32, may 2002. ISSN 1941-045X. doi: 10.1109/MITP.2002.1008534.
- I. Lopez. Introducción al radar, 2011.
- J. W. Choi, S. S. Nam, and S. H. Cho. Multi-human detection algorithm based on an impulse radio ultra-wideband radar system. *IEEE Access*, 4:10300–10309, 2016. doi: 10.1109/ACCESS.2016.2647226.
- A. Ishimaru. *Electromagnetic wave propagation, radiation, and scattering from fundamentals to applications*. John Wiley and Sons, Incorporated, 2017.
- J. Lekner. *Theory of reflection*. SPRINGER, 2018.
- V. S Chernyak. *Fundamentals of Multisite Radar Systems*. Routledge, 2018.
- R. B. Dybdal. Radar cross section measurements. *Proceedings of the IEEE*, 75(4):498–516, April 1987. doi: 10.1109/PROC.1987.13757.
- V. C. Chen. Detection and analysis of human motion by radar. In *2008 IEEE Radar Conference*, pages 1–4, May 2008. doi: 10.1109/RADAR.2008.4721059.
- Ram M. Narayanan, Sonny Smith, and Kyle A. Gallagher. A multifrequency radar system for detecting humans and characterizing human activities for short-range through-wall and long-range foliage penetration applications. *International Journal of Microwave Science and Technology*, 2014:1–21, 2014. doi: 10.1155/2014/958905.
- M. Reiher. *Optimierung von Sendesignalen zur Vermeidung von Scheinzielen für frequenzmodulierte Dauerstrich-Radarsysteme im Automobil*. Dr. Hut, 2012.
- E. Schubert, M. Kunert, W. Menzel, J. Fortuny-Guasch, and J. Chareau. Human rcs measurements and dummy requirements for the assessment of radar based active pedestrian safety systems. In *2013 14th International Radar Symposium (IRS)*, volume 2, pages 752–757, June 2013.
- Stephen D. Liang. Sense-through-wall human detection based on uwb radar sensors. *Signal Processing*, 126:117 – 124, 2016. ISSN 0165-1684. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2015.09.022>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165168415003242>. Signal Processing for Heterogeneous Sensor Networks.
- Y. Zhou, Y. Fan, L. Zhao, and S. Yin. Siso system model identification and fault diagnosis. In *2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, pages 1866–1870, Oct 2018.

- A. M. Haimovich, R. S. Blum, and L. J. Cimini. Mimo radar with widely separated antennas. *IEEE Signal Processing Magazine*, 25(1):116–129, 2008. doi: 10.1109/MSP.2008.4408448.
- Lajos L Hanzo, J Akhtman, Ming Jiang, and Li Wang. *Mimo-ofdm for lte, wifi and wimax*. Wiley, 2013.
- B. Friedlander. On the relationship between mimo and simo radars. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 57(1):394–398, Jan 2009. doi: 10.1109/TSP.2008.2007106.
- P. P. Vaidyanathan and P. Pal. Mimo radar, simo radar, and ifir radar: a comparison. In *2009 Conference Record of the Forty-Third Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pages 160–167, Nov 2009. doi: 10.1109/ACSSC.2009.5470139.
- J. P. Stralka, R. M. Thompson, J. Scanlan, and A. Jones. Miso radar beamforming demonstration. In *2011 IEEE RadarCon (RADAR)*, pages 889–894, May 2011. doi: 10.1109/RADAR.2011.5960665.
- Y. Prabowo and F. Y. Zulkifli. Design of high isolation system for monostatic x-band radar. In *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL)*, pages 1351–1353, Nov 2017. doi: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293340.
- Haidong Yan, Jun Li, and Guisheng Liao. Multitarget identification and localization using bistatic mimo radar systems. *EURASIP J. Adv. Signal Process*, 2008: 48:1–48:8, January 2008. ISSN 1110-8657. doi: 10.1155/2008/283483. URL <https://doi.org/10.1155/2008/283483>.
- Pramod K. Varshney. *Fundamentals of multisite radar systems: Victor s. chernyak, gordon and breach science publishers, 1998, 475 pp., isbn 90-5699-165-5. Signal Processing*, 81: 2617, 2001.
