



# EVALUACIÓN DE UN RADAR FMCW COMO HERRAMIENTA DIDÁCTICA EN LAS CARRERAS DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ Y TELECOMUNICACIONES

## EVALUATION OF A FMCW RADAR AS A TEACHING TOOL IN THE AUTOMOTIVE AND TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING CAREERS

Pablo J. Mavares F.<sup>1,\*</sup>

Recibido: 10-05-2020, Revisado: 22-09-2020, Aprobado tras revisión: 17-10-2020

### Resumen

En las últimas décadas los sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS) han evolucionado hasta estar disponibles en gran parte de los vehículos fabricados hoy en día; mantener actualizada la enseñanza en esta área es de vital importancia. Este artículo presenta un radar de onda continua modulado en frecuencia que trabaja en la banda de 24 GHz ISM. El propósito es evaluar su desempeño e idoneidad para usarse como herramienta didáctica en la enseñanza en las carreras de Ingeniería Automotriz y de Telecomunicaciones con énfasis en las asignaturas de Matemáticas y Telecomunicaciones con escenarios factibles de encontrar en los laboratorios universitarios. Para ello se describe el escenario de medición, así como el *hardware*, el *firmware* y un algoritmo genérico implementado en MATLAB basado en transformadas rápidas de Fourier para obtener mapas RangeDoppler que permiten junto con el algoritmo CFAR mejorar la detección de objetos al comparar con la detección a partir de un nivel fijo. Se presentan resultados que demuestran que la exactitud y precisión del radar se encuentran dentro de los parámetros para un radar de corto alcance para vehículos, encontrándose, además, una herramienta con gran potencial didáctico, con la cual los estudiantes pueden comprender las aplicaciones que hoy tienen las matemáticas en el ámbito de las telecomunicaciones, especialmente en radares que sirven a sistemas ADAS.

**Palabras clave:** radar FMCW, mapa Range-Doppler, CFAR, herramienta didáctica

### Abstract

In recent decades, advanced driver-assistance systems (ADAS) have evolved to be available in much of the vehicles manufactured today; it is very important to keep teaching in this area up-to-date. This paper presents a frequency modulated continuous wave radar that works in the 24 GHz ISM band. The purpose of this work is to evaluate its performance and suitability to be used as a didactic tool in teaching in the automotive and telecommunications engineering careers with an emphasis on the mathematics and telecommunications subjects, under scenarios feasible to be found in university labs. For this purpose, the measurement scenario is described, as well as the hardware, firmware and a generic algorithm implemented in MATLAB based on fast Fourier transforms to obtain Range-Doppler maps that allow, in conjunction with the CFAR algorithm, to improve detection of objects when compared to the detection from a fixed level. The results presented demonstrate that the accuracy and precision of the radar are within the parameters for a short-range radar for vehicles, also finding a tool with great didactic potential with which students can understand today's applications of mathematics in the field of telecommunications, especially in radars that serve ADAS systems.

**Keywords:** FMCW radar, Range-Doppler map, CFAR, didactic tool.

<sup>1</sup>Departamento de Sistemas de Automatización, Instituto Tecnológico El Pacífico – Ecuador.

Autor para correspondencia: ✉: [pmavares@tecnologicopacifico.edu.ec](mailto:pmavares@tecnologicopacifico.edu.ec) <http://orcid.org/0000-0001-7342-6262>

Forma sugerida de citación: Mavares, P. J. (2021). «Evaluación de un radar FMCW como herramienta didáctica en las carreras de Ingeniería Automotriz y Telecomunicaciones». INGENIUS. N.º 25, (enero-junio). pp. 70-80. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n25.2021.07>.

## 1. Introducción

El radar ha sido empleado tradicionalmente en la industria militar y aeronáutica durante varios años, principalmente debido a la elevada complejidad y el alto costo que ha llevado su uso. No obstante, con el evolucionar de la electrónica y los circuitos integrados (CI) cada día es más común encontrar radares con especificaciones adecuadas para otras tareas, dentro de las que se puede mencionar la industria automotriz [1]. Particularmente en los últimos años se han empleado en los sistemas de ayuda avanzada al conductor (ADAS por sus siglas en inglés) [2]. Para ello, los sistemas de radar miden de forma directa o indirecta la posición, velocidad e incluso la aceleración de una gran variedad de objetos como otros vehículos, peatones o ciclistas gracias a la ejecución de diferentes algoritmos [3].

Aunque actualmente también se emplean sistemas de videocámaras, ultrasonido, etc. Los radares tienen la ventaja de ser poco o nulamente afectados por las condiciones ambientales como la temperatura, iluminación, polvo, etc. Es por ello por lo que pueden funcionar de manera individual o en conjunto con otras tecnologías para garantizar la elevada exactitud, precisión, confiabilidad y adaptabilidad que requieren los sistemas ADAS [4].

Además de la detección de objetos, los radares tienen otras aplicaciones como la identificación de las condiciones físicas, particularmente el coeficiente de fricción de una carretera. Algo que puede ser empleado para emitir alertas o tomar acciones para evitar accidentes, especialmente bajo condiciones adversas como lluvia o hielo [5], [6].

También, existe la posibilidad de usar transpondedores o tags para el envío de información acerca de usuarios en la carretera como otros vehículos o peatones y también información acerca de las condiciones de conducción de forma tal que se puedan evitar accidentes o infracciones de tránsito [5].

Los radares de onda continua modulados en frecuencia (FMCW por sus siglas en inglés) se han aplicado satisfactoriamente para la medición de la posición y velocidad de objetos desde hace bastante tiempo [7].

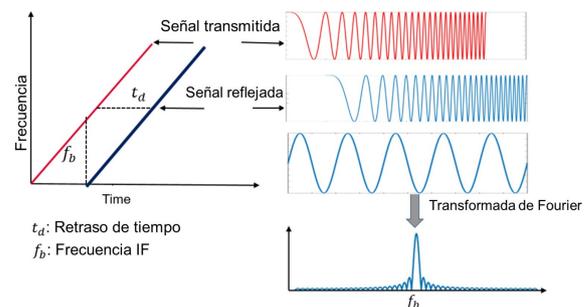
Los radares FMCW trabajan básicamente en frecuencias de 24 y 77 GHz en la industria automotriz. Para un alcance corto de hasta unas decenas de metros es posible usar un radar de 24 GHz, mientras que para alcance largo de unos 250 m se emplea uno a 77 GHz [3], [5].

