

NOMBRE DEL TRABAJO

**Tesis\_Brayan-Gerson.pdf**

RECUENTO DE PALABRAS

**14858 Words**

RECUENTO DE PÁGINAS

**84 Pages**

FECHA DE ENTREGA

**Feb 28, 2024 9:29 AM GMT-5**

RECUENTO DE CARACTERES

**85004 Characters**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**4.4MB**

FECHA DEL INFORME

**Feb 28, 2024 9:30 AM GMT-5****● 18% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 18% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 0% Base de datos de trabajos entregados
- 9% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref



**FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN PARA LA  
PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN EN  
EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTELS**  
(Art. 45° de la ley N° 30220 – Ley)

Autorización de la propiedad intelectual del autor para la publicación de tesis en el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur (<https://repositorio.unfels.edu.pe>), de conformidad con el Decreto Legislativo N° 822, sobre la Ley de los Derechos de Autor, Ley N° 30035 del Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, Art. 10° del Rgto. Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales en las universidades – RENATI Res. N° 084-2022-SUNEDU/CD, publicado en El Peruano el 16 de agosto de 2022; y la RCO N° 061-2023-UNTELS del 01 marzo 2023.

**TIPO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

- 1). TESIS ( X )      2). TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL (   )

**DATOS PERSONALES**

Apellidos y Nombres: Wong Avila, Brayan David
D.N.I.: 76222933
Otro Documento:
Nacionalidad: Peruano
Teléfono: 968269840
e-mail: brnavila.17@gmail.com

**DATOS ACADÉMICOS**

**Pregrado**

Facultad: Facultad de Ingeniería y Gestión
Programa Académico: Tesis
Título Profesional otorgado: Ingeniero electrónico y telecomunicaciones

**Postgrado**

Universidad de Procedencia:
País:
Grado Académico otorgado:

**Datos de trabajo de investigación**

Título: " Diseño e implementación de un sistema de comunicaciones por retrodispersión empleando radio definida por software para aplicaciones de monitoreo inalámbrico"
Fecha de Sustentación: 04 de Diciembre del 2023
Calificación: Aprobado con distinción
Año de Publicación: 2024

### AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN VERSIÓN ELECTRÓNICA

A través de la presente, autorizo la publicación del texto completo de la tesis, en el Repositorio Institucional de la UNTELS especificando los siguientes términos:

Marcar con una X su elección.

- 1) Usted otorga una licencia especial para publicación de obras en el REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR.

Si autorizo  No autorizo

- 2) Usted autoriza para que la obra sea puesta a disposición del público conservando los derechos de autor y para ello se elige el siguiente tipo de acceso.

Derechos de autor		
TIPO DE ACCESO	ATRIBUCIONES DE ACCESO	ELECCIÓN
ACCESO ABIERTO 12.1(*)	<b>info:eu-repo/semantics/openAccess</b> (Para documentos en acceso abierto)	(x)

- 3) Si usted dispone de una **PATENTE** puede elegir el tipo de **ACCESO RESTRINGIDO** como derecho de autor y en el marco de confiabilidad dispuesto por los numerales 5.2 y 6.7 de la directiva N° 004-2016-CONCYTEC DEGC que regula el Repositorio Nacional Digital de CONCYTEC (Se colgará únicamente datos del autor y el resumen del trabajo de investigación).

Derechos de autor		
TIPO DE ACCESO	ATRIBUCIONES DE ACCESO	ELECCIÓN
ACCESO RESTRINGIDO	<b>info:eu-repo/semantics/restrictedAccess</b> (Para documentos restringidos)	( )
	<b>info:eu-repo/semantics/embargoedAccess</b> (Para documentos con períodos de embargo. Se debe especificar las fechas de embargo)	( )
	<b>info:eu-repo/semantics/closedAccess</b> (para documentos confidenciales)	( )

(\*) <http://renati.sunedu.gob.pe>



Rellene la siguiente información si su trabajo de investigación es de acceso restringido:

Atribuciones de acceso restringido:

---

---

Motivos de la elección del acceso restringido:

---

---

---

---

---

Wong Avila, Brayan David

---

APELLIDOS Y NOMBRES

76222933

---

DNI

---

Firma y huella:



Lima, 26 de Enero del 20 24



**FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN PARA LA  
PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN EN  
EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTELS**  
(Art. 45° de la ley N° 30220 – Ley)

Autorización de la propiedad intelectual del autor para la publicación de tesis en el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur (<https://repositorio.unfels.edu.pe>), de conformidad con el Decreto Legislativo N° 822, sobre la Ley de los Derechos de Autor, Ley N° 30035 del Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, Art. 10° del Rgto. Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales en las universidades – RENATI Res. N° 084-2022-SUNEDU/CD, publicado en El Peruano el 16 de agosto de 2022; y la RCO N° 061-2023-UNTELS del 01 marzo 2023.

**TIPO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

- 1). TESIS (  )      2). TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL (  )

**DATOS PERSONALES**

Apellidos y Nombres: Matta Maguiño Gerson Alejandro
D.N.I.: 74226467
Otro Documento:
Nacionalidad: peruana
Teléfono: 982814120
e-mail: 2014200763@unfels.edu.pe

**DATOS ACADÉMICOS**

**Pregrado**

Facultad: Facultad de ingeniería y gestion
Programa Académico: Tesis
Título Profesional otorgado: Ingeniero electronico y telecomunicaciones

**Postgrado**

Universidad de Procedencia:
País:
Grado Académico otorgado:

**Datos de trabajo de investigación**

Título: DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES POR RETRODISPERSION EMPLEANDO RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE PARA APLICACIONES DE MONITOREO INALAMBRICO
Fecha de Sustentación: 4 de diciembre del 2023
Calificación: aprobado con distincion
Año de Publicación: 2024

### AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN VERSIÓN ELECTRÓNICA

A través de la presente, autorizo la publicación del texto completo de la tesis, en el Repositorio Institucional de la UNTELS especificando los siguientes términos:

Marcar con una X su elección.

- 1) Usted otorga una licencia especial para publicación de obras en el REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR.

Si autorizo X No autorizo \_\_\_\_\_

- 2) Usted autoriza para que la obra sea puesta a disposición del público conservando los derechos de autor y para ello se elige el siguiente tipo de acceso.

Derechos de autor		
TIPO DE ACCESO	ATRIBUCIONES DE ACCESO	ELECCIÓN
ACCESO ABIERTO 12.1(*)	<b>info:eu-repo/semantics/openAccess</b> (Para documentos en acceso abierto)	(X)

- 3) Si usted dispone de una **PATENTE** puede elegir el tipo de **ACCESO RESTRINGIDO** como derecho de autor y en el marco de confiabilidad dispuesto por los numerales 5.2 y 6.7 de la directiva N° 004-2016-CONCYTEC DEGC que regula el Repositorio Nacional Digital de CONCYTEC (Se colgará únicamente datos del autor y el resumen del trabajo de investigación).

Derechos de autor		
TIPO DE ACCESO	ATRIBUCIONES DE ACCESO	ELECCIÓN
ACCESO RESTRINGIDO	<b>info:eu-repo/semantics/restrictedAccess</b> (Para documentos restringidos)	( )
	<b>info:eu-repo/semantics/embargoedAccess</b> (Para documentos con períodos de embargo. Se debe especificar las fechas de embargo)	( )
	<b>info:eu-repo/semantics/closedAccess</b> (para documentos confidenciales)	( )

(\*) <http://renati.sunedu.gob.pe>



Rellene la siguiente información si su trabajo de investigación es de acceso restringido:

Atribuciones de acceso restringido:

---

---

Motivos de la elección del acceso restringido:

---

---

---

---

---

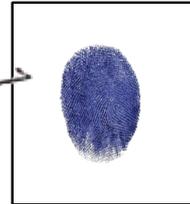
Matta Maguiño Gerson Alejandro

APELLIDOS Y NOMBRES

74226467

DNI

Firma y huella:



Lima, 26 de enero del 20 24

**UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y**  
**TELECOMUNICACIONES**



**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE**  
**COMUNICACIONES POR RETRODISPERSIÓN EMPLEANDO RADIO**  
**DEFINIDA POR SOFTWARE PARA APLICACIONES DE MONITOREO**  
**INALÁMBRICO”**