- H. Meikle. *Modern radar systems*. Artech House, 2008.
- C. Kabakchiev, I. Garvanov, V. Behar, and H. Rohling. The experimental study of possibility for radar target detection in fsr using l1-based non-cooperative transmitter. In *2013 14th International Radar Symposium (IRS)*, volume 2, pages 625–630, June 2013.
- S. A. Kaiser, A. J. Christianson, and R. M. Narayanan. Multistatic radar exploitation of forward scattering nulls. In *2016 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, pages 1–6, May 2016. doi: 10.1109/RADAR.2016.7485128.
- M. Hamid and N. Bjorsell. "base de datos de oportunidades de espectro de geolocalización en bandas de radar de enlace descendente para radios cognitivas basadas en ofdm", 2011.

- K. Yujong, S. Setiniyaz, M. Titberidze, and K. H. Jang. Overall performance comparison of s-band, c-band and x-band based compact xfel facilities, 2012. URL <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/FEL2012/papers/mopd48.pdf>.
- K. Granstrom, A. Natale, P. Braca, G. Ludeno, and F. Serafino. Gamma gaussian inverse wishart probability hypothesis density for extended target tracking using x-band marine radar data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(12):6617–6631, Dec 2015. doi: 10.1109/TGRS.2015.2444794.
- M. Otero. Application of a continuous wave radar for human gait recognition. In Ivan Kadar, editor, *Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XIV*, volume 5809, pages 538 – 548. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2005. doi: 10.1117/12.607176. URL <https://doi.org/10.1117/12.607176>.
- V.C. Chen, Fayin Li, Shen-Shyang Ho, and H. Wechsler. Micro-doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 42(1):2–21, 2006. doi: 10.1109/taes.2006.1603402.
- K. Chetty, Q. Chen, M. Ritchie, and K. Woodbridge. A low-cost through-the-wall FMCW radar for stand-off operation and activity detection. In Kenneth I. Ranney and Armin Doerry, editors, *Radar Sensor Technology XXI*, volume 10188, pages 65 – 73. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2017. doi: 10.1117/12.2261680. URL <https://doi.org/10.1117/12.2261680>.
- Sevgi Zübeyde Gürbüz. *RADAR DETECTION AND IDENTIFICATION OF HUMAN SIGNATURES USING MOVING PLATFORMS*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, 2009.
- E. Zaikov. Uwb radar for detection and localization of trapped people. In *11-th INTERNATIONAL RADAR SYMPOSIUM*, pages 1–4, June 2010. doi: 10.5772/10004.
- Z. Li, Q. An, F. Qi, F. Liang, H. Lv, Y. Zhang, X. Yu, and J. Wang. Detection of people trapped under the ruins using dual-frequency ir-uwb radar. In *2018 15th European Radar Conference (EuRAD)*, pages 83–86, Sep. 2018. doi: 10.23919/EuRAD.2018.8546530.
- R. Liaño. *Fabricación y puesta en marcha de un radar FMCW de bajo coste en banda S*. PhD thesis, Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, 2015.
- Hollis C Chen. *Theory of electromagnetic waves*. TechBooks, 1992.
- W. Chunming and D Guoliang. Study of uwb radar life-detection for searching human subjects. *Energy Procedia*, 17:1028 – 1033, 2012. ISSN 1876-6102. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.203>. 2012 International Conference on Future Electrical Power and Energy System.

- T. McEwan. Ultra-wideband radar motion sensor, 1994.
- G. H. Lu, G.S. Yang, and J.Q. Wang. The study on detection of the life signals of human subject based on micropower uwb radar. *Chinese Medical Equipment Journal*, 26(2):15–17, 2005.
- L. Liu, Z. Liu, and B. E. Barrowes. Through-wall bio-radiolocation with uwb impulse radar: Observation, simulation and signal extraction. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(4):791–798, Dec 2011. doi: 10.1109/JS-TARS.2011.2157461.
- A. G. Yarovoy, L. P. Lighthart, J. Matuzas, and B. Levitas. Uwb radar for human being detection. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 21(3):10–14, March 2006. doi: 10.1109/MAES.2006.1624185.
