

# Memorias del Encuentro Argentino y Latinoamericano de Ingeniería - 2021

## Tomo I. Compilación.

- | Agrimensura, geodesia y ciencias de la tierra y el mar
- | Desarrollo tecnológico social. Vinculación universidad, empresa y estado
- | Ejercicio profesional de la ingeniería
- | Innovación y emprendedorismo en ingeniería
- | Empresas y servicios de ingeniería
- | Ingeniería forense
- | Forestal, agronomía y alimentos
- | La ingeniería y el COVID-19
- | Obras y proyectos de ingeniería
- | Tecnología de la información y comunicación
- | Ferroviaria, automotriz, naval y transporte



**Editores:** Luis Fernández Luco | Cristina Vázquez | Alejandra Acuña Villalobos | Guillermo Lombera | Roberto Giordano Lerena

**Memorias del Encuentro Argentino y Latinoamericano de Ingeniería**

Memorias del Encuentro Argentino y Latinoamericano de Ingeniería: 2021 : tomo I / compilación de Luis Fernandez Luco ... [et al.]. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Luis Fernandez Luco, 2022.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga.

ISBN 978-987-88-7243-8

Obra Completa 978-987-88-7180-6

1. Ingeniería. I. Fernandez Luco, Luis, comp. II. Título.

CDD 620.00982



# Diseño y construcción de un monitor de radiaciones no ionizantes de radar pulsado banda I

Valdez, Federico<sup>a</sup>; Schlesinger, Paola L. <sup>a</sup>; Valdez, Alberto D. <sup>a</sup>; Chiozza, Juan A. <sup>a</sup>; Miranda Carlos V.<sup>a</sup>; Grela, Abel A. <sup>a</sup>; Del Valle Camino, Miguel E. <sup>b</sup>

a. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura

b. Base Aérea Militar Resistencia. Fuerza Aérea Argentina  
federicovaldez@exa.unne.edu.ar

## Resumen

Los sistemas de radares pulsados operan con señales de corta duración y de muy alta intensidad. Es por ello de suma importancia el monitoreo del personal técnico en tiempo real de eventos que superen el límite de exposición ocupacional de radiaciones no ionizantes. En el presente trabajo se describe el desarrollo y construcción de un monitor personal de radiaciones no ionizantes en la banda L para el radar primario de vigilancia de la Base Aérea Militar de Resistencia (Chaco). El objetivo es que sea utilizado por el personal técnico permitiendo alertar ante exposiciones de radiaciones de microondas que superen un umbral crítico. Este umbral está fijado por los límites de exposición ocupacional establecidos por el Ministerio de Salud y Acción Social en la Res. N°202/95, basados en las normas ICNIRP98/2020 publicadas por ENACOM. Se realizó el diseño y análisis con software de aplicación del Front – End de radiofrecuencia previo a la construcción del mismo. Una vez ensamblado el primer prototipo, se procedió a realizar mediciones básicas de funcionamiento del monitor. En base a los resultados obtenidos, se concluyó que el monitor personal posee una buena respuesta frente a señales pulsadas de bajos valores de ciclo de trabajo y aceptable compatibilidad, teniendo en cuenta que se trata de un equipo de bajo costo.

## Abstract

Pulsed radar systems operate with signals of short duration and of very high intensity. For this reason, the monitoring of the technical personnel in real time of events that exceed the occupational exposure limit of non-ionizing radiation is of utmost importance. This paper describes the development and construction of a personal monitor for non-ionizing radiation in the L band for the primary surveillance radar of the Resistencia Military Air Base (Chaco). The objective is for it to be used by technical personnel, allowing it to warn against exposures of microwave radiation that exceed a critical threshold. This threshold is set by the occupational exposure limits established by the Ministry of Health and Social Action in Resolution No. 202/95, based on the ICNIRP98 / 2020 standards published by ENACOM. The design and analysis was carried out with application software of the radio frequency Front - End prior to its construction. Once the first prototype was assembled, basic measurements of the monitor's performance were carried out. Based on the results obtained, it was concluded that the personal monitor has a good response to pulsed signals with low duty cycle values and acceptable compatibility, taking into account that it is a low-cost device.