**TESIS**

Para optar el Título Profesional de

**INGENIERO ELECTRÓNICO Y TELECOMUNICACIONES**

**PRESENTADO POR LOS BACHILLERES**

WONG AVILA, BRAYAN DAVID

ORCID: 0009-0008-9403-6464

MATTA MAGUIÑO, GERSON ALEJANDRO

ORCID: 0009-0004-0404-725X

**ASESOR**

CARTAGENA GORDILLO, ALEX

ORCID: 0000-0001-8076-0699

**Villa El Salvador**

**2023**



**DECANATO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN**

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO ELECTRÓNICO Y TELECOMUNICACIONES**

En Villa El Salvador, siendo las 11:30 horas del día 4 de diciembre de 2023, en la Facultad de Ingeniería y Gestión, los miembros del Jurado Evaluador, integrado por:

PRESIDENTE: DR. ORLANDO ADRIAN ORTEGA GALICIO DNI N° 20032665 C.I.P. N° 79878  
SECRETARIO: MG. MAX FREDI QUISPE AGUILAR DNI N° 41618736 C.I.P. N° 138642  
VOCAL : MG. JORGE LUIS LÓPEZ CORDOVA DNI N° 09638009 C.I.P. N° 183016  
ASESOR : DR. ALEX CARTAGENA GORDILLO DNI N° 29420194 C.I.P. N° 133344

Designados mediante Resolución de Decanato N° 342-2023-UNTELS-R-D de fecha 15 de agosto de 2023 quienes dan inicio a la Sesión Pública de Sustentación y Evaluación de Tesis.

Acto seguido, los aspirantes al : Grado de Bachiller  Título Profesional

Don BRAYAN DAVID WONG AVILA identificado con D.N.I N° 76222933 y Don GERSON ALEJANDRO MATTA MAGUIÑO identificado con D.N.I. N° 74226467 procedieron a la Sustentación de:

Trabajo de investigación  Tesis  Trabajo de suficiencia  Artículo científico

Titulada: "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES POR RETRODISPERSIÓN EMPLEANDO RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE PARA APLICACIONES DE MONITOREO INALÁMBRICO".

Aprobado mediante Resolución de Decanato N° 957-2023-UNTELS-R-D de fecha 27 de noviembre de 2023, de conformidad con las disposiciones del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales vigentes, sustentaron y absolvieron las interrogantes que le formularon los señores miembros del Jurado Evaluador.

Concluida la Sustentación se procedió a la evaluación y calificación correspondiente, resultando los aspirantes APROBADOS por Distinción con la nota de: DIECISIETE (letras) 17 (números), de acuerdo al Art. 65° del Reglamento General para optar el Título Profesional.

CALIFICACIÓN		CONDICIÓN	EQUIVALENCIA
NÚMERO	LETRAS		
17	DIECISIETE	Aprobado con Distinción	May Bueno

Siendo las 12:50 horas del día 4 de diciembre de 2023 se dio por concluido el acto de sustentación, firmando el jurado evaluador el Acta de Sustentación, que obra en el Decanato de la Facultad de Ingeniería y Gestión.

MG.. MAX FREDI QUISPE AGUILAR  
SECRETARIO

BRAYAN DAVID WONG AVILA  
BACHILLER

DR. ORLANDO ADRIAN ORTEGA GALICIO  
PRESIDENTE

BACHILLER

MG. JORGE LUIS LÓPEZ CORDOVA  
VOCAL

GERSON ALEJANDRO MATTA MAGUIÑO  
BACHILLER

## **DEDICATORIA**

Dedicamos esta tesis a nuestras familias que estuvieron con nosotros en todo el tiempo que nos tomó desarrollar este trabajo de investigación, apoyándonos en todo momento y contagiándonos de buena energía para seguir adelante.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a nuestra universidad, por la formación brindada y sus instalaciones que contribuyeron con el desarrollo de esta tesis. Así mismo a nuestros padres por el soporte incondicional que han demostrado ser en toda esta etapa.

Además, agradecemos a nuestro asesor por los conocimientos compartidos y al mismo tiempo ser el guía en este camino.

## RESUMEN

Esta tesis describe el diseño e implementación de un sistema de comunicaciones por retrodispersión de arquitectura biestática el cual fue implementado empleando componentes comerciales y dispositivos de bajo costo. Este sistema se compone de un módulo PlutoSDR conectado a un amplificador externo de 2.5W, el cual genera y transmite la señal de onda portadora a 915MHz, un nodo por retrodispersión que genera y transmite un paquete de información y un módulo RTL-SDR para la recepción de la señal transmitida por el nodo. Los módulos se conectan a una computadora personal, donde se utiliza el software GNU Radio Companion (GRC) para el procesamiento de la señal en banda base. Por su parte el nodo por retrodispersión ha sido diseñado, construido y testeado bajo operaciones comandadas por un microcontrolador. El nodo por retrodispersión tiene como función detectar la presencia de señales de onda portadora de 915MHz empleando un detector de RF (radiofrecuencia), luego de ello modular la onda portadora con una información digital y transmitirla utilizando la técnica de retrodispersión.

Para lograr la comunicación por retrodispersión, el microcontrolador maneja el voltaje de entrada en la terminal base de un transistor bipolar NPN que está conectado en configuración de emisor común. Este manejo del voltaje genera una señal modulada de banda base 2-ASK (modulación por desplazamiento de amplitud). La misión del transistor bipolar es actuar como un interruptor entre la impedancia de la antena y la conexión a tierra del circuito. Este interruptor combinado con una señal de onda portadora incidente genera una señal modulada en paso banda de modulación analógica AM (modulada en amplitud).

Nuestros resultados muestran la viabilidad de construir un sistema de comunicaciones por retrodispersión de corto alcance. Aunque el corto alcance puede verse como una limitación, es ventajoso en aplicaciones conscientes de monitoreo inalámbrico.

Palabras clave: comunicaciones por retrodispersión, ASK, AM, PlutoSDR, RTL-SDR.

## **ABSTRACT**

This thesis describes the design, implementation and testing of a bistatic backscatter communications system using commercial components and low-cost devices. This system consists of a PlutoSDR module connected to a 2.5W amplifier which generates and transmits the carrier wave signal at 915MHz, a backscatter node that generates an information packet and an RTL-SDR module for the reception of the transmitted signal. The modules are connected to a personal computer, where GNU Radio Companion (GRC) software is used for baseband signal processing. On the other hand, the backscatter node has been designed, built and tested under operations commanded by a microcontroller. The function of the backscatter node is to detect the presence of 915 MHz carrier wave signals with an RF detector, then modulate the carrier wave with digital information and transmit it using the backscatter technique.

To achieve backscatter communications, the microcontroller handles the input voltage at the base terminal of an NPN bipolar transistor that is connected in a common emitter configuration. This voltage management generates a modulated 2-ASK (Amplitude Shift Modulation) baseband signal. The mission of the bipolar transistor is to act as a switch between the impedance of the antenna and the grounding of the circuit. This switch combined with an incident carrier wave signal generates an AM (amplitude modulated) analog modulation bandpass signal.

Our results show the feasibility of building a short-range backscatter communications system. Although the short range can be seen as a limitation, it is advantageous in conscious wireless monitoring applications.