- S. Gezici and Z. Sahinoglu. Theoretical limits for estimation of vital signal parameters using impulse radio uwb. In *2007 IEEE International Conference on Communications*, pages 5751–5756, June 2007. doi: 10.1109/ICC.2007.953.
- M. Z. Win and R. A. Scholtz. Impulse radio: how it works. *IEEE Communications Letters*, 2(2):36–38, Feb 1998. doi: 10.1109/4234.660796.
- Z. Li, W. Li, H. Lv, Y. Zhang, X. Jing, and J. Wang. A novel method for respiration-like clutter cancellation in life detection by dual-frequency ir-uwb radar. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 61(5):2086–2092, May 2013. doi: 10.1109/TMTT.2013.2247054.
- F. Khan, S. K. Leem, and S. H. Cho. Hand-based gesture recognition for vehicular applications using ir-uwb radar. *Sensors*, 17(4), 2017. ISSN 1424-8220. doi: 10.3390/s17040833. URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/4/833>.
- B. Schleicher, I. Nasr, A. Trasser, and H. Schumacher. Ir-uwb radar demonstrator for ultra-fine movement detection and vital-sign monitoring. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 61(5):2076–2085, May 2013. doi: 10.1109/TMTT.2013.2252185.
- E. M. Staderini. Uwb radars in medicine. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 17(1):13–18, Jan 2002. doi: 10.1109/62.978359.
- J.A. Vilcapoma Villalba. *Sistema de radiocomunicación como alternativa al sistema de localización satelital en el monitoreo y localización de unidades móviles de las empresas de taxi*. PhD thesis, Universidad Continental, Huancayo, Perú., 2019.
- L. M. Ni, D. Zhang, and M. R. Souryal. Rfid-based localization and tracking technologies. *IEEE Wireless Communications*, 18(2):45–51, April 2011. doi: 10.1109/MWC.2011.5751295.

- A. Costanzo, D. Masotti, T. Ussmueller, and R. Weigel. Tag, you're it: Ranging and finding via rfid technology. *IEEE Microwave Magazine*, 14(5):36–46, July 2013. doi: 10.1109/MMM.2013.2259392.
- M. Li, Y. Chen, Y. Zhang, J. Yang, and H. Du. Fusing rfid and computer vision for occlusion-aware object identifying and tracking. In Edoardo S. Biagioni, Yao Zheng, and Siyao Cheng, editors, *Wireless Algorithms, Systems, and Applications*, pages 175–187, Cham, 2019. Springer International Publishing. ISBN 978-3-030-23597-0.
- Ch. Fu, Y. Wang, R. Liu, G. Liang, H. Zhang, and S. Ur Rehman. Moving object localization based on uhf rfid phase and laser clustering. *Sensors*, 18(3), 2018. ISSN 1424-8220. doi: 10.3390/s18030825. URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/3/825>.
- R. Liu, A. Koch, and A. Zell. Path following with passive uhf rfid received signal strength in unknown environments. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2250–2255, Oct 2012. doi: 10.1109/IROS.2012.6385666.
- Changjiang Xiao, Nengcheng Chen, Dandan Li, You Lv, and Jianya Gong. Scrms: An rfid and sensor web-enabled smart cultural relics management system. *Sensors*, 17(1), 2017. ISSN 1424-8220. doi: 10.3390/s17010060. URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/1/60>.
- Daiki Min and Yuehwern Yih. Fuzzy logic-based approach to detecting a passive rfid tag in an outpatient clinic. *Journal of Medical Systems*, 35(3):423–432, Jun 2011. ISSN 1573-689X. doi: 10.1007/s10916-009-9377-3. URL <https://doi.org/10.1007/s10916-009-9377-3>.
- D. Fortin-Simard, K. Bouchard, S. Gaboury, B. Bouchard, and A. Bouzouane. Accurate passive rfid localization system for smart homes. In *2012 IEEE 3rd International Conference on Networked Embedded Systems for Every Application (NESEA)*, pages 1–8, Dec 2012. doi: 10.1109/NESEA.2012.6474010.
- W. Gueaieb and M. S. Miah. An intelligent mobile robot navigation technique using rfid technology. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(9):1908–1917, Sep. 2008. doi: 10.1109/TIM.2008.919902.