**Palabras clave:** Monitor RNI, Radar, Microondas, Telecomunicaciones

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de radares pulsados operan con señales de corta duración y de muy alta intensidad. Es por ello la importancia de monitorear los eventos electromagnéticos que superen el límite de exposición ocupacional de radiaciones no ionizantes a los que están expuestos el personal técnico.[1].

En este artículo se describe el desarrollo y construcción de un monitor personal de radiaciones no ionizantes en la banda L para el radar primario de vigilancia de la Base Aérea Militar de Resistencia (Chaco) teniendo como referencia los límites de exposición ocupacional establecidos por el Ministerio de Salud y Acción Social en la Res. N°202/95, [2], basados en las normas ICNIRP98/2020, [3], publicadas por ENACOM.

El desarrollo del proyecto tuvo como motivación principal los elevados costos en el mercado y la posibilidad de realizar un equipo con selectividad para el rango de operación conjunto con la posibilidad de utilizar diferentes sensores de radiofrecuencia en la primera etapa.

Todo el equipo llevó la utilización de materiales y componentes sumamente comerciales y accesibles, impactando en un desafío por las altas frecuencias de operación de los radares.

## DESARROLLO

El desarrollo del monitor personal de radiaciones no ionizantes (RNI) se realizó en base a los límites de exposición ocupacional establecidos por el Ministerio de Salud y Acción Social en la Res. N°202/95. (ver Tabla 1).

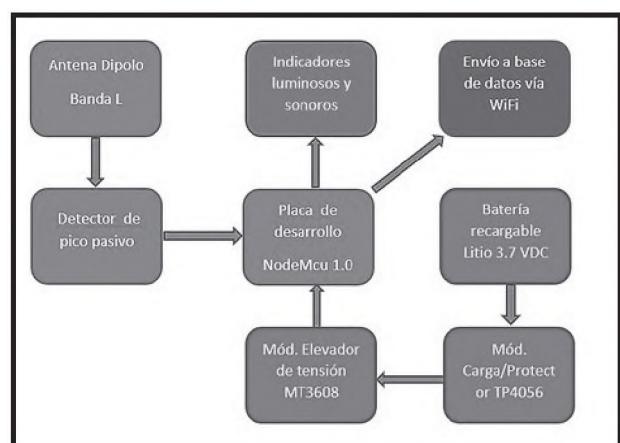
**Tabla 1: Límites de exposición ocupacionales. [Res. N°202/95]**

Región de frecuencias (MHz)	Intensidad del campo eléctrico no perturbado (V/m)	Intensidad del campo magnético no perturbado (A/m)	Densidad de potencia equivalente para onda plana (mW/cm <sup>2</sup> )
0,3 - 3	$376.382,25^{1/2}$	1.58	100
3 - 30	$[3.764(900/f^2)]^{1/2}$	$[0,025(900/f^2)]^{1/2}$	$900/f^{1/2}$
30 - 400	$3.764^{1/2}$	0,16	1
400 -	$3f^{1/2}$	0,025(f/40)	$f/400$

2.000		0)	
2.000 – 300.000	137	0,36	5

La frecuencia de operación del radar se encuentra en la banda L por lo que el límite ocupacional estará definido por la relación de la frecuencia y una constante correspondiente al rango de 400 – 2.000 MHz, (Ver Tabla 1).

EL monitor RNI de seguridad consta de un dipolo de media longitud de onda a la frecuencia central, un detector de pico, una placa como procesador NodeMCU, módulo elevador de tensión, batería recargable, módulo de carga/protector e indicadores lumínicos de porcentaje respecto al límite, sonoro y envío del evento a un servidor local. (Ver Figura 1).



**Figura 1. Diagrama en bloques del monitor RNI.**

El desarrollo del monitor de seguridad personal de RNI en la banda L de radar pulsado, se inició determinando en primera instancia los valores de potencias de recepción que se producen debido a los límites ocupacionales de densidad de potencia establecidos por el Ministerio de Salud y Acción Social en la Argentina. (Ver Tabla 1).