**Keywords:** backscatter communications, ASK, AM, PlutoSDR, RTL-SDR.

## ÍNDICE

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>ii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>iii</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>12</b>
<b>I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>13</b>
1.1. Motivación .....	13
1.2. Estado del arte.....	13
1.3. Descripción del problema .....	15
1.4. Formulación del problema .....	16
1.4.1. Problema general .....	16
1.4.2. Problemas específicos.....	16
1.5. Objetivos.....	16
1.5.1. Objetivo general.....	16
1.5.2. Objetivos específicos .....	16
1.6. Justificación .....	17
1.6.1. Justificación teórica .....	17
1.6.2. Justificación social.....	17
1.6.3. Justificación ambiental .....	17
1.6.4. Justificación tecnológica.....	17
<b>II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
2.1. Antecedentes .....	18
2.2. Bases teóricas.....	19
2.2.1. Señales de radiofrecuencia .....	19
2.2.2. Sistemas de comunicaciones por retrodispersión .....	21
2.2.3. Radio definida por software (SDR).....	25

2.2.4.	Detector de radiofrecuencia.....	26
2.2.5.	Modulación y demodulación .....	29
<b>III.</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>32</b>
3.1	Descripción de la metodología .....	32
3.1.1	Etapas del desarrollo de la tesis.....	32
3.1.1.1	Diseño del sistema .....	32
3.1.1.2	Implementación del sistema.....	33
3.1.1.3	Pruebas de funcionamiento del sistema .....	33
3.2	Implementación de la metodología.....	33
3.2.1	Transmisor de onda portadora .....	34
3.2.2	Sistema por retrodispersión .....	39
3.2.2.1.	Detector de RF .....	40
3.2.2.1.1.	Circuito cosechador de energía .....	40
3.2.2.1.2.	Circuito comparador.....	41
3.2.2.2.	Nodo por retrodispersión.....	42
3.2.3	Diseño de la PCB.....	43
3.2.4	Sistema de recepción .....	45
3.2.5	Pruebas realizadas.....	47
3.3	Resultados.....	53
<b>IV.</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>68</b>
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>70</b>
<b>VI.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>.....</b>	<b>74</b>
Anexo 1.	Matriz de consistencia.....	74
Anexo 2.	Glosario de términos .....	76
Anexo 3.	Programación del microcontrolador para señal conocida .....	78
Anexo 4.	Programación del microcontrolador para señal aleatoria.....	80

Anexo 5. Hoja de datos del TTL-USB .....	82
Anexo 6. Composición interna de PlutoSDR .....	83
Anexo 7. Composición interna de RTL-SDR.....	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Esquema de un Nodo por Retrodispersión.....	14
<b>Figura 2</b>	Modo de Propagación de las Señales.....	22
<b>Figura 3</b>	Representación del Coeficiente de Reflexión en el Ábaco de Smith.....	23
<b>Figura 4</b>	Tipos de Configuración de Sistemas por Retrodispersión.....	25
<b>Figura 5</b>	Diagrama de Bloques del Detector de Radiofrecuencia.....	26
<b>Figura 6</b>	Circuito Multiplicador de Voltaje de 2 Etapas.....	26
<b>Figura 7</b>	Adaptador de Impedancia de Tipo L.....	27
<b>Figura 8</b>	Circuito Comparador.....	28
<b>Figura 9</b>	<i>Diagrama de Bloques del Nodo por Retrodispersión.....</i>	<i>29</i>
<b>Figura 10</b>	Modulación AM.....	31
<b>Figura 11</b>	Modulación ASK.....	31
<b>Figura 12</b>	Esquema del Sistema de Comunicaciones por Retrodispersión.....	32
<b>Figura 13</b>	Módulo PlutoSDR.....	34
<b>Figura 14</b>	Interfaz Gráfica de GNU Radio para Transmisión de Onda Portadora.....	36
<b>Figura 15</b>	Amplificador de Potencia.....	37
<b>Figura 16</b>	Antena TI.92.2113 i 915MHz.....	37
<b>Figura 17</b>	Analizador de Espectro Centrado en 915MHz.....	39
<b>Figura 18</b>	Diagrama de Bloques del Sistema por Retrodispersión.....	39
<b>Figura 19</b>	Circuito del Cosechador de Energía.....	40
<b>Figura 20</b>	Circuito Comparador.....	42
<b>Figura 21</b>	Circuito del Nodo por Retrodispersión.....	43
<b>Figura 22</b>	Diseño de la PCB en KICAD.....	44
<b>Figura 23</b>	Placa PCB Soldada.....	45
<b>Figura 24</b>	Dispositivo RTL-SDR.....	45
<b>Figura 25</b>	Configuración Bloque RTL-SDR Source.....	46
<b>Figura 26</b>	Antena de Módulo RTL-SDR.....	46
<b>Figura 27</b>	Generador de Señales Agilent N5182A.....	47
<b>Figura 28</b>	Parametrización de Onda Portadora.....	47
<b>Figura 29</b>	Antena Periódica SAS-510-7.....	48
<b>Figura 30</b>	Cable CBL-1.5M-NMNM+.....	48
<b>Figura 31</b>	Conexión Entre Generador N5182A y Antena SAS-510-7.....	49
<b>Figura 32</b>	Señal de Información del Nodo.....	49

<b>Figura 33</b>	Circuito Electrónico de Nodo por Retrodispersión.....	50
<b>Figura 34</b>	Dispositivo RTL-SDR y Nodo por Retrodispersión .....	51
<b>Figura 35</b>	Sistema de Comunicaciones por Retrodispersión en Jaula de Faraday .....	52
<b>Figura 36</b>	Sistema de Comunicaciones por Retrodispersión en Entorno Libre .....	53
<b>Figura 37</b>	Distancias Entre los Componentes del Sistema .....	54
<b>Figura 38</b>	Señal Recibida por RTL-SDR en GNU Radio Companion.....	54
<b>Figura 39</b>	Esquema de Demodulación en GNU Radio Companion.....	55
<b>Figura 40</b>	Señal Recibida por RTL-SDR en MATLAB.....	55
<b>Figura 41</b>	Parte Positiva de Señal Recibida.....	56
<b>Figura 42</b>	Señal Envolvente.....	56
<b>Figura 43</b>	Señal Demodulada .....	57
<b>Figura 44</b>	Señal Demodulada Invertida.....	58
<b>Figura 45</b>	Sistema de Comunicaciones por Retrodispersión.....	59
<b>Figura 46</b>	Conexión Nodo-Módulo CP2102 .....	60
<b>Figura 47</b>	Señal Recibida.....	61
<b>Figura 48</b>	Almacenar Información Recibida en GNU Radio Companion .....	62
<b>Figura 49</b>	Demodulador Implementado en GNU Radio Companion.....	62
<b>Figura 50</b>	Magnitud de Señal Recibida .....	63
<b>Figura 51</b>	Señal con Componente DC en Cero .....	63
<b>Figura 52</b>	Señal Recibida del Nodo y Generada en PIC .....	64
<b>Figura 53</b>	Máxima Distancia de Funcionamiento .....	65
<b>Figura 54</b>	Señal Recibida en el Nodo y Generada en el PIC.....	65
<b>Figura 55</b>	Señal Recibida a Distancia de 160cm .....	66
<b>Figura 56</b>	Pruebas Realizadas con el Detector RF .....	67
<b>Figura 57</b>	Relación de Voltaje y Distancia.....	68
<b>Figura 58</b>	Gráfica BER vs SNR.....	69

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Clasificación de Bandas en el Espectro Electromagnético.....	20
<b>Tabla 2</b> Clasificación de Bandas ISM .....	21
<b>Tabla 3</b> Características del PlutoSDR .....	35
<b>Tabla 4</b> Descripción de la Antena.....	38
<b>Tabla 5</b> Valor de Componentes Utilizados.....	41
<b>Tabla 6</b> Parámetros Principales de RTL-SDR en GNU Radio Companion .....	51

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad utilizamos la comunicación inalámbrica en distintos campos del entorno profesional, la recreación y el ámbito académico. Debido a ello la comunicación inalámbrica ha evolucionado en los últimos años de tal manera que sus aplicaciones y uso han ido en aumento. Para lograr esta evolución y variedad de sus aplicaciones se han utilizado diferentes dispositivos y técnicas, en los cuales todos los equipos generan una onda portadora a determinada frecuencia, luego de ello la modulan con la información deseada y posteriormente es transmitida por un medio.

Un sistema de comunicaciones por retrodispersión es un sistema de comunicación inalámbrica que se diferencia de otros porque utiliza una fuente electromagnética externa como onda portadora. De esta manera, en el nodo, el cual puede contener algún sensor para aplicaciones de monitoreo de parámetros específicos, utiliza su información para modular dicha onda portadora y reflejarla hacia un receptor el cual al ser un dispositivo de radio definido por software capta la información y es capaz de demodularla, todo esto controlado por una interfaz gráfica desarrollada en el software GNU Radio. Con esto, un sistema de comunicaciones por retrodispersión reduce el requerimiento energético en el nodo.

Con el desarrollo de esta investigación se busca implementar el sistema descrito y de esta manera hacer posible una comunicación inalámbrica en un sistema de comunicaciones el cual utiliza un transmisor de radiofrecuencia, un nodo de retrodispersión y un sistema de recepción para demodular la información recibida.