- Chih-Yung Chen, Jen-Pin Yang, Guang-Jeng Tseng, Yi-Huan Wu, and Rey-Chue Hwang. An indoor positioning technique based on fuzzy logic. *International Multiconference of Engineers and Computer Scientists*, 2:17–19, 2010.
- Haifa Ben Saber and Mourad Elloumi. Flbra: Indoor wireless sensor networks for fuzzy logic based routing algorithm. *Journal of Engineering Technology*, 6(2):239–257, 2016. doi: 10.21859/jet-060220.
- C.M. Roberts. Radio frequency identification (rfid). *Computers & Security*, 25(1):18–26, 2006. ISSN 0167-4048. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2005.12.003>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016740480500204X>.

- R. Bhattacharyya, C. Floerkemeier, and S. Sarma. Low-cost, ubiquitous rfid-tag- antenna-based sensing. *Proceedings of the IEEE*, 98(9):1593–1600, Sep. 2010. doi: 10.1109/JPROC.2010.2051790.
- C. Balanis. *Antenna theory*. Wiley-Interscience, 2016.
- S. López Soriano. Diseño de antenas para etiquetas de rfid en escenarios de alta exigencia, 2019. URL <http://hdl.handle.net/10803/462033>.
- G. Marrocco. The art of uhf rfid antenna design: impedance-matching and size-reduction techniques. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 50(1):66–79, Feb 2008. doi: 10.1109/MAP.2008.4494504.
- P. V. Nikitin, K. V. S. Rao, S. F. Lam, V. Pillai, R. Martinez, and H. Heinrich. Power reflection coefficient analysis for complex impedances in rfid tag design. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 53(9):2721–2725, Sep. 2005. doi: 10.1109/TMTT.2005.854191.
- J. D. Griffin and G. D. Durgin. Complete link budgets for backscatter-radio and rfid systems. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 51(2):11–25, April 2009. doi: 10.1109/MAP.2009.5162013.
- T. Hassan and S. Chatterjee. A taxonomy for rfid. In *Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'06)*, volume 8, pages 184b–184b, Jan 2006. doi: 10.1109/HICSS.2006.32.
- C. Harrison and R. King. Folded dipoles and loops. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 9(2):171–187, March 1961. doi: 10.1109/TAP.1961.1144962.
- H. Morishita, Yongho Kim, Y. Koyanagi, and K. Fujimoto. A folded loop antenna system for handsets. In *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2001 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting (Cat. No.01CH37229)*, volume 3, pages 440–443 vol.3, July 2001. doi: 10.1109/APS.2001.960129.
- Nasimuddin, Z. N. Chen, and X. Qing. Asymmetric-circular shaped slotted microstrip antennas for circular polarization and rfid applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 58(12):3821–3828, Dec 2010. doi: 10.1109/TAP.2010.2078476.
- C. Calabrese and G. Marrocco. Meandered-slot antennas for sensor-rfid tags. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 7:5–8, 2008. doi: 10.1109/LAWP.2007.914123.
- K. Fotopoulou and B. W. Flynn. Optimum antenna coil structure for inductive powering of passive rfid tags. In *2007 IEEE International Conference on RFID*, pages 71–77, March 2007. doi: 10.1109/RFID.2007.346152.

- L. Ukkonen, M. Schaffrath, D. W. Engels, L. Sydanheimo, and M. Kivikoski. Operability of folded microstrip patch-type tag antenna in the uhf rfid bands within 865–928 mhz. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 5:414–417, 2006. doi: 10.1109/LAWP.2006.883085.
- B. Castaño, Y. E-Martín, and L. R-Moreno, M.and Usero. Sistema inteligente de detección y orientación de usuarios en bibliotecas. *Revista española de Documentación Científica*, 36(1), 2013. doi: 10.3989/redc.2013.1.916.
- M. Kristou, A. Ohya, and S. Yuta. Target person identification and following based on omnidirectional camera and lrf data fusion. In *2011 RO-MAN*, pages 419–424, July 2011. doi: 10.1109/ROMAN.2011.6005248.