La expresión para obtener los valores límites de exposición para la banda L (1 – 2 GHz), está dada por:

$$P_r = \frac{f}{400} \quad (1)$$

Donde:

*f: Frecuencia de operación (MHz).*

*P<sub>r</sub>: Densidad de potencia (mW/cm<sup>2</sup>).*

Los límites de exposición ocupacional para la banda L no son constantes respecto a las variaciones de frecuencias. Como criterio de diseño, se tomó como valor de referencia el menor valor de densidad de potencia que representa el cien por ciento (100 %) del valor límite ocupacional.

La densidad de potencia *P<sub>r</sub>* que incide sobre la antena dipolo genera una potencia *W<sub>rec</sub>* debido al área efectiva de la antena que captura dicha densidad.

$$W_{rec} = P_r \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G \quad (2)$$

Donde:

*λ: Longitud de onda (m).*

*G: Ganancia en veces de la antena dipolo.*

*P<sub>r</sub>: Densidad de potencia incidente (w/m<sup>2</sup>).*

*W<sub>rec</sub>: Potencia generada en la antena (W).*

La ganancia de la antena dipolo que se utilizó es de *G* = 1.64 veces.

La potencia *W<sub>rec</sub>* desarrollada en la antena tendrá nuevamente una leve variación con la frecuencia.

El valor de menor potencia *W<sub>rec</sub>* desarrollada sobre la antena se tomó como el cien por ciento (100 %) del valor límite ocupacional. A partir del valor representativo límite, se realizó una escala en porcentaje para la indicación lumínica que comienza desde el 10% hasta el 110% del límite de exposición ocupacional.

Cada potencia desarrollada sobre la antena dipolo se transfiere al diodo detector de pico. El diodo detector de pico se diseñó para que en la entrada se tenga adaptación de impedancia normalizada a 50 Ω, lográndose obtener un cálculo aproximado de los valores de tensión que se originan en la resistencia de entrada de 50 Ω que se diseñó para tal fin y evitar desadaptaciones en las señales de radiofrecuencias de interés. Los valores de tensiones se acondicionaron para ser procesados en la placa de desarrollo NodeMCU 1.0.

La tensión de pico sobre la resistencia de 50 Ω que se produce debido a la potencia *W<sub>rec</sub>* generada sobre la misma, viene dada por la expresión. Ec. 3.

$$\hat{V} = \sqrt{2.50 \Omega \cdot W_{rec}} \quad (3)$$

Donde:

*̂V: Voltaje de pico (V).*

### Antena dipolo

El primer sensor del monitor personal de protección de RNI en la banda L es la antena del tipo dipolo substrato microstrip de frecuencia central *f* = 1300 MHz con ancho de banda *BW* = 160 MHz. Se eligió tal antena debido a su simplicidad, eficiencia, diagrama casi omnidireccional y selectividad en frecuencia que se requiere para monitorear la banda de frecuencia del radar pulsado.

El diseño del mismo se basa en un dipolo de media longitud de onda a la frecuencia central de elementos conductores radiantes, considerando los efectos de bordes de los mismos, con la salvedad de que el dipolo es construido en microstrip sobre la placa de circuito impreso.

$$\frac{1}{4}\lambda = \frac{c \cdot 0,95}{f} \quad (4)$$

Donde:

*c: Velocidad de la luz en el vacío (Mm/s).*

*f: Frecuencia de operación (MHz).*

El dipolo microstrip se diseñó y simuló en primera instancia en el software CST Suite Studio Student versión estudiantil y posteriormente se construyó en PCB de simple faz FR4 - (capa superior conductora) y se midió el coeficiente de reflexión de entrada (S11). (Ver Figura 2).