Diversas investigaciones se han realizado desde una perspectiva técnica para evaluar diversos sistemas de radar FMCW tanto a 24 como 77 GHz para su uso en la industria automotriz [6–12]. No obstante, en este trabajo se plantea el uso de estos radares desde una perspectiva diferente, que aparte de la evaluación del desempeño sea enfocada en su potencialidad en el uso como herramienta didáctica que permita im-

pulsar la comprensión de conceptos que en muchas ocasiones pueden ser bastantes complejos de entender como es la transformada rápida de Fourier (FFT), los radares y sus aplicaciones en los campos de las telecomunicaciones y la industria automotriz. Por ello se propone el empleo de tarjetas de evaluación de radares considerando los beneficios en el desarrollo de competencias específicas y transversales en estudiantes.

### 1.1. Parámetros importantes en un radar FMCW

Para procesar y obtener la posición, velocidad y ángulo es necesario considerar diversas ecuaciones, cuya derivación puede encontrarse en [4], [13]. Estas ecuaciones se derivan a partir de la siguiente idea general del funcionamiento de un radar FMCW. El radar transmite una señal con frecuencia variable en forma lineal (TX) con cierto ancho de banda, esta señal es reflejada por un cuerpo que se encuentre en el espacio de radiación de la antena y llega como una señal a la antena receptora (RX) con un tiempo de retardo proporcional a la distancia del cuerpo. Estas señales son mezcladas y se obtiene una señal de frecuencia intermedia (IF), cuya frecuencia es proporcional a la distancia del cuerpo (Figura 1). Por lo tanto, cuerpos a diferentes distancias generarán diferentes frecuencias de señal IF. Por otra parte, pequeñas diferencias de posición generarán diferentes fases de las señales IF lo que permite determinar la velocidad de los cuerpos [2], [4], [14].



**Figura 1.** Principio básico de operación de un radar FMCW [15]

El valor de la distancia a un cuerpo se obtiene a partir de la Ecuación 1.

$$R = \frac{cT_c f_b}{2B} \quad (1)$$

Donde:

- $R$  es la distancia del objeto
- $c$  es la rapidez de la luz
- $T_c$  es el tiempo del *chirp*
- $f_b$  es la frecuencia de la señal IF (*beat*)
- $B$  es el ancho de banda

La resolución de distancia o capacidad para resolver dos objetos cercanos se determina de acuerdo con la Ecuación 2.

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (2)$$

Donde:

$\Delta R$  es la resolución  
 $c$  es la rapidez de la luz  
 $B$  es el ancho de banda

La distancia máxima puede determinarse en función de la frecuencia de muestreo según la Ecuación 3.

$$R_{max} = \frac{f_s c}{2S} \quad (3)$$

Donde:

$R_{max}$  es el alcance o distancia máxima  
 $f_s$  es la frecuencia de muestreo  
 $c$  es la rapidez de la luz  
 $S$  es la pendiente de la modulación  $S = B/T_c$

Por otra parte, la velocidad máxima está dada por la Ecuación 4.

$$v_{max} = \frac{c}{4f_c T_c} \quad (4)$$

Donde:

$v_{max}$  es la velocidad máxima  
 $c$  es la rapidez de la luz  
 $f_c$  es la frecuencia del *chirp*  
 $T_c$  es el tiempo del *chirp*

Ahora en caso de tener diferentes objetos se tendrán diferentes frecuencias, por lo tanto, en lugar de aplicar la Ecuación 1, una de las técnicas más comunes es realizar un análisis espectral a partir de la transformada rápida de Fourier (FFT) de acuerdo con la Figura 2 para obtener un mapa Range-Doppler.

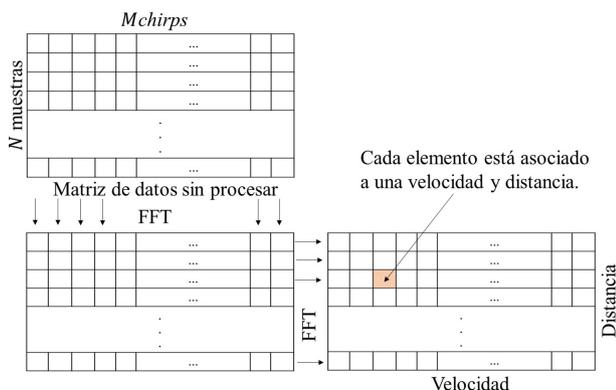


Figura 2. 2D Range-Doppler FFT

El ángulo de llegada (AoA por sus siglas en inglés) puede obtenerse a partir de una tercera transformada de Fourier (3D FFT), de forma que los picos en el espectro de frecuencia correspondan a un ángulo determinado, esto se realiza normalmente cuando se tienen cuatro antenas receptoras y una o más antenas transmisoras para obtener un arreglo de varias entradas y varias salidas (MIMO por sus siglas en inglés) [8]. Cuando el circuito cuenta con solo dos antenas receptoras es preferible obtener el AoA a partir de la Ecuación 5.

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{\lambda \Delta \varphi}{2\pi d} \quad (5)$$

Donde:

$\alpha$  es el ángulo de llegada  
 $\lambda$  es la longitud de onda  
 $\Delta \varphi$  es la diferencia de fase entre la señal de las antenas  
 $d$  es la distancia entre las antenas

## 1.2. Aplicaciones de radares en la industria automotriz

En los últimos años los radares se han empleado en vehículos principalmente por razones de seguridad como los sistemas ADAS, anticipando necesidades y tomando la iniciativa cuando es necesario [16]. En la industria automotriz las aplicaciones de los radares se dividen principalmente en radares de corto alcance (SRR) que permiten manejar detección de puntos ciegos (BSD), asistencia al cambio de vía (LCA), alerta de tráfico cruzado en las partes frontal y trasera (CTA), alerta de impacto lateral y alerta de ciclistas en la vía lateral (Figura 3). Por otra parte, se encuentran los radares de medio y largo alcance (MRR y LRR) responsables del frenado automático de emergencia (AEB) frente a colisiones con peatones y con otros vehículos, así como el control de cruceo adaptativo (ACC) [17].