Es por ello que la presente tesis describe el diseño e implementación de un sistema de comunicaciones por retrodispersión empleando radio definida por software para aplicaciones de monitoreo. Se describe en la primera sección la formulación del problema y se identifican los objetivos, en la segunda sección se exponen los antecedentes relevantes y bases teóricas, en la tercera sección se detalla la metodología, implementación y resultados de la investigación empleada, en la cuarta sección se aborda la discusión de resultados y finalmente en la quinta sección se mencionan las conclusiones.

## **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

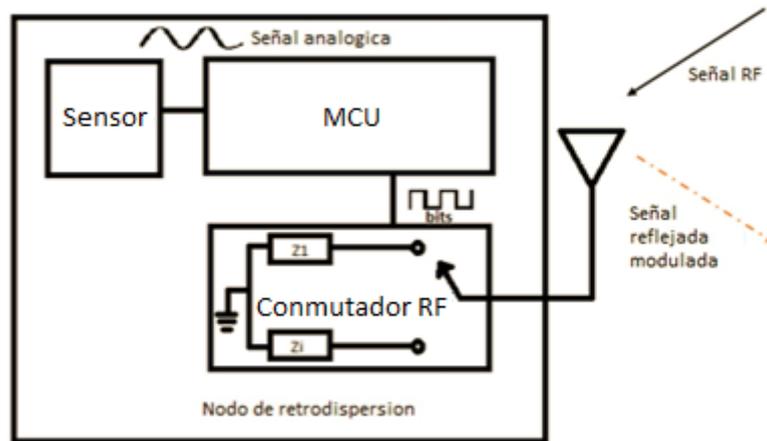
### **1.1. Motivación**

En la actualidad los avances tecnológicos enfocados a dispositivos electrónicos que son aplicados a sistemas de comunicaciones inalámbricas se están desarrollando rápidamente. Debido a esto, es vital encontrar formas de mejorar estos dispositivos para poder optimizar su funcionamiento. Con la aparición del internet de las cosas (IoT) esta tecnología se viene utilizando para varias aplicaciones de monitoreo inalámbrico, debido a esto se requieren sistemas de comunicaciones que trabajen a baja potencia, tengan una tasa de transmisión de bits adecuada y buena autonomía. Por ello este trabajo de investigación se centra en diseñar e implementar un sistema de comunicaciones por retrodispersión el cual cumple con los requisitos mencionados anteriormente ya que aprovecha las fuentes electromagnéticas externas para transmitir una información y así el requerimiento energético sea mínimo.

### **1.2. Estado del arte**

El sistema de comunicaciones por retrodispersión modula y refleja la señal de radiofrecuencia recibida por el nodo sin la necesidad de generarla por sí mismo para transmitir datos, como lo indican en (Van Huynh et al., 2018) y (Kim et al., 2019). Una representación del funcionamiento en el nodo por retrodispersión se puede observar en la Figura 1. Donde una señal incide en la antena, es reflejada dependiendo del coeficiente de reflexión y el cual depende de la impedancia del nodo. Frente a un escenario donde un receptor se comunica con múltiples sensores o nodos por retrodispersión se plantea en (Thomas & Reynolds, 2012) el uso del acceso múltiple no ortogonal (NOMA) para mejorar la eficiencia del sistema de comunicación por retrodispersión. Se propone establecer distintos coeficientes de reflexión para cada región donde previamente los sensores son situados y así poder distinguir la potencia de la señal reflejada desde los nodos. También se muestra la guía de diseño de los coeficientes de reflexión para un caso de dos regiones lo que resulta en un mejor desempeño del sistema. Los resultados muestran que frente a una correcta elección de los coeficientes de reflexión hay mejor rendimiento.

**Figura 1**  
*Esquema de un Nodo por Retrodispersión*



Fuente: Elaboración propia

En (Qian et al., 2019) estudian un sistema de comunicación por retrodispersión alimentado inalámbricamente, donde los sensores usan un esquema de acceso de canal de tipo híbrido, combinando TDMA (Time Division Multiplexing Access) con PD-NOMA (Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access) para mejorar su desempeño en términos de rendimiento. Su análisis y resultados muestran que la implementación de PD-NOMA incrementa la eficiencia espectral y rendimiento del sistema, mostrando así una mejora frente al esquema convencional de TDMA, además incrementa la capacidad de la red para acomodar un largo número de sensores o nodos.

En (Daskalakis et al., 2018) implementan un sistema por retrodispersión binario utilizando modulación FSK (Frequency Shift Keying). Este dispositivo trabaja a una frecuencia de 867MHz con la finalidad de dar un aporte tecnológico al rubro de la agricultura. Con el sistema de comunicaciones por retrodispersión y un sensor se monitorea el clima, lo cual abarca otros parámetros importantes como la humedad del suelo, el ambiente, la temperatura etc. El diseño emplea un MCU 8051F320 que consume aproximadamente 0.5mA/MHz en funcionamiento normal y menos de 0.1uA en modo de suspensión. El hardware del nodo de comunicaciones también consiste en un transistor RF NXP BFS17NTA debido a que en comparación con otros transistores tiene un buen desempeño a grandes distancias.

Si bien la mayoría de los proyectos emplean un transistor como método para el acoplamiento de impedancias como realiza (Qian et al., 2019), donde utilizan un ATF52189 E-pHEMT junto a un MCU PIC16LF1459 para obtener cuatro valores diferentes del

coeficiente de reflexión para una modulación 4-PAM a una banda de frecuencia FM aplicando cuatro voltajes para cada estado del transistor, existen otros trabajos de investigadores dedicados al sistema de comunicaciones por retrodispersión que reemplazan el transistor por un circuito integrado denominado switch RF.

El circuito integrado switch RF cumple la misma función que el transistor, pero nos da la facilidad de poder cambiar la impedancia que llega a la antena sin la necesidad de cambiar los niveles de voltaje para cada estado como se hacía en un transistor. En (Kim et al., 2006) implementan un sistema por retrodispersión QAM utilizando un MSP430F2011 programado para transmitir una secuencia de datos pseudoaleatorios para modular los 4 símbolos a 200 Ksímbolos/s a 400 Kbits/s con un bajo consumo de potencia. También se utiliza un circuito integrado switch RF SP4T conectado a cuatro impedancias diferentes que varían dependiendo de los símbolos entrantes.

Los sistemas de comunicaciones por retrodispersión tienen gran variedad de aplicaciones como su uso para monitorear la diferencia de temperatura entre la hoja y la atmósfera tal y como indica (Peña, 2017). Para el diseño del nodo se utilizó un MCU MSP-EXP430FR5969 y un ADG902 como switch RF.

### **1.3. Descripción del problema**

Las comunicaciones inalámbricas se han desarrollado considerablemente en los últimos años otorgando practicidad en los sistemas que la emplean. Para ello, los sistemas de comunicaciones necesitan realizar un consumo energético importante debido a que deben generar una señal portadora propia para transmitir información. Ante esto, emplear alguna técnica que permita reutilizar las ondas electromagnéticas de fuentes externas puede significar un paso importante para la reducción del consumo energético en los sistemas de comunicación inalámbrica. Una de las aplicaciones en donde se utilizan sistemas de comunicaciones es el monitoreo inalámbrico, para lo cual los sistemas electrónicos actuales generan su propio campo electromagnético de transmisión o en algunos casos emplean una conexión a internet como es en el caso de los dispositivos IoT.

Por eso, como solución a la problemática identificada, se plantea un sistema de comunicaciones por retrodispersión el cual utiliza dispositivos de bajo consumo de potencia para una autonomía energética prolongada y que mantenga su funcionalidad. Un sistema de comunicaciones por retrodispersión utiliza las ondas electromagnéticas externas como onda portadora, la modula con la información contenida en el nodo y así la retransmite hacia un receptor, este último debe ser un dispositivo que opere en la misma frecuencia del sistema y

digitalice la información analógica recibida para su posterior demodulación. La radio definida por software o SDR, es un dispositivo de radio que cumple esta función por sus características internas. Además, los dispositivos SDR pueden cambiar sus características por medio de software, tales como: frecuencia de operación, ganancia, tasa de muestreo, entre otros. Con el mismo software es posible realizar un post-procesamiento de la señal digitalizada por el SDR y demodular la señal recibida.

#### **1.4. Formulación del problema**

##### **1.4.1. Problema general**

- ¿Cómo diseñar e implementar un sistema de comunicaciones por retrodispersión empleando radio definida por software (SDR) para aplicaciones de monitoreo inalámbrico?