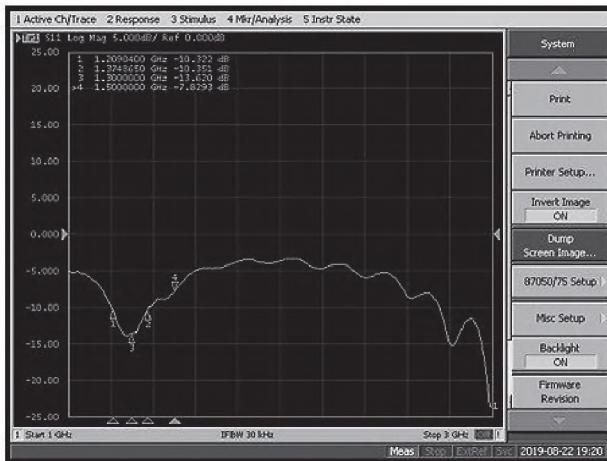


Figura 2. Coeficiente de reflexión de entrada S11 del dipolo.

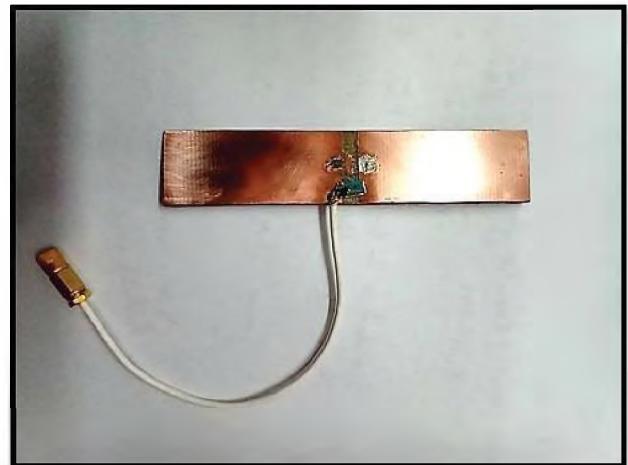


Figura 3. Dipolo detector.

### Detector de pico

El diodo detector de pico tipo serie se diseño considerando principalmente que la entrada del mismo debe tener una impedancia de  $50 \Omega$  para que haya una adaptación entre la antena dipolo y el detector.

El diodo que se utilizó, es el diodo rápido Schottky BAS70 del tipo SMD, ampliamente utilizado en circuitos microondas por su gran prestación a la frecuencia de operación en la banda L. [4].

La red capacitor – resistencia de carga satisfacen la siguiente relación que debe tener un detector de pico para reducir el error por descarga del capacitor.

$$R \cdot C \gg T$$

(5)

Donde:

*T*: Periodo de la señal (Seg).

*R*: Resistencia de carga ( $\Omega$ ).

*C*: Capacitor (Faradios).

### Filtrado a la salida del detector

A fines de filtrar las frecuencias indeseadas y obtener un valor estable de voltaje continuo, se procedió a implementar trampas coaxiales (Stub) con terminación en circuito abierto. [5].

La trampa coaxial se basa en la teoría de líneas de transmisión y nos permite filtrar la frecuencia indeseada sin modificar los valores de tensiones continua. La misma se introducirá a la salida del detector de pico.

Se realizó una simulación del detector con el software Microwave Office (MWO - Cadence), midiendo a la salida el contenido espectral producto de inyectar una frecuencia perteneciente a la banda L con un barrido de potencia de +13 dBm a +24 dBm.

En la Figura 4 se observa la disposición de la simulación y en la Figura 5 se puede apreciar el contenido espectral a la salida del detector.

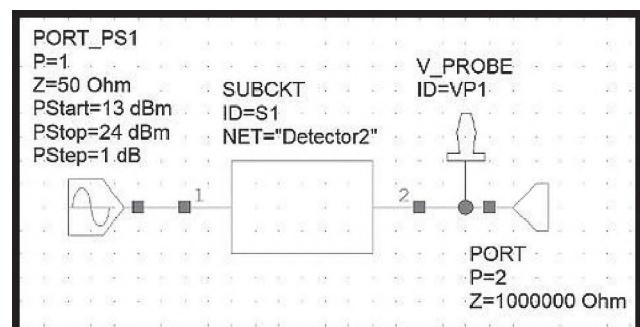


Figura 4. Simulación de ensayo del detector.