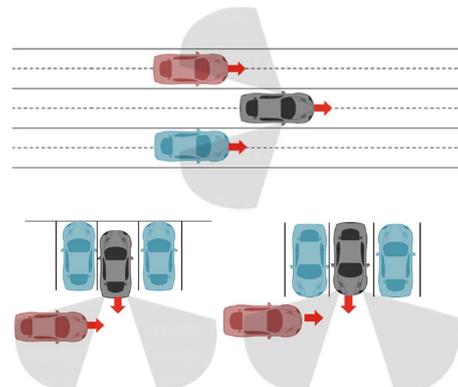


Figura 3. Ejemplo de escenario de corto alcance. Detección de puntos ciegos y alerta de tráfico cruzado

El radar seleccionado en este trabajo, cuyas características se detallan más adelante, es de corto alcance por lo que responde a los requerimientos típicos que se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Requerimientos de radar de corto alcance [17]

Requerimientos de los parámetros del radar	Requerimientos BSD	Requerimientos CTA
Alcance (m)	1-50	2-60
Exactitud en alcance (m)	$\pm 0,10$	pm0,20
Resolución en alcance (m)	0,75	1
Velocidad (m/s)	-70 to + 70	-70 to + 70
Exactitud en velocidad (m/s)	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$
Resolución en velocidad (m/s)	0,25	0,3
Azímüt ( $^{\circ}$ )	$\pm 75$	$\pm 40$
Exactitud en azímüt ( $^{\circ}$ )	$\pm 5$	$\pm 5$
Resolución en azímüt ( $^{\circ}$ )	15	15
Elevación ( $^{\circ}$ )	$\pm 6$	$\pm 10$
Exactitud elevación ( $^{\circ}$ )	pm0,1	$\pm 5$
Resolución en elevación ( $^{\circ}$ )	-	-

### 1.3. Herramientas didácticas y el aprendizaje orientado a competencias

Dentro de los aspectos que involucran la enseñanza a nivel de ingeniería cobra vital importancia las prácticas de laboratorio. Las cuales según [18] deben ser capaces de proporcionar información suficiente que permita definir y caracterizar actividades en las cuales los estudiantes desarrollen competencias específicas y transversales.

Por ejemplo, Arduino en los últimos años ha sido empleado con frecuencia gracias a su facilidad de manejo y bajo de costo de adquisición [19]. Esto es algo que influye en países donde no se cuentan con los recursos adecuados para adquirir equipos que pueden ser bastantes costosos, por ello emplear tarjetas de desarrollo de bajo costo, en este caso de radar, puede generar amplios beneficios. En específico permiten mejorar el acceso a dispositivos que, como se ha mencionado, han sido de uso casi exclusivo en el área militar y aeronáutica. Asimismo, permite mejorar el acceso a tecnología pionera que se está desarrollando en los vehículos de alta, media e incluso de baja gama. En este sentido, es importante que en América Latina se prepare de forma adecuada a los futuros ingenieros y técnicos en los conocimientos y competencias para poder realizar mantenimiento a los vehículos y, de igual forma, participar en investigación y desarrollo en estas áreas en vista de que en la actualidad los automóviles están equipados con una gran de dispositivos electrónicos [20].

Por otra parte, la enseñanza de la teoría se beneficia y armoniza con metodologías experimentales adecuadas, no solo en los laboratorios tradicionales (p. ej. electrónica o circuitos eléctricos), sino aquellas asignaturas que, tradicionalmente, no involucran actividades experimentales como las Matemáticas.

## 2. Materiales y métodos

En la actualidad diversas empresas tecnológicas han sacado al mercado tarjetas que en un principio sirven para evaluar el desempeño de los circuitos integrados que ofrecen, tal es el ejemplo de Analog Devices que ofrece la Demorad para diversos chipset incluidos el ADF5901 (circuito integrado de microondas a 24 GHz con 2 canales para transmisión), ADF5904 (receptor de 4 canales a 24 GHz) y AD4159 (encargado de generar las rampas triangulares o diente de sierra) y otros circuitos que permiten un completo sistema de radar integrado en una tarjeta [21]. También Infineon ofrece las tarjetas Distance2Go [22] o Position2Go [23], entre otras.

Para este trabajo se ha optado por la tarjeta Position2Go considerando que es una de las más sencillas (desde el punto de arquitectura) que se pueda encontrar en el mercado, con un uso relativamente fácil y un costo asequible. Se evalúa su desempeño para obtener mapas RangeDoppler, posición y detección de objetos mediante el algoritmo CFAR (Constant False Alarm Rate) o tasa de falsa alarma constante que es uno de los más sencillos de implementar y comprender desde el punto de vista didáctico.

### 2.1. hardware

La tarjeta Position2Go incluye todos los elementos necesarios para la generación, recepción y procesamiento de las señales. Esto dividido en cuatro secciones importantes: la parte de radiofrecuencia (RF) incluye el CI BGT24MTR12 que es el principal encargado de generar y recibir las señales a 24 GHz [23] así como tres antenas, una para la transmisión y dos para la recepción. También cuenta con amplificadores analógicos que permiten la interfaz entre la RF y la parte digital. Incluye una parte de control de frecuencia y una parte digital, específicamente cuenta con el microcontrolador XMC4700 ARM de 32 bits para muestrear y procesar los datos, todo esto montado en una placa que permite el acceso mediante una conexión USB 2.0 que también posee conexión CAN en caso de que se requiera una comunicación directa con una unidad de control electrónica (ECU) de un vehículo. Por lo tanto, se puede decir que es todo un sistema de radar integrado que permite su control y programación directamente mediante algunos de los protocolos de conexión señalados (en este trabajo se ha empleado el USB). En la Figura 4 se muestra la arquitectura general de la tarjeta, mientras que en la Figura 5 se muestra la tarjeta empleada en este trabajo.