##### **1.4.2. Problemas específicos**

- ¿Cómo generar una radiación electromagnética a 915MHz para comunicaciones por retrodispersión?
- ¿Cómo diseñar e implementar un nodo de comunicaciones por retrodispersión empleando componentes comerciales?
- ¿Cómo implementar un receptor para comunicaciones por retrodispersión empleando plataformas SDR?
- ¿Cómo verificar el correcto funcionamiento del sistema de comunicaciones por retrodispersión?

#### **1.5. Objetivos**

##### **1.5.1. Objetivo general**

- Diseñar e implementar un sistema de comunicaciones por retrodispersión empleando radio definida por software (SDR) para aplicaciones de monitoreo inalámbrico.

##### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Generar una radiación electromagnética a 915MHz para comunicaciones por retrodispersión.
- Diseñar e implementar un nodo de comunicaciones por retrodispersión empleando componentes comerciales.
- Implementar un receptor para comunicaciones por retrodispersión empleando plataformas SDR.

- Verificar el correcto funcionamiento del sistema de comunicaciones por retrodispersión.

## **1.6. Justificación**

### **1.6.1. Justificación teórica**

Permite adaptar nuevos conocimientos empleados a sistemas de monitoreo inalámbrico para ser implementados en Perú con fines del desarrollo tecnológico.

### **1.6.2. Justificación social**

Beneficia a la comunidad peruana brindándole un sistema de comunicación inalámbrica que es eficiente y elaborado con componentes comerciales. De esta manera pueda ser implementado en distintas partes del Perú.

### **1.6.3. Justificación ambiental**

Debido al uso de componentes de baja potencia y con ello un bajo consumo energético, este sistema reduce considerablemente el impacto ambiental.

### **1.6.4. Justificación tecnológica**

Introduce una nueva tecnología al Perú para poder ser utilizada en distintos campos del monitoreo aplicando sistemas novedosos como el sistema por retrodispersión y dispositivos como la radio definida por software.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

En el artículo “Ultralow Power and Compact Backscatter Wireless Device and Its SDR-Based Reading System for Environment Monitoring in UHF Band”, publicado en IEEE Sensor Letters, (Vena et al., 2021) diseña e implementa un sistema de comunicaciones por retrodispersión de arquitectura monoestática, empleando un USRP modelo N1-2901 como transmisor de onda portadora a 868MHz y también como receptor equipado con dos antenas patch polarizadas circularmente de 8.8dBi de ganancia en la frecuencia de trabajo y configurado en su máxima potencia de transmisión que es 20dBm. El nodo de este sistema posee un sensor de temperatura y humedad relativa que permite conocer el estado de humedad en una planta. Un objetivo de este proyecto es lograr fabricar un nodo de bajo consumo de potencia, por ello para la operabilidad de este dispositivo se consume una potencia de  $7\mu\text{W}$  con una alimentación de 1.8V utilizando una antena monopolo de 2dBi. El sistema utiliza la modulación 2-FSK para modular la onda portadora y ser retrodispersada al receptor, para su posterior demodulación.

En el artículo “A uW Backscatter-Morse-Leaf Sensor for Low-Power Agricultural Wireless Sensor Networks”, publicado en IEEE Sensors Journal, (Daskalakis, Goussetis, et al., 2018) diseña e implementa un sistema de comunicaciones por retrodispersión de arquitectura monoestática con la finalidad de prevenir el desperdicio de agua en los sistemas de riego de plantas. El sistema emplea un generador de señales con una antena monopolo para transmitir una onda portadora a 868MHz con una potencia de transmisión de 13dBm, para el receptor del sistema se utiliza un dispositivo SDR de bajo costo el cual es una versión mejorada del RTL-SDR sintonizado a la frecuencia de la onda portadora con una tasa de muestreo de 250kbps. El nodo del sistema incorpora un sensor que mide la diferencia de temperatura entre la hoja de la planta y el aire, magnitud que está relacionada directamente con el nivel de agua que necesita una planta. El prototipo de este sistema puede funcionar sin batería empleando como fuente de alimentación energética un panel solar teniendo un consumo de  $20\mu\text{W}$ , lo cual hace de éste un sistema de baja potencia. Para la prueba de funcionamiento del sistema, la antena de transmisión de onda portadora y la antena del receptor se ubicaron a una distancia entre sí de 17.27cm y el nodo se ubicó a 2 metros del posicionamiento de estas antenas.

Las pruebas realizadas del prototipo llevan a concluir que el sistema funciona correctamente y tiene un rango de operación de hasta 2 metros de distancia en un escenario de tipo indoor.

En el artículo “4-PAM Modulation of Ambient FM Backscattering for Spectrally Efficient Low Power Applications”, publicado en IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, (Daskalakis, Correia, et al., 2018) diseña e implementa un sistema de comunicaciones por retrodispersión de arquitectura ambiental en donde se utiliza la señal de radiofrecuencia de una estación FM cercana como transmisor de onda portadora, como receptor se utiliza el dispositivo RTL-SDR equipado con una antena monopolo telescópica de 2.5dBi de ganancia para recepción de señales FM. En el presente artículo se fabrica un nodo que utiliza un transistor ATF52189 E-pHEMT de Broadcom el cual va a recibir 4 valores distintos de voltaje para obtener 4 impedancias distintas y trabajar con modulación 4-PAM (modulación por amplitud de pulso). La señal de la estación FM es reflejada por el nodo hacia un receptor SDR de bajo costo, utilizando una antena monopolo telescópica de 2.5dBi del modelo SRH788. Para el post-procesamiento de la señal recibida por el RTL-SDR se utiliza GNU Radio y MATLAB.

En la tesis “Range characterization of backscatter wireless sensor networks”, publicada en el repositorio de tesis de estudiantes de “University of Twente”, (De Jong Bsc, 2019) diseña un transceptor por retrodispersión de baja potencia con un consumo de potencia menor a 100W de manera experimental. El objetivo es mejorar el rango del transceptor de retrodispersión mediante la relación entre sus características y las propiedades del radio, además se busca reducir el consumo energético del sistema para que se pueda utilizar de manera perpetua con una red de sensores (PWSN) volviéndolo así rentable. El autor concluye que se puede reducir la potencia de consumo con piezas digitales y analógicas modernas.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Señales de radiofrecuencia**

Según (San Román Castillo et al., 2018) se denomina radiofrecuencia a ciertas señales que se encuentran dentro del espectro electromagnético en donde se producen ondas electromagnéticas. Estas ondas propagan a la vez campos eléctricos y también magnéticos por el movimiento de una carga eléctrica. Las ondas electromagnéticas correctamente moduladas se pueden emplear para el envío de información de manera inalámbrica ya que son capaces de viajar por distintos medios de propagación.

El espectro electromagnético se divide en distintas bandas de frecuencias asignadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) con el fin de ser empleadas para distintos servicios inalámbricos. La clasificación de estas bandas se observa en la Tabla 1.

**Tabla 1**  
*Clasificación de Bandas en el Espectro Electromagnético*

<b>Numero de banda</b>	<b>Símbolos</b>	<b>Gama de frecuencias</b>	<b>Subdivisión métrica correspondiente</b>	<b>Abreviaturas métricas para las bandas</b>
3	ULF	300-3000 Hz	Ondas hectokilométricas	B.hkm
4	VLF	3-30 KHz	Ondas miriamétricas	BMam
5	LF	30-300 KHz	Ondas kilométricas	B.km
6	MF	300-3000 KHz	Ondas hectométricas	B.hm
7	HF	3-30 MHz	Ondas decamétricas	B.dam
8	VHF	30-300 MHz	Ondas métricas	B.m
9	UHF	300-3000 MHz	Ondas decimétricas	B.dm
10	SHF	3-30 GHz	Ondas centimétricas	B.cm
11	EHF	30-300 GHz	Ondas milimétricas	B.mm

Fuente: Sector de radiocomunicaciones de la UIT - UIT-R V.431-8 (ITU-R, 2015)

Como mencionamos anteriormente, existen rangos de frecuencia asignadas a ciertos servicios a nivel de telecomunicaciones que son arrendadas a empresas para un uso específico. Pero también tenemos rangos de frecuencia que son asignados al ámbito de investigación y experimentación denominadas bandas ISM tal como indica (López Alonso, 2019) y se puede observar en la Tabla 2. Debido a ello en esta tesis se decidió trabajar a la frecuencia de 915MHz ya que se encuentra dentro del rango de banda libre.