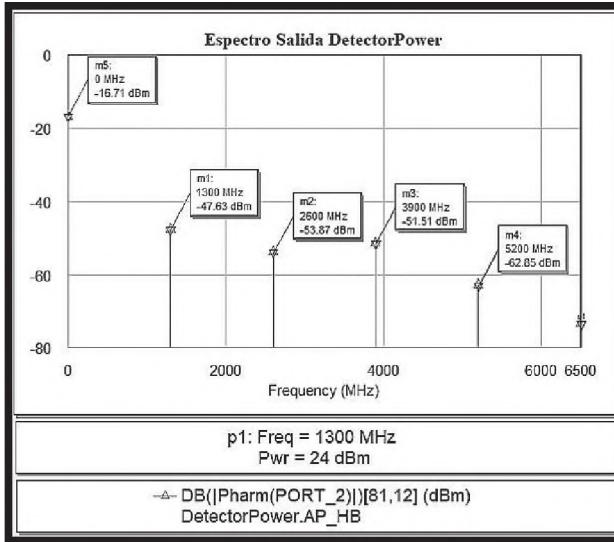


Figura 5. Contenido espectral a la salida del detector.

Posteriormente se implementó los filtros del tipo Stub en el simulador y se obtuvo una mejor planicidad en continua a la salida del detector.

### Diseño de placa de adquisición

La placa de adquisición está constituida por la placa de desarrollo NodeMCU 1.0, un cargador/Protector de batería de Litio, un elevador de tensión, circuito para los leds, buzzer, y circuito de adaptación de nivel de la señal de entrada analógica con sus protecciones y criterios de diseño asociados.

La placa de adquisición se diseñó en software libre online denominado EasyEDA. En el mismo se procedió a diseñar tanto el circuito, Layout y PCB con los criterios establecidos en el documento.

El diseño de la placa de adquisición se realizó con la determinación de un acondicionamiento en amplitud, compensación de frecuencia y protección de tensiones transitorias (TVS) o tensiones superiores a la permitida (3.3 V) por la entrada analógica de la NodeMCU 1.0 de la señal continua que proviene del Dipolo - Detector. Contemplando capacitores bypass para evitar que posibles perturbaciones de altas frecuencias afecten el funcionamiento de la placa. [6].

La indicación de porcentaje con sus potencias asociadas, quedó definida según la siguiente tabla. (Ver Tabla 2).

Tabla 2: Porcentajes y potencias con referencia valor límite de exposición ocupacional. [Elaboración propia].

Porcentaje (%) límite máx.	Potencia desarrollada (mW)	Potencia (dBm)	Tensión de pico (V)
10	21.751	13.375	1.475
25	54.377	17.354	2.332
50	108.755	20.364	3.298
75	163.132	22.125	4.039
100	217.510	23.375	4.664
110	239.261	23.789	4.891

### Interacción del dipolo con el cuerpo humano

El sensor antena dipolo interactúa con los objetos en su entorno. Los parámetros de la antena como el coeficiente de reflexión (S11), la reducción de la ganancia, la deformación del diagrama de radiación y la frecuencia de sintonización son modificados por la cercanía del tejido humano.

El monitor personal de seguridad debe ir colocado a la altura de la cintura con un cinturón o en el antebrazo. En estas ubicaciones la antena dipolo se encuentra a pocos centímetros del cuerpo humano, para evitar la interacción de acoplamiento mutuo entre ellos, se incorpora el material absorbente entre la antena y la parte interna del gabinete del monitor que se encuentra pegado al cuerpo humano.

Se realizó una prueba de simulación en el software CST Studio de la influencia de un objeto metálico sobre la antena dipolo.

Nota: Se realizó la prueba en el software CST Studio con un objeto metálico como perturbación y no con tejidos humanos por no poder acceder a las librerías de tejidos humanos en el programa.

En la figura 6 y 7 se aprecia como se degradó el coeficiente de reflexión (S11) de la antena con el elemento parásito en la parte posterior.

En la figura 8 y 9 se aprecia como no se produjo modificación del parámetro del coeficiente de reflexión (S11) de la antena dipolo con la hoja absorbente insertada.