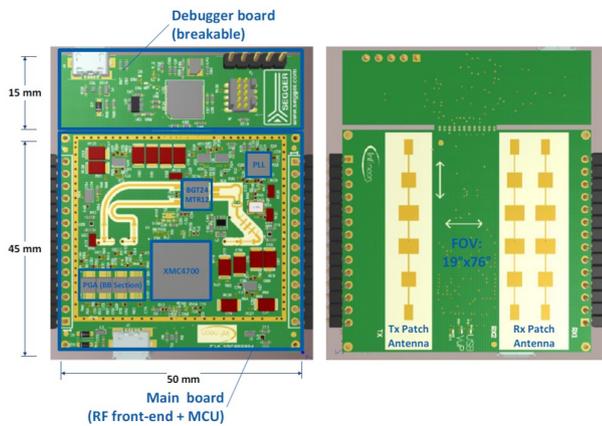


Figura 4. Tarjeta Position2Go

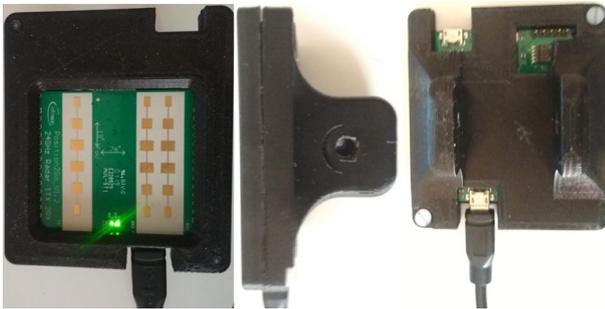


Figura 5. Tarjeta Position2Go empleada

## 2.2. Diseño experimental

Position2Go incluye un *firmware* que facilita el control de los diferentes CI y periféricos a través del microcontrolador XMC4700. Este *firmware* permite realizar cambios en la configuración de parámetros de interés y proporcionar las señales procesadas o no. Existe una interfaz de usuario para obtener directamente la señal procesada, generando el espectro de frecuencia y determinando la posición y velocidad de diferentes objetos [24]. Este *toolbox* de Infineon (Figura 6) permite mostrar los cálculos realizados por el microcontrolador en cuenta que por defecto los cálculos los realiza con un límite o *threshold* de 100 LSB que resulta en un alcance de aproximadamente 12 m para peatones y 15 m para una sección equivalente de radar (RCS) de  $1 \text{ m}^2$  [25]. No obstante, trabajar con esta interfaz limita la capacidad de procesar las señales, además, no permite obtener las ventajas didácticas que se buscan (aunque puede ser un punto de partida). Por lo anterior, se plantea adquirir la señal IF y procesarla directamente en MATLAB. Para esto se dispone de una API que permite modificar y obtener valores directamente [26]. En la Tabla 2 se muestran las características seleccionadas gracias a diversas líneas de códigos implementadas.



Figura 6. Radar GUI de Infineon

Tabla 2. Parámetros del sistema

Parámetros	Valor
Tiempo de subida de rampa ( <i>up-chirp</i> ): $\tau_{up}$	$301 \mu\text{s}$
Tiempo de bajada de rampa ( <i>down-chirp</i> ): $\tau_{down}$	$100 \mu\text{s}$
Tiempo de espera entre rampas $\tau_{sby}$	$100 \mu\text{s}$
Tiempo de repetición de pulso: $\tau_{up} + \tau_{down} + \tau_{sby}$	$501 \mu\text{s}$
Ancho de banda ( $B$ )	$301 \text{ MHz}$
Frecuencia de muestreo ( $f_s$ )	$850 \text{ MHz}$
Muestras por rampa ( <i>samples per chirp</i> )	256
Rampa por cuadro ( <i>chirps per frame</i> )	16 (máximo)
Resolución de alcance ( $\Delta R$ )	$75 \text{ cm}^*$
Alcance mínimo ( $R_{min}$ )	$0 \text{ m}$
Alcance máximo ( $R_{max}$ )	$14 \text{ m}^{**}$

\* Teórico sin ventanas

\*\* Distancia máxima a evaluar

Cabe destacar que, las condiciones detalladas no son típicas para la evaluación de radares. Sin embargo, se ha preferido un escenario más cotidiano y adaptable a la realidad universitaria por tres motivos.

El primero se debe a que en un ambiente de laboratorio universitario es difícil tener acceso a condiciones reglamentadas para una evaluación correcta, como la disposición de una cámara anecoica (Figura 7) y reflectores cuadrados o triangulares para evitar dispersiones en las medidas y así evaluar de forma apropiada la exactitud y precisión del radar; así como vehículos para pruebas, un vehículo estático y un peatón son condiciones más factibles de tener en un ambiente educativo. El segundo motivo es que los radares FMCW a 24 GHz son empleados para corto alcance y bajas velocidades según se ha detallado anteriormente. Finalmente, el principal objetivo didáctico planteado es la comprensión y puesta en práctica de los aspectos teóricos y no de una evaluación profunda de las características propias de la tarjeta empleada.

Como aspecto adicional es menester mencionar que, debido a la limitación de libre circulación y el confi-

namiento durante gran parte del 2020 (especialmente entre los meses de marzo y junio) y el cierre de las universidades, las mediciones fueron realizadas en un ambiente no ideal, por la imposibilidad de acceder al material de trabajo que se encontraba en los laboratorios.



Figura 7. Cámara anecoica [27]

Para realizar las mediciones se ha considerado el siguiente escenario de acuerdo con la Figura 8, donde se ha tomado en cuenta un vehículo estático a una distancia de 2,9 m, un peatón estático a una distancia de 7,5 m, una pared a una distancia de 12,3 m, además de un peatón que recorre corriendo en línea recta desde la posición inicial del radar hasta la pared y regresa.

A partir de la configuración detallada en la Figura 8 se realizaron diversas mediciones considerando los datos (señal IF) que suministra el firmware directamente a MATLAB, donde cada medición tiene 50 *dataframes* mediante un bucle for que puede ser modificado para obtener la cantidad deseada. Un *dataframe* consiste en los datos puros (señal IF) a ser procesados en diversas funciones implementadas en MATLAB.

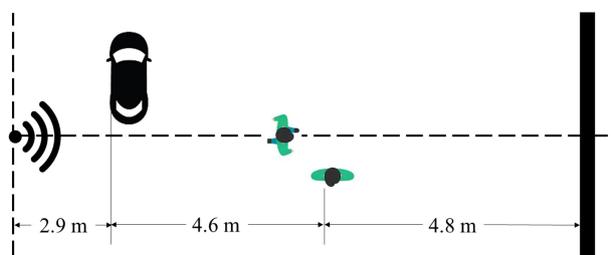


Figura 8. Escenario de medición

### 2.3. Procesamiento en MATLAB

El procesamiento de datos puede resumirse en 4 niveles. Primero se deben definir los parámetros detallados en la Tabla 2 siguiendo los métodos listados en [26], calcular los límites de medición a partir de las ecuaciones detalladas, definir la ventana a aplicar que en este caso se ha optado por una ventana Hanning con el propósito de reducir la amplitud de los lóbulos adyacentes al pico principal en la FFT, reorganizar los

datos, esto debido a que el *firmware* envía los datos por defecto en un arreglo de tres dimensiones. Donde la primera dimensión contiene todas las muestras por rampa (*chirp*) para la estimación de distancia; la segunda corresponde a las diferentes rampas por cuadro (*chirps per frame*) para la estimación de velocidad y la tercera, a la antena; sin embargo, se ha optado por trabajar en dos arreglos de tres dimensiones, uno para cada antena y sustituyendo la tercera dimensión por el número de medición de forma tal que se obtuvieron dos arreglos de tamaño  $N \times M \times L$ , siendo  $N$  la cantidad de muestras por *chirps* limitadas en frecuencia correspondiente al intervalo de distancia ([2,14] metros);  $M$  la cantidad de muestras por *frame*, esto corresponde a  $M = 16 \times 256 = 4096$ ; y finalmente  $L$  mediciones siendo en este caso  $L = 50$  mediciones. El intervalo entre mediciones ha sido de 0.2 s.