**Tabla 2**  
*Clasificación de Bandas ISM*

<b>Frecuencia Mínima</b>	<b>Unidad</b>	<b>Frecuencia Máxima</b>	<b>Unidad</b>	<b>ITU-R</b>	<b>Disponibilidad</b>
6,765	MHz	6,795	MHz	5.138	En área local
13,553	MHz	13,567	MHz	5.150	En todo el mundo
26,957	MHz	27,283	MHz	5.150	En todo el mundo
40.66	MHz	40.70	MHz	5.150	En todo el mundo
260,0	MHz	470,0	MHz	FCC	EEUU y Canadá
433,05	MHz	434,79	MHz	5.138 5.280	ITU- Región 1
868	MHz	869	MHz	*ETSI	Países CEPT
902	MHz	928	MHz	5.150	ITU- Región 2

Fuente: (López Alonso, 2019)

### **2.2.2. Sistemas de comunicaciones por retrodispersión**

La comunicación por retrodispersión se basa en una forma de onda de radiofrecuencia que incide en la antena de un nodo el cual debe cambiar constantemente entre una carga totalmente adaptada y una carga en cortocircuito. Esto mediante un interruptor de RF que se conecta directamente a la antena frontal de RF para crear los dos estados discretos. Para modulaciones de alto orden, se debe aumentar el número de estados y para lograr esto el circuito de RF debe generar una impedancia discreta específica para cada símbolo transmitido (Van Huynh et al., 2018). La implementación de este sistema se basa en cambiar constantemente el acoplamiento de las antenas a través de su impedancia. Este cambio permite obtener distintos coeficientes de reflexión que nos representa la cantidad de señal RF reflejada. En (Kim et al., 2019) se señala que el coeficiente de reflexión se determina a través de la Ecuación 1.

$$\Gamma_i = \frac{Z_a - Z_i}{Z_a + Z_i} \quad (1)$$

Donde  $\Gamma_i$  es el coeficiente de reflexión que representa la cantidad de onda reflejada por el nodo,  $Z_a$  es la impedancia de carga de la antena y  $Z_i$  ( $i=1, 2, \dots, M$ ) es la impedancia del nodo que llega a la antena siendo  $M$  el grado de modulación. Como indica (Thomas et al., 2012), la potencia de transmisión del nodo retrodispersor varía según la impedancia en que se encuentre, como se indica en la Ecuación 2.

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2 \sigma_i}{(4\pi)^3 r^4} \quad (2)$$

Donde  $P_R$  y  $P_T$  son señales de potencia en el receptor y el transmisor del nodo respectivamente,  $G_R$  y  $G_T$  son las ganancias del receptor por retrodispersión y de las antenas de transmisión,  $r$  es la distancia entre el receptor y el nodo, finalmente  $\lambda$  es la longitud de onda portadora.

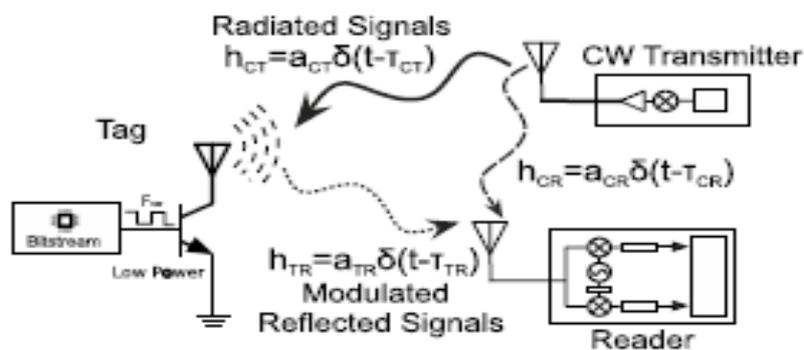
Cada coeficiente de reflexión viene dado por una sección transversal de radar (RCS) como se menciona en (Tountas, 2014) y se representa en la Ecuación 3.

$$\sigma_i = \frac{\lambda^2}{4\pi} G^2 |\Gamma_i - A_s|^2, i = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la portadora,  $G$  es la ganancia de la antena y  $A_s$  es el modo de estructura de la antena.

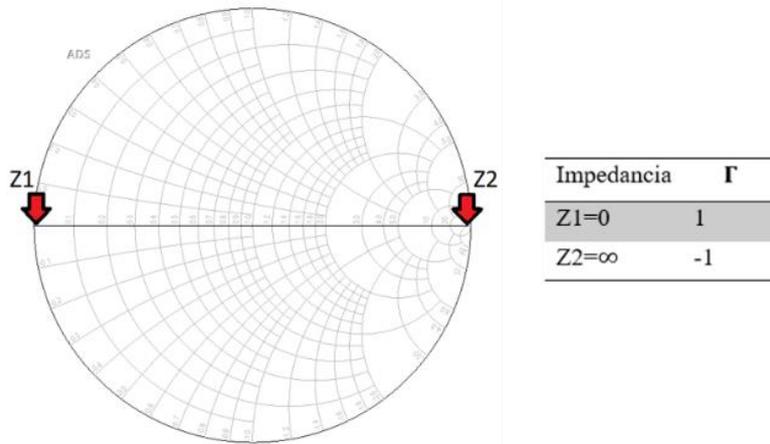
Como se muestra en la Figura 2, un transistor también se utiliza como interruptor de RF. Este componente se desarrolla como un acoplador de impedancias de la antena variando el voltaje de puerta que ingresa. En un caso ideal, como ya se ha mencionado anteriormente, los coeficientes de reflexión varían entre una línea de circuito abierto donde su valor es 1 y una línea en cortocircuito donde el valor es -1, según se observa en la Figura 3.

**Figura 2**  
*Modo de Propagación de las Señales*



Fuente: (Daskalakis et al., 2017)

**Figura 3**  
Representación del Coeficiente de Reflexión en el Ábaco de Smith



Fuente: Elaboración propia

La señal reflejada por la antena del nodo es enviada por un medio de transmisión hacia un receptor. Entonces, según (Daskalakis et al., 2017) la señal recibida en el receptor está dada por la Ecuación 4:

$$y_r(t) = n(t) + \frac{A_c}{2} \cdot e^{-j2\pi\Delta F t} \cdot [\alpha_{CR} e^{-j\phi_{CR}} + s\alpha_{CT}\alpha_{TR} e^{-j\phi_{CTR}} \Gamma(t - \tau_{TR})] \quad (4)$$

Donde  $A_c$  es la amplitud de la onda portadora, además  $\alpha_{CR}, \alpha_{CT}, \alpha_{TR} \in \mathbb{R}$  y  $\phi_{CR}, \phi_{TR} \in [0, 2\pi)$ . También  $\tau_{TR}$  es el retardo de tiempo,  $s$  es la eficiencia de dispersión y ganancia de antena. El indicador  $\alpha_{CR} e^{-j\phi_{CR}}$  define el componente que depende del canal entre emisor y receptor ( $h_{CR}$  en Figura 2). El indicador  $\alpha_{CT}\alpha_{TR} e^{-j\phi_{CTR}}$  define el término que depende del canal entre transmisor- receptor y nodo-receptor ( $h_{CT}$  y  $h_{TR}$  en Figura 2). Por último, la señal del nodo es una señal directa de  $\Gamma$  a lo largo del tiempo y  $n(t)$  es el componente de ruido Gaussiano.

Si bien el uso de comunicaciones por retrodispersión nos permite satisfacer una transmisión de datos a bajo costo de potencia, una de las desventajas encontradas en este tipo de sistemas es el corto alcance de funcionamiento, esto debido al constante proceso de ida y vuelta de las ondas en la antena. Según indica (Memon et al., 2019), esta acción provoca auto interferencia lo que ocasiona pérdidas en la ruta y limita el rango de señales reflejadas.