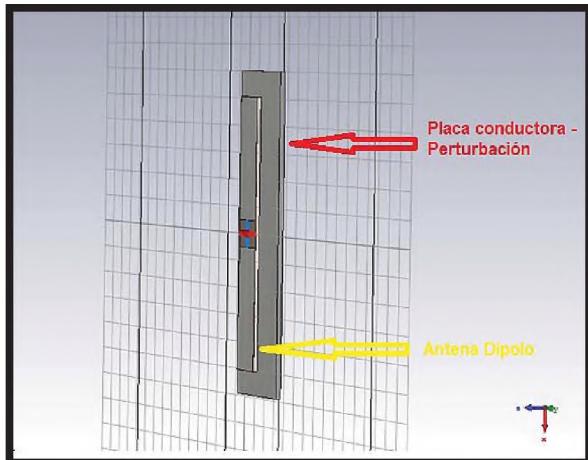


Figura 6. Representación en 3D de la antena y la placa conductora.

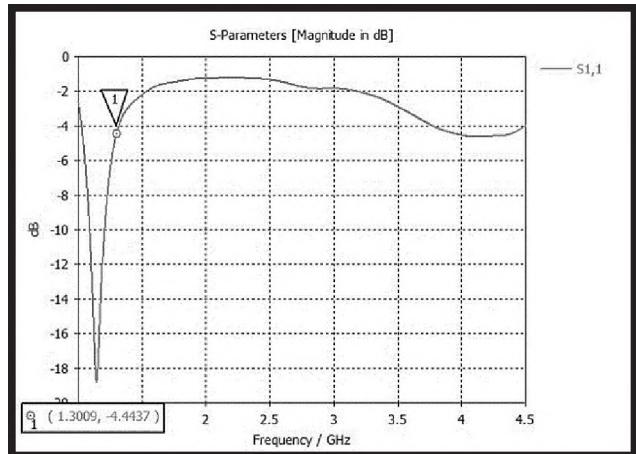


Figura 9. Parámetro coeficiente de reflexión S11 de la antena con hoja absorbente y elemento parásito.

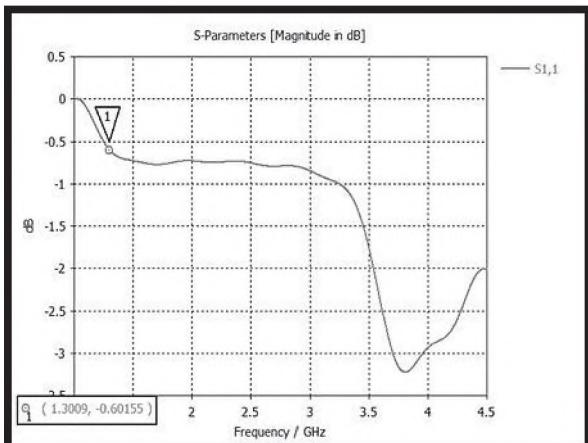


Figura 7. Parámetro coeficiente de reflexión S11 de la antena con elemento parásito.

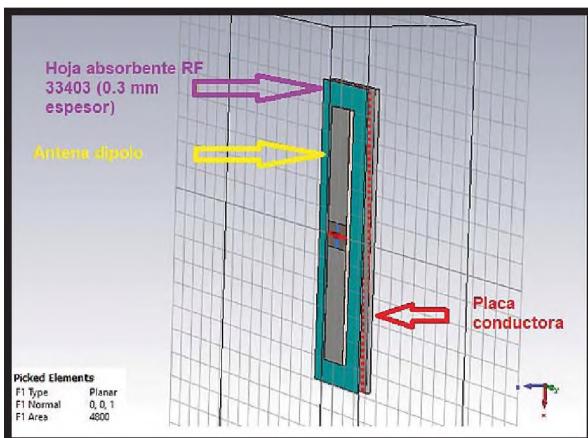


Figura 8. Representación en 3D de la antena, hoja absorbente RF y placa conductora.