Luego se ha aplicado una primera FFT al primer *chirp* de forma que se obtenga el espectro de distancia con un tamaño de  $2^{12}$ , por lo tanto, se rellenan con ceros  $2^{12} - N$  elementos mediante *zero padding*, lo cual se realiza automáticamente en MATLAB (ver [28]), el propósito es aumentar la resolución de manera tal que sea más sencillo reconocer dos frecuencias cercanas [29]. Esto resulta en la llamada Range-FFT.

Posteriormente se aplica una nueva FFT, pero esta vez a través de los diferentes *chirps* de forma tal que se obtenga el mapa Range-Doppler.

Finalmente, se ha aplicado el algoritmo CFAR para identificar los diferentes objetos a partir de lo detallado en [30]. Esta tarjeta presenta la desventaja de ser limitada en ancho de banda (200 MHz para 24 GHz) y en cantidad de *chirps/frame*, por lo tanto, el tamaño de las celdas para la aplicación del CFAR debe ser elevado, en este caso se optó por  $90 \times 90$  de guardia y  $30 \times 30$  de entrenamiento, con un factor  $K = 10^{8/20}$ . Un diagrama de flujo con una generalización del algoritmo empleado es mostrado en la Figura 9.

La programación se ha desarrollado a partir de *demos* de Infineon [23], Analog Devices [21] y el trabajo de Guerrero [11] aplicado a otra tarjeta de desarrollo. Sin embargo, estos programas han sido modificados en grandes rasgos para incluir:

- Capacidad de exportar grabaciones (.AVI) en MATLAB

- Capacidad de crear y exportar gráficos polares de la posición de los cuerpos.

- Capacidad de aislar y analizar *dataframes* deseados.

- Aplicación de algoritmo CFAR.

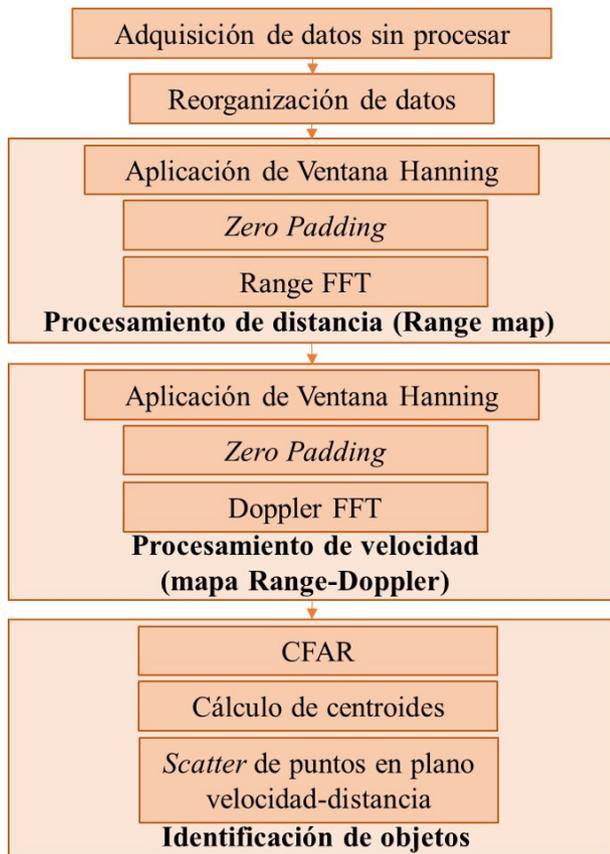


Figura 9. Diagrama de procesamiento de señal

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Firmware e Infineon Toolbox

A partir de los datos directamente procesados por el microcontrolador se obtuvo el mapa de puntos mostrado en la Figura 10, en el cual se evidencia varias detecciones falsas (*false detection*) o detecciones erróneas (*misdetecion*) debido a que el *threshold* es fijo por defecto según se ha detallado anteriormente.

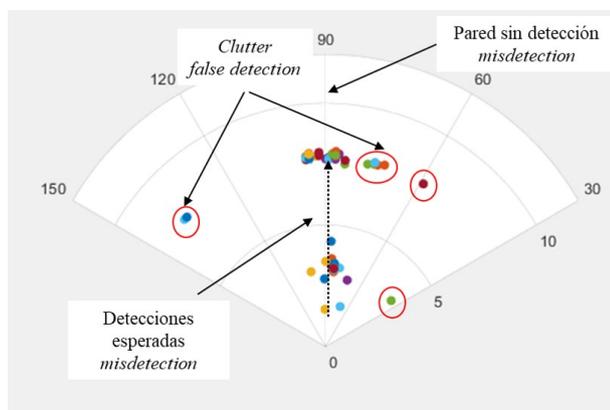


Figura 10. Mediciones a partir del firmware

Por otra parte, aunque esta primera aproximación para los estudiantes puede parecer suficiente, el hecho de que solo se muestren los datos ya procesados limita los objetivos que se buscan para utilizar la tarjeta, es decir, no se evalúa didácticamente la obtención de los resultados, sino que solo son mostrados sin profundizar en el algoritmo empleado para ello. Aunque una modificación del algoritmo y una implementación directa del CFAR en el microcontrolador es posible, su implementación no es sencilla y por este motivo el resto de los resultados mostrados fueron obtenidos a partir de la implementación en MATLAB.

#### 3.2. MATLAB

El mapa Range-Doppler de la Figura 11 se ha seleccionado entre los 50 generados, en él es posible apreciar el inconveniente de ancho de banda de los radares de 24 GHz de 200 MHz y es que no poseen una buena resolución en distancia, sumado a que por defecto los *chirps* por *frame* de la Position2Go están limitados a 16, cuando en otras tarjetas de 77 GHz, por ejemplo, se pueden obtener hasta 128 por *frame*.