También, (Van Huynh et al., 2018) nos señala los tipos de configuración del sistema por retrodispersión para poder entender mejor las características de cada topología, entre ellos tenemos:

- Sistema de comunicación por retrodispersión monoestática

Este modelo se caracteriza por tener dos componentes: un nodo por retrodispersión y un dispositivo Tx/Rx. El dispositivo Tx/Rx consta de dos componentes en el mismo dispositivo; una fuente de transmisión RF y un receptor. El funcionamiento del sistema de comunicaciones por retrodispersión monoestático empieza cuando el transmisor de RF genera una señal, esta señal incide en la antena del nodo por retrodispersión que absorbe la energía RF, refleja la señal y la modula para la transmisión de los datos de información hacia el receptor. Debido a que el receptor y el transmisor RF están ubicados en el mismo dispositivo la señal puede sufrir pérdidas de ida y vuelta afectando la comunicación, debido a ello una desventaja de este sistema es que su funcionamiento a largas distancias es deficiente ya que el receptor recibe una señal con mayor interrupción de energía reflejada.

- Sistema de comunicación por retrodispersión biestática

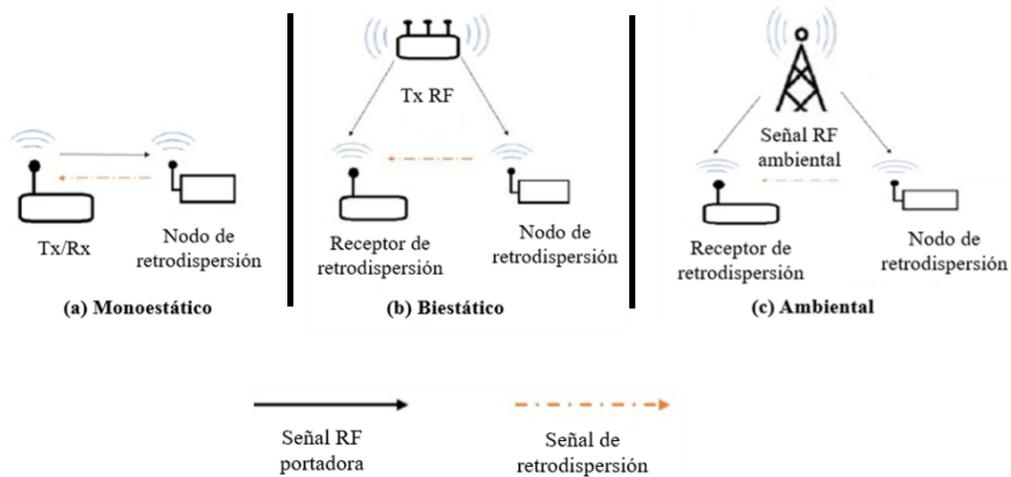
Este sistema está caracterizado por tener al emisor de onda portadora RF y el receptor en dispositivos diferentes, además de un nodo por retrodispersión. Debido a que el transmisor RF está separado del receptor, se puede disminuir las pérdidas que ocurren en el sistema de comunicaciones por retrodispersión monoestática ya que se puede colocar el transmisor en lugares óptimos para mejorar la eficiencia de transmisión. Además, el costo es más accesible porque se puede implementar con el diseño simple de componentes.

- Sistema de comunicación por retrodispersión ambiental

Mientras que para el sistema de comunicaciones por retrodispersión monoestática y biestática es necesario la implementación de una fuente de onda portadora RF. El sistema de comunicaciones por retrodispersión ambiental utiliza las ondas RF que se encuentran en el ambiente, por ejemplo, las ondas de estaciones de radio, Wifi y bluetooth. Una de las desventajas de este sistema es que las ondas RF son muy impredecibles, además el diseño y la implementación de este tipo de sistema por retrodispersión suelen ser más complejas.

En la Figura 4 podemos observar los distintos tipos de comunicaciones por retrodispersión mencionadas anteriormente.

**Figura 4**  
*Tipos de Configuración de Sistemas por Retrodispersión*



Fuente: Elaboración propia

### 2.2.3. Radio definida por software (SDR)

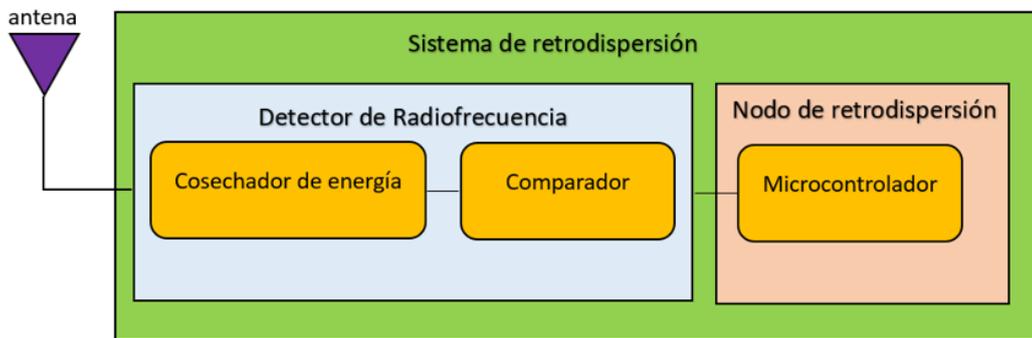
La combinación de procesamiento digital y RF analógica hacen posible el funcionamiento de los sistemas de comunicación. La flexibilidad del hardware de RF para ser rediseñado y reconfigurado ha llevado a que el front-end (filtro, amplificador, mezclador y oscilador) de una radio maneje la mayoría de los sistemas de RF. Normalmente el front-end de RF está controlado por software en lugar de definido por software. Esta moderna combinación de front-end de RF flexible y procesamiento de señales en software ha dado lugar a la radio definida por software (T. F. Collins et al., 2018). Un sistema SDR es un dispositivo complejo que realiza actividades en simultáneo para transmitir y recibir una información. Un sistema digital de comunicaciones consiste en una secuencia de operaciones para tomar una información y transmitirla inalámbricamente hacia un receptor, en donde se procesa y decodifica en una versión reconstruida de la información original. Si la información original es analógica, es digitalizada en un software para obtener una representación binaria de esta información. Este formato binario es procesado digitalmente por el transmisor en el dispositivo SDR y es convertido a una señal electromagnética sinusoidal, que estará definida por sus características como amplitud, frecuencia portadora y fase. Por el otro lado del enlace de comunicación se tiene al receptor, que puede estar en el mismo dispositivo SDR del transmisor o en otro y está encargado de identificar la onda modulada transmitida por un canal que agrega ruido y distorsión. Luego convierte la señal interceptada en una señal digital y por medio de software se demodula y obtiene la adecuada representación binaria de la información transmitida (T. F. Collins et al., 2018).

### 2.2.4. Detector de radiofrecuencia

Nuestro circuito detector de RF propuesto se implementa dentro del nodo y se compone de dos partes, un cosechador de energía y un circuito comparador. Tal como se muestra en la Figura 5.

El recolector de energía está compuesto por un bloque rectificador-multiplicador, el comparador está compuesto por un amplificador operacional adecuadamente polarizado, ambos se explican a detalle en la siguiente sección.

**Figura 5**  
*Diagrama de Bloques del Detector de Radiofrecuencia*

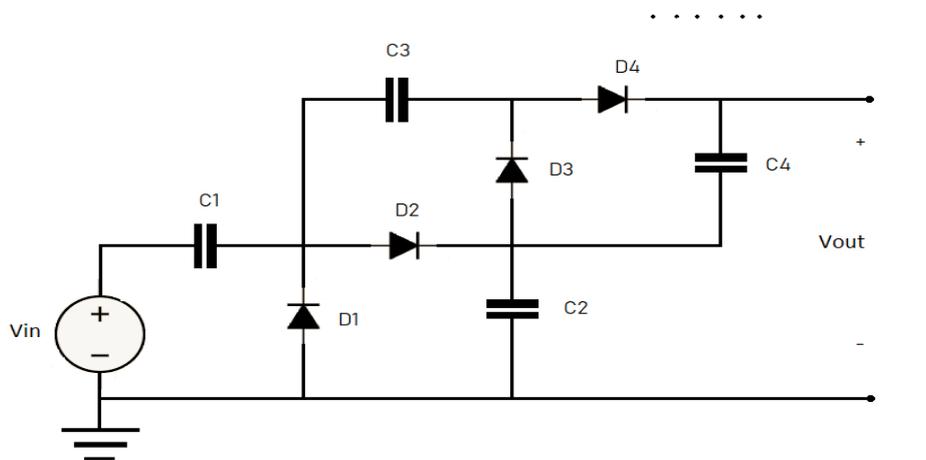


Fuente: Elaboración propia

#### A. Cosechador de energía

Este circuito funciona captando energía de una señal RF que incide en una antena, la rectifica y genera un voltaje continuo a la salida para poder ser utilizada en posteriores procesos. La Figura 6 muestra un circuito rectificador-multiplicador de dos etapas.