### Ensamble del monitor y programación

Se procedió a ensamblar el primer prototipo monitor. Para ello, se diseñó el gabinete utilizando el software Solidworks Student Edition y se construyó utilizando material PLA en la impresora 3D. (Ver Figura 10).

Para el procesamiento de la señal del monitor se llevó a cabo una programación de la placa NodeMCU, capturando los valores de tensión desarrollados por el dipolo-detector y realizando una comparación con rangos de valores representativos a los niveles porcentuales del límite de exposición ocupacional de radiación. A partir de allí se instruyó a indicaciones lumínicas, sonora y el envío del evento a un servidor local de corresponder.



Figura 10. Monitor ensamblado.

## Simulaciones y ensayos

Se realizó la simulación de radiación del dipolo con su entorno mismo del monitor personal que se diseñó en SolidWorks Student en la frecuencia de operación del radar en la banda L. La simulación se efectuó en el programa CST Student Suite. El diagrama de radiación simulado es adecuado para la utilización sobre el cuerpo humano. Cabe señalar que el monitor no irradiará, pero si captará la señal de microonda. (Ver Figura 11).

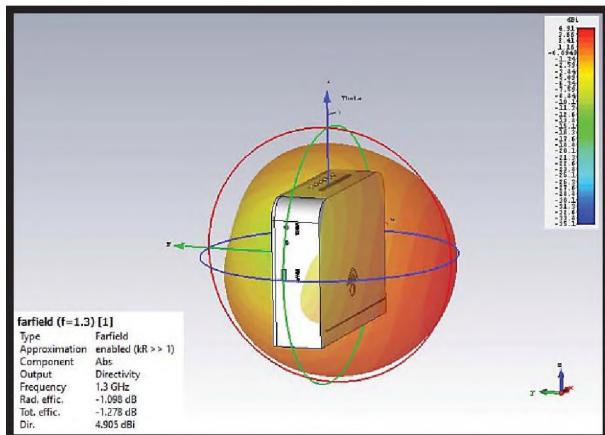


Figura 11. Monitor ensamblado simulado en CST Student.

El ensayo en el software del parámetro coeficiente de reflexión de entrada (S11) del monitor ensamblado, arrojó valores favorables en la banda L del radar. (Ver Figura 12).

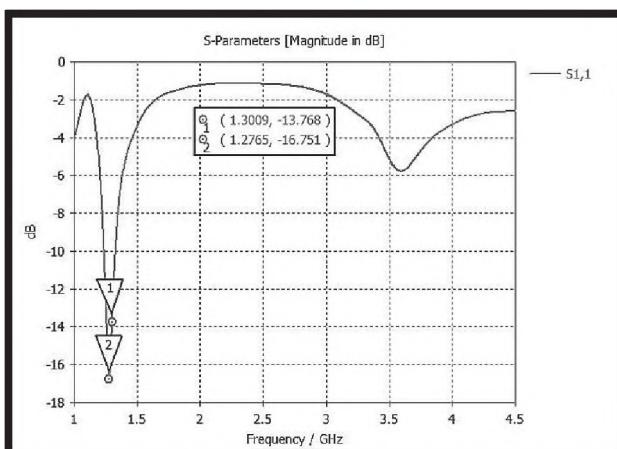


Figura 12. Coeficiente de reflexión de entrada del monitor ensamblado.

El primer ensayo de funcionamiento básico del sistema se realizó en otra banda de frecuencia por fuerzas mayores. Se utilizó un Router WiFi y se reprogramó a niveles inferiores la placa de programación.

El SetUp montado consistió en colocar el monitor personal sobre un trípode a unos pocos centímetros del Router WiFi y realizar en la computadora un testeo de datos para que el WiFi emita con la potencia adecuada. (Ver Figura 13).



Figura 13. Ensayo básico de funcionamiento del monitor personal con Router WiFi.

En el ensayo que se realizó se obtuvo buenos resultados, visualizando correctamente la indicación de porcentajes y se logró apreciar la audición sonora incluso en entornos ruidosos. Conjunto a ello se logró una buena conexión al servidor local y envío del evento.