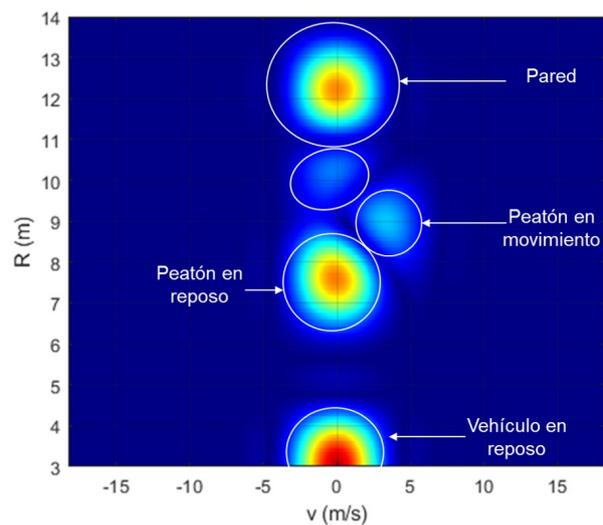


Figura 11. Mapa Range-Doppler

En la Figura 11 se pueden observar cinco áreas correspondientes a máximos relativos en la FFT, la identificación mediante algoritmos que permitan discriminar automáticamente entre los diferentes cuerpos que puedan estar en el entorno se encuentran fuera del alcance de este trabajo, particularmente debido a que el estudio se ha planteado como herramientas en ambientes de pregrado, lo que implica una complejidad limitada.

En este punto sería importante aclarar al estudiante que si bien este mapa permite una identificación rápida de forma visual no es muy práctico desde el punto de vista computacional puesto que un microcontrolador por sí solo no sería capaz de identificar los cuerpos sin

un algoritmo adicional que se encargue de ello (en [31] se detalla con profundidad uno de estos algoritmos). Es en este punto donde la aplicación del algoritmo CFAR facilita obtener un límite de detección de forma dinámica de forma tal que se tome en cuenta la potencia con respecto al ruido (SNR). Cabe destacar que el CFAR por sí solo no permite hacer la discriminación acerca de los cuerpos (vehículos, peatones, motos, etc.).

Dado que el factor K ha sido configurado relativamente bajo de allí que resulte una gran cantidad de áreas al aplicar el CFAR (Figura 12). Para solucionar esto se han tomado solo aquellos puntos que tengan una potencia de al menos  $-40$  dB, valor obtenido empíricamente a partir de diversas mediciones (para una menor potencia generalmente se trató de detecciones falsas), este valor también puede ser dinámico, considerando que la potencia reflejada depende de la ecuación de radar que a su vez depende de la distancia a la que se encuentre el cuerpo, al mismo tiempo, los niveles de reflexión son diferentes de acuerdo con el objeto, por ejemplo, un vehículo refleja más potencia que un peatón, partiendo de que las ondas electromagnéticas (como las transmitidas por un radar) se reflejan en los cuerpos de acuerdo con su sección equivalente de radar que depende de diversos factores tales como el área, el material (de la ropa o el vehículo), la forma, etc., esto puede servir para poder clasificar los cuerpos. En la Tabla 3 se muestran algunos de los valores obtenidos a partir de los centroides para cada una de las áreas (Figura 13).

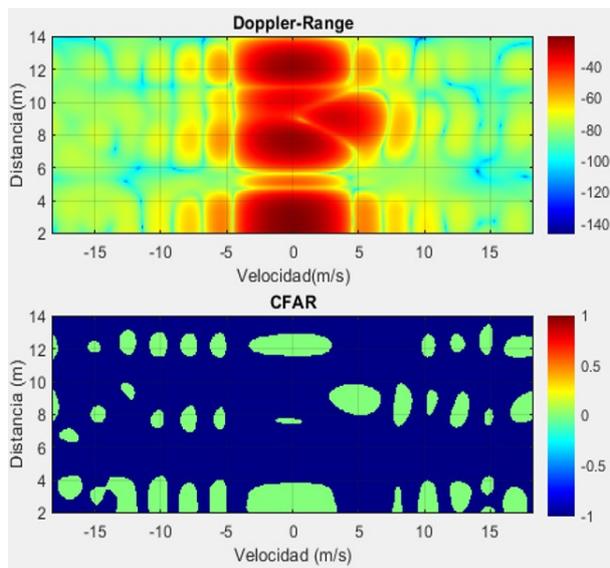


Figura 12. Mapa Range-Doppler en dB y resultado de CFAR

En la Figura 14 se muestran los objetos detectados considerando el límite de  $-40$  dB. Es evidente entonces que el CFAR permite identificar objetos de forma correcta aun cuando la velocidad del peatón ha sido un poco más alta de la real (Tabla 4); en este sentido,

esto es algo que este trabajo aporta a la detección de objetos en relación con la realizada en la interfaz gráfica de Infineon. Es de aclarar que los resultados no han sido optimizados, de esta manera, se pueden mostrar condiciones en las que un estudiante podría implementar un algoritmo no optimizado e incluso así obtener unos resultados aceptables.

Tabla 3. Datos ordenados considerando la potencia

Distancia (m)	Velocidad (m/s)	Potencia (dB)
2,8564	-0,0803	-21,1564
7,5806	-0,2945	-23,2399
12,2498	-0,0803	-23,3293
8,9539	4,8109	-33,7255
2,9114	-5,6320	-53,0894
⋮	⋮	⋮

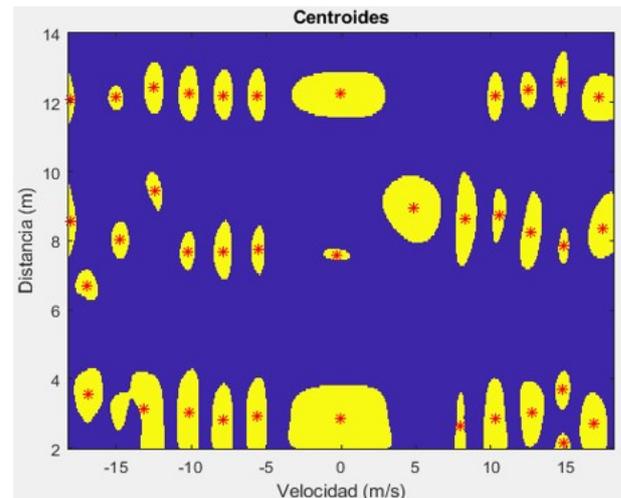


Figura 13. Datos ordenados considerando la potencia

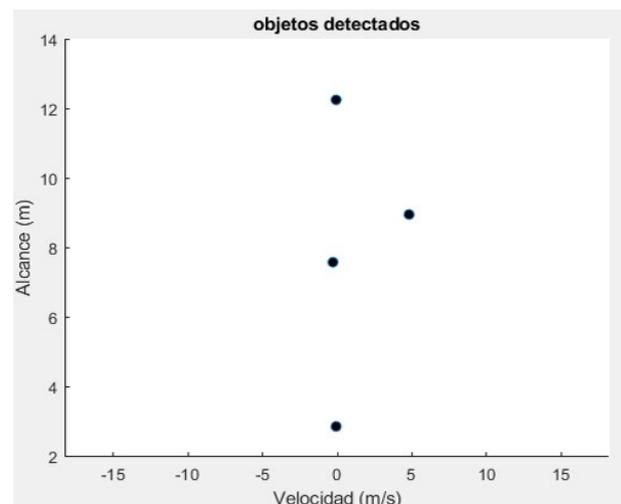


Figura 14. Identificación de objetos mediante CFAR

**Tabla 4.** Datos ordenados considerando la potencia

	Distancia medida (m)	Distancia real (m)	Velocidad medida (m/s)	Velocidad real (m/s)
Vehículo	2,8564	2,9	-0,0803	0
Peatón en reposo	7,5806	7,5	-0,2945	0
Pared	12,2498	12,3	-0,0803	0
Peatón en movimiento	8,9539	≈ 9	4,8109	≈ 4