**Figura 6**  
*Circuito Multiplicador de Voltaje de 2 Etapas*



Fuente: Elaboración propia

Donde  $V_{in}$  es el voltaje de entrada,  $V_{out}$  el voltaje de salida,  $D_{1,2,3,4}$  los diodos y  $C_{1,2,3,4}$  los condensadores.

El circuito rectificador-multiplicador de voltaje captura la energía que ingresa por la antena y se va almacenando en los condensadores según la polarización de los diodos. Este proceso permite rectificar la energía obtenida por la señal RF incidente y obtener voltaje continuo, además genera un aumento de voltaje almacenado en función del número de etapas conectadas en serie dentro del circuito. Cada etapa actúa como una batería con voltaje de salida de circuito abierto  $V_0$ , resistencia interna  $R_0$ , resistencia de carga  $R_L$  y voltaje de salida de  $V_{out}$ , como menciona (Shahabuddin et al., 2018) y se muestra en la Ecuación 5.

$$V_{out} = \frac{V_0}{R_0 + R_L} \cdot R_L. \quad (5)$$

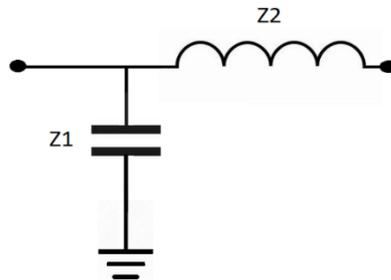
Cuando  $n$  etapas de este circuito están conectadas el  $V_{out}$  es calculado como se muestra en la Ecuación 6.

$$V_{out} = \frac{V_0}{R_0 + R_L} \cdot R_L = V_0 \cdot \frac{1}{\frac{R_0}{R_L} + \frac{1}{n}} \quad (6)$$

Cada etapa consta de diodos Schottky y condensadores para la rectificación como indica (Akter et al., 2014).

Como se sugiere en (Al-Azawy & Sari, 2019), para que la recolección de energía funcione eficientemente, se debe sintonizar el circuito con un adaptador de impedancia a la misma frecuencia que opera el sistema. Se encuentran varios diseños para los circuitos adaptadores de impedancia, pero en este trabajo se utiliza el tipo L, que se muestra en la Figura 7.

**Figura 7**  
*Adaptador de Impedancia de Tipo L*



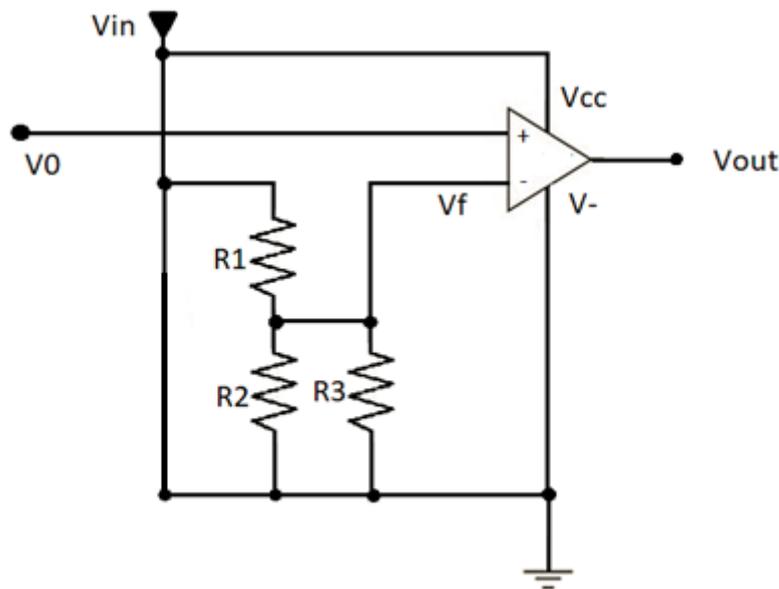
Fuente: Elaboración propia

Donde  $Z_{1,2}$  son impedancias.

## B. Circuito comparador

Este circuito está diseñado con un amplificador operacional alimentado por un voltaje  $V_{in}$ , como se muestra en la Figura 8. El dispositivo detecta el voltaje proveniente de la salida del circuito cosechador de energía dado por un voltaje  $V_0$  y este es comparado con un voltaje fijo  $V_f$ . Cuando  $V_0 > V_f$ , el amplificador operacional envía un voltaje de salida  $V_{out}$  al microcontrolador para ponerlo en modo activo y comenzar a ejecutar la programación configurada.

**Figura 8**  
*Circuito Comparador*

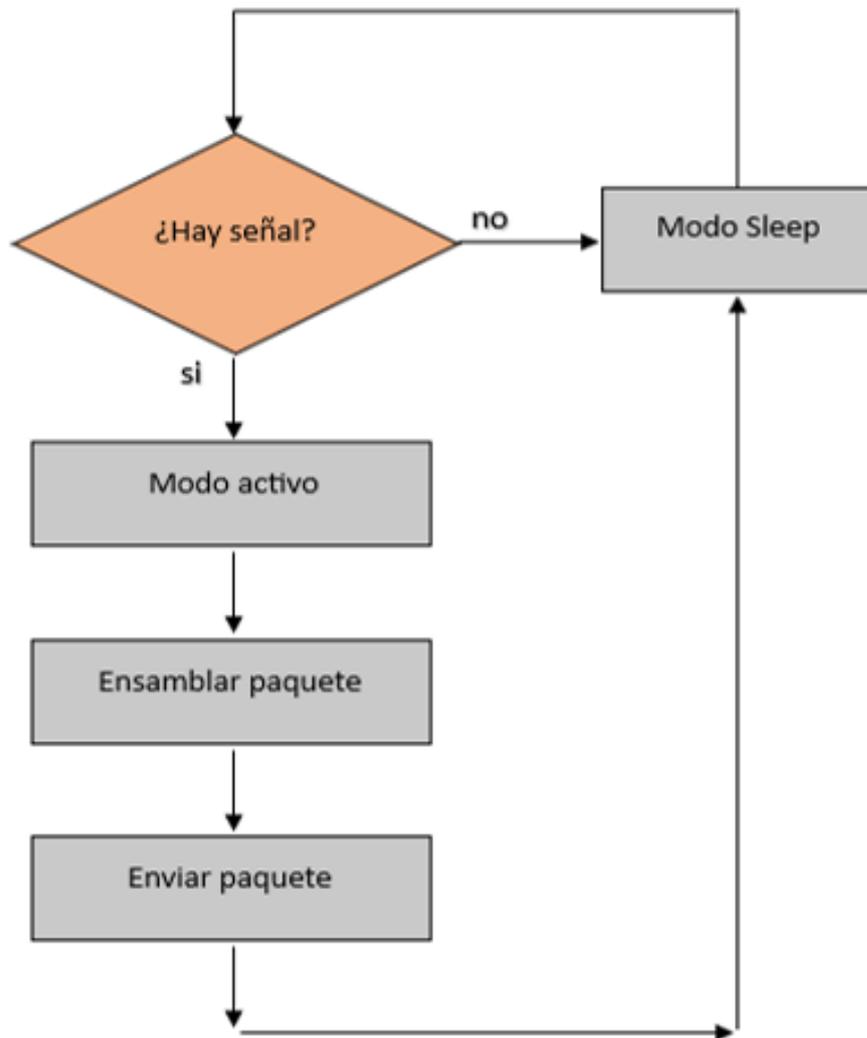


Fuente: Elaboración propia

Donde  $V_{cc}$  es el voltaje de corriente continua,  $V -$  el voltaje negativo y  $R_{1,2,3}$  las resistencias.

De acuerdo con el sistema integrado del circuito detector de RF conectado directamente a un microcontrolador, ejecutamos el diagrama de flujo descrito en la Figura 9 donde podemos ver que el sistema da inicio verificando si hay una señal de RF de 915MHz existente a corta distancia, de ser así genera una interrupción para sacar al microcontrolador del modo de suspensión o