### Pruebas EMC

El monitor personal RNI debe presentar una inmunidad a las radiaciones electromagnéticas no deseadas, por lo que se realizó una prueba básica de compatibilidad electromagnética utilizando el Router WiFi como fuente interferente. Se consideró que la misma es una fuente perturbante consistente debido a que se encuentra en cualquier ámbito y además la placa de desarrollo cuenta con sistema WiFi para envío de datos, por lo que el sistema debe poder funcionar correctamente en esta situación.

Para la prueba de inmunidad se reprogramó el monitor para que funcionara en condiciones normales de detección de valores de captación

en la banda L y se situó al monitor con trípode frente al Router WiFi a 2.4 GHz.

En primera instancia, el dispositivo no presentó ningún cambio de funcionamiento.

## CONCLUSIONES

Se diseñó el monitor de seguridad personal de radiaciones no ionizantes para operadores en el área técnica del sistema radar pulsado con especificaciones específicas para dicho sistema.

Finalmente, el equipo quedó compuesto por la antena sensora, el detector de pico, la placa de adquisición (proceso, control), indicadores luminosos para los porcentajes del límite de exposición de la radiación e indicación de activación de la conexión al WiFi local y buzzer para la indicación auditiva a partir del 50 % del límite de exposición.

Se observó un correcto funcionamiento del monitor ante la descarga de la batería por debajo de los 3.7 VDC y por arriba de los 3 VDC, manteniendo la tensión de salida para alimentar la placa de desarrollo en 6 VDC.

Se estimó una duración de energía del equipo de aproximadamente de 130 Hs.

Con señales pulsadas repetitivas a la entrada (ancho de pulsos < 20 uSeg), se observó una rápida respuesta de los indicadores leds y de sonido, correlacionándose con los valores de tensión fijados para cada porcentaje del límite de exposición. La alarma auditiva logra ser escuchada en ámbitos ruidosos.

Las características más sobresalientes del equipo son:

- Bajo costo.
- Selectividad de frecuencia en banda L.
- Posibilidad de Intercambiar la antena sensora de RF.
- Sistema de indicación eficaz.
- Autonomía de la batería.
- Flexibilidad en la programación.
- Tamaño adecuado para uso en el cinturón del técnico.

Como recomendación del proyecto se tiene varias líneas a modificar y luego ensayar. Entre aspectos importantes luego de ensayos de preconformidad en el laboratorio, se deberá

realizar un certificado de calibración en un laboratorio acreditado cumpliendo con las normas de calibración de sondas y compatibilidad electromagnética.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece rotundamente a todos los integrantes y compañeros del grupo de RNI de la FaCENA – UNNE, al Ing. Del Valle Camino, Miguel E. por abrirme las puertas en la Base Aérea Militar de Resistencia y desencadenar el proyecto del monitor frente a la necesidad de la misma. Al Radarista Cabo Principal Carlos Juárez también de la Base y al Ing. José Daniel Leiz por brindar ayuda con el software CST Student.

## REFERENCIAS

- [1] González, J. Bernardo de Quirós. (1982). *Radar y Ayudas a la Navegación Aérea*. Paraninfo, Madrid.
- [2] Enacom. (1995). Res. 202/95. *Radiaciones No Ionizantes*. Ente Nacional de Comunicaciones, Buenos Aires.  
<https://www.enacom.gob.ar/multimedia/normativas/1995/Resolucion%20202%2095%20MS.pdf>
- [3] ICNIRP. (1998/2020). *Recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos*. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Alemania.  
<http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdlesp.pdf>
- [4] Cornelis, J. kikkert. (2015). *RF Electronic Design and Simulation*. James Cook University. Townsville, Queensland, Australia.
- [5] Bava, José A.; Sanz, A. Juan. (1999). *Técnicas de Diseño de Amplificadores de Microondas*. Editorial Hispano Americana, Londres 188; Barcelona.
- [6] Tafanera, R. Antonio. (2000). *Teoría y Diseños con Microcontroladores PIC*. Primera edición, Mendoza.