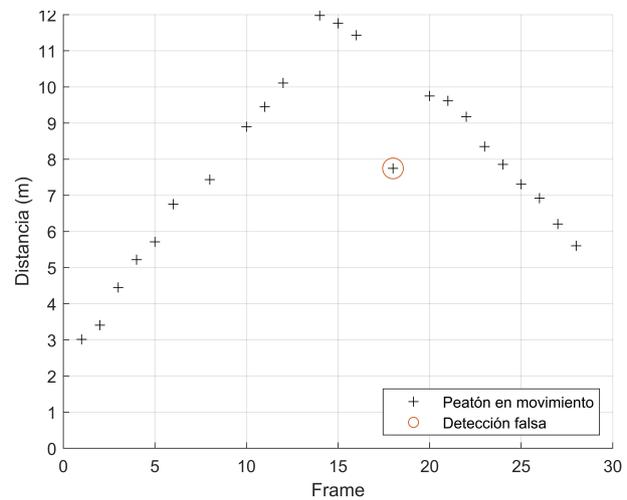
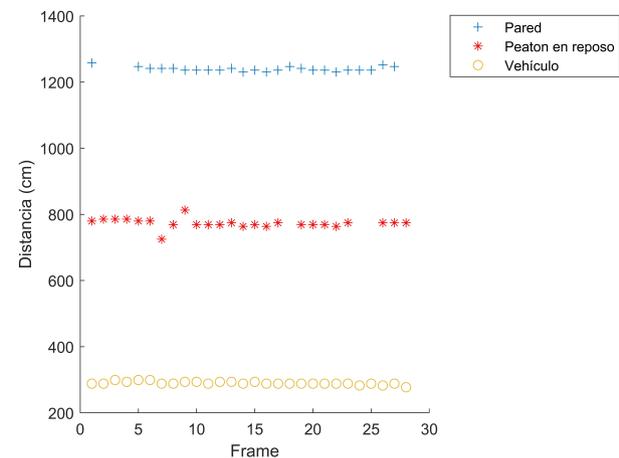
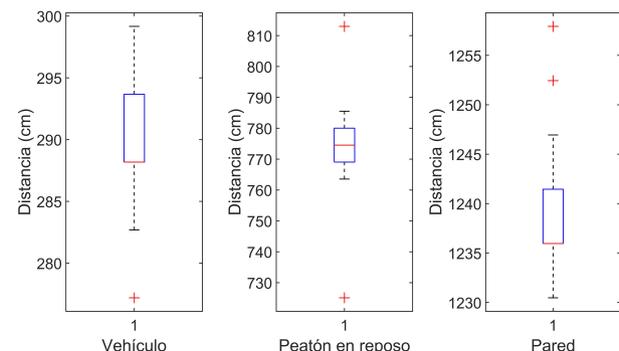
Las Figuras 11–14 muestran uno de los cuadros (*frames*) de una de las mediciones que ha sido seleccionada, por motivos de la estructura del presente documento no pueden ser mostrados en su totalidad. Sin embargo, en las Figuras 15 y 16 se muestran las distancias obtenidas a partir de la aplicación del CFAR en cada uno de los *dataframe*. La Figura 15 muestra el peatón en movimiento, donde se tiene una tasa efectiva de detección de 78,57 % (sin considerar las detecciones falsas y las no detecciones). Por otra parte, en la Figura 17 se muestra la dispersión para los cuerpos en reposo. En la Tabla 5 se detallan algunos valores estadísticos que se encuentran dentro de los valores de la Tabla 1. No obstante, es importante mencionar que la precisión y exactitud mostrada no necesariamente refleja los valores reales del radar, debido a las restricciones mencionadas con anterioridad. La importancia de estos resultados radica en que aún en condiciones no óptimas, el radar logra tener una buena precisión y exactitud, por lo tanto, se espera que los estudiantes logren resultados adecuados sin recurrir a una calibración profunda y algoritmos más complejos.

A partir de estos resultados, el empleo de esta tarjeta de evaluación se perfila como una herramienta adecuada a usar en prácticas de laboratorio puesto que abarca competencias específicas: la comprensión de fundamentos matemáticos como la transformada de Fourier, números complejos, operaciones matriciales, análisis espectral, entre otros, así como fundamentos físicos: cinemática, ondas electromagnéticas, efecto Doppler, etc. Por otra parte, con una adecuada guía del docente se puede fomentar competencias transversales de acuerdo con [32], tales como: conocimientos de informática relativos al ámbito de estudio, específicamente se plantea el uso de MATLAB y otras herramientas informáticas. Asimismo, se puede fomentar el trabajo en equipo, aprendizaje autónomo, adaptación a nuevas situaciones, capacidad de aplicar conocimientos teóricos en la práctica, uso de Internet como fuente de información, entre otras.

Todo lo anterior en un ambiente adecuado, que no genere frustración en los alumnos y una tutoría conveniente puede traducirse en un gran impacto en la formación de estos.

Desafortunadamente no se han encontrado casos de estudios anteriores específicos acerca de la viabilidad de la propuesta del uso de radares como herramienta didáctica y la evaluación del impacto. Es por ello por lo que en este trabajo se analiza la viabilidad

tanto técnica como didáctica de emplear una tarjeta de evaluación de las numerosas que se encuentran en el mercado.

**Figura 15.** Identificación de objetos mediante CFAR**Figura 16.** Identificación de objetos mediante CFAR**Figura 17.** Identificación de objetos mediante CFAR

**Tabla 5.** Estadísticos para la medición de distancia de los cuerpos en reposo

Distancia			
Real (cm)	Media (cm)	Mediana (cm)	Desviación estándar (cm)
290	289,75	288,18	4,84
750	773	774,54	14,03
1230	1239,40	1235,96	6,69

#### 4. Conclusiones

Este trabajo muestra una tarjeta de evaluación basada en un radar FMCW que opera a 24 GHz con un ancho de banda de 200 MHz. El desempeño empírico sin considerar un análisis estadístico que permita determinar la tasa de detecciones incorrectas y sin una calibración precisa es más que aceptable para su uso como herramienta educativa con el propósito de entender el funcionamiento de los radares de corto alcance y su aplicación en vehículos. La obtención de los datos y el procesamiento de estos son relativamente sencillos, pudiendo desarrollarse tanto como el investigador o docente así lo desee. Sin embargo, se recomienda iniciar por la aplicación de un algoritmo que involucre la transformada rápida de Fourier en dos dimensiones para obtener mapas RangeDoppler y luego mediante un algoritmo CFAR mejorar la detección de objetos con respecto a la implementación de un límite fijo. En caso de querer profundizar en la clasificación de cuerpos, se recomienda investigar acerca de los diferentes algoritmos disponibles.

Aunque no se ha comparado con otras tarjetas, los resultados sumados al bajo costo de la Position2Go muestran que la implementación de su uso en prácticas de laboratorio en las carreras de Ingeniería Automotriz y de Telecomunicaciones puede traer numerosos beneficios en el desarrollo de las capacidades específicas y transversales de los estudiantes.

#### Referencias

- [1] V. Jain and P. Heydari, *Automotive radar sensors in silicon technologies*. Springer Science & Business Media, 2012. [Online]. Available: <https://bit.ly/3kak6ER>
- [2] J. Gamba, *Radar Signal Processing for Autonomous Driving*. Springer, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3k8LP95>
- [3] C. Kumar and A. Killedar, *mmWave Radar – ADAS Applications*, 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/3p6XeK9>
- [4] M. Nazir, “Automotive radar target detection using ambiguity function,” Ph.D. dissertation, University of Birmingham, 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3n2kI1g>
- [5] P. Pursula and V. Viikari, “Novel automotive radar applications,” in *Millimetre Wave Days Proceedings*, 2011, millimetre Wave Days 2011: 6th ESA Workshop on Millimetre-Wave Technology and Applications and 4th Global Symposium on Millimeter Waves; Conference date: 23-05-2011 Through 25-05-2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/2U5GZi0>
- [6] N. Bouhlef, S. Meric, C. Moullec, and C. Brousseau, “FMCW radar system for transponder identification,” *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 81, pp. 101–122, 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.2528/PIERB18032007>
- [7] F. Ali and M. Vossiek, “Detection of weak moving targets based on 2-D range-doppler FMCW radar Fourier processing,” in *German Microwave Conference Digest of Papers*, 2010, pp. 214–217. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ni0lgE>
- [8] J. Kim, J. Chun, and S. Song, “Joint range and angle estimation for FMCW MIMO radar and its application,” 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/2Uk63Ck>
- [9] B. Kim, Y. Jin, S. Kim, and J. Lee, “A low-complexity FMCW surveillance radar algorithm using two random beat signals,” *Sensors (Basel)*, vol. 19, no. 3, p. 608, 2019. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.3390%2Fs19030608>
- [10] J. Svensson, “High resolution frequency estimation in an FMCW radar application,” 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/2UjCXTs>
- [11] E. Guerrero-Menéndez, “Frequency-modulated continuous-wave radar in automotive applications,” 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3pp6slg>
- [12] M. D. Fontaine, *Traffic Monitoring*, 2009. [Online]. Available: <https://bit.ly/36ne6nm>
- [13] V. Issakov, *Microwave Circuits for 24 GHz Automotive Radar in Silicon-based Technologies*. Springer, 2010. [Online]. Available: <https://bit.ly/35nfJST>
- [14] C. Händel, H. Konttaniemi, and M. Autioniemi, *State-of-the-Art Review on Automotive Radars and Passive Radar Reflectors Arctic Challenge research project*. Lapland University of Applied Sciences, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/36u2yig>

- [15] Infineon, “Position2go software user manual,” Infineon, Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/38ASmqE>
- [16] Mikusova, Miroslava, “Crash avoidance systems and collision safety devices for vehicle occupants,” *MATEC Web Conf.*, vol. 107, p. 00024, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710700024>
- [17] K. Ramasubramanian and K. Ramaiah, “Moving from legacy 24 ghz to state-of-the-art 77-ghz radar,” *ATZelegtronik worldwide*, vol. 13, no. 3, pp. 46–49, Jun. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s38314-018-0029-6>
- [18] J. M. Canino, V. Mena, J. Alonso, A. Ravelo, and E. García, “Prácticas de laboratorio en contextos de enseñanza-aprendizaje basados en competencias: dificultades y oportunidades,” in *I Jornadas Iberoamericanas de Innovación Educativa en el ámbito de las TIC Las Palmas de Gran Canaria*, 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/2L2K01r>
- [19] S. Kocijancic, “Contemporary challenges in teaching electronics to stem teachers,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 2043, no. 1, p. 020002, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.5080021>
- [20] M. V. Noroña M. and M. F. Gómez B., “Desarrollo e innovación de los sistemas mecatrónicos en un automóvil: una revisión,” *Enfoque UTE*, vol. 10, pp. 117–127, 03 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v10n1.350>
- [21] Analog Devices, “Radar demonstration platform. evaluates radar chipset including the ADF5901, ADF5904 and ADF4159.” Analog Devices, Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/2YRxHK8>
- [22] Infineon, “Demo distance2go,” Infineon, Tech. Rep., 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/35Rr7VI>
- [23] —, “Demo position2go,” Infineon, Tech. Rep., 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2SUt6D8>
- [24] —, “Infineon toolbox,” Infineon, Tech. Rep., 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3lrUbtJ>
- [25] —, “Application notes,” Infineon, Tech. Rep., 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bmpDnt>
- [26] —, “MATLAB radar system API,” Infineon, Tech. Rep., 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/38z2aS5>
- [27] CETECOM, “Testing services for various radar applications,” CETECOM, Tech. Rep., 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2UwrWK1>
- [28] MATLAB. (2020) Fourier transforms. [Online]. Available: <https://bit.ly/2YPQzcz>
- [29] S. Hilbert. (2013) FFT zero padding. [Online]. Available: <https://bit.ly/36HV2R5>
- [30] MATLAB. (2020) Constant false alarm rate (CFAR) detection. [Online]. Available: <https://bit.ly/3dCuWRf>
- [31] C. Will, P. Vaishnav, A. Chakraborty, and A. Santra, “Human target detection, tracking, and classification using 24-GHz FMCW radar,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 17, pp. 7283–7299, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2914365>
- [32] M. Sepúlveda, “Las competencias transversales, base del aprendizaje para toda la vida,” *Universidad EAN*, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/2GYyDGg>