- T. Germa, F. Lerasle, N. Ouadah, and V. Cadenat. Vision and rfid data fusion for tracking people in crowds by a mobile robot. *Computer Vision and Image Understanding*, 114(6): 641 – 651, 2010. ISSN 1077-3142. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2010.01.008>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1077314210000317>. Special Issue on Multi-Camera and Multi-Modal Sensor Fusion.
- F. Seco, K. Koutsou, F. Ramos, and A. R. Jiménez. Localización personal en entornos interiores con tecnología rfid. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 10(3):313–324, 2013. doi: 10.1016/j.riai.2013.05.004.
- Jun Zhang, Gui Tian, Adi Marindra, Ali Sunny, and Ao Zhao. A review of passive rfid tag antenna-based sensors and systems for structural health monitoring applications. *Sensors*, 17(2):265, 2017. doi: 10.3390/s17020265.
- D. Bao, Z. Zou, M. Baghaei Nejad, Y. Qin, and L. Zheng. A wirelessly powered uwb rfid sensor tag with time-domain analog-to-information interface. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 53(8):2227–2239, Aug 2018. doi: 10.1109/JSSC.2018.2825455.
- S. Kunkel, R. Bieber, Ming-Shih Huang, and M. Vossiek. A concept for infrastructure independent localization and augmented reality visualization of rfid tags. In *2009 IEEE MTT-S International Microwave Workshop on Wireless Sensing, Local Positioning, and RFID*, pages 1–4, Sep. 2009. doi: 10.1109/IMWS2.2009.5307726.
- G. A. Hofbauer. Fmcw based readout system accuracy enhancement techniques for surface acoustic wave rfid sensors. In *2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, pages 575–578, June 2007. doi: 10.1109/MWSYM.2007.380555.
- A. Rodríguez Carmona and M. Rodelgo. Desarrollo de un sistema de inteligencia artificial para la identificación del tráfico aéreo, 2019. URL <http://calderon.cud.uvigo.es/handle/123456789/242>.

- O. Villota. Cómo la inteligencia artificial altera el paisaje de las seguridades. *Revista Conjeturas Sociológicas*, 7(19):157–198, 2019. ISSN 2313-013X. URL <http://revistas.ues.edu.sv/index.php/conjsociologicas/article/view/1492>.
- J. G. Chacón Rangel, A. S. Flórez Fuentes, and J. E. Rodríguez Fernández. La inteligencia artificial y sus contribuciones a la física médica y la bioingeniería. *Mundo FESC*, 5(9):60–63, dic. 2015. URL <https://www.fesc.edu.co/Revistas/OJS/index.php/mundofesc/article/view/59>.
- J. Castanheira, F. Curado, A. Tomé, and E. Gonçalves. Machine learning methods for radar-based people detection and tracking. In Paulo Moura Oliveira, Paulo Novais, and Luís Paulo Reis, editors, *Progress in Artificial Intelligence*, pages 412–423, Cham, 2019. Springer International Publishing. ISBN 978-3-030-30241-2.
- J. Park and S. H. Cho. Ir-uwband radar sensor for human gesture recognition by using machine learning. In *2016 IEEE 18th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 14th International Conference on Smart City; IEEE 2nd International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS)*, pages 1246–1249, Dec 2016. doi: 10.1109/HPCC-SmartCity-DSS.2016.0176.
- S. Banitaan, M. Azzeh, and A. B. Nassif. User movement prediction: The contribution of machine learning techniques. In *2016 15th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA)*, pages 571–575, Dec 2016. doi: 10.1109/ICMLA.2016.0100.
- A. Treptow, G. Cielniak, and T. Duckett. Real-time people tracking for mobile robots using thermal vision. *Robotics and Autonomous Systems*, 54(9):729 – 739, 2006. ISSN 0921-8890. doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2006.04.013>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889006000832>. Selected papers from the 2nd European Conference on Mobile Robots (ECMR '05).
- J. Garcia-Alvarez and G. Castellanos. Region of interest extraction method using wavelets. In *2009 Second International Conference on Communication Theory, Reliability, and Quality of Service*, pages 119–124, July 2009. doi: 10.1109/CTRQ.2009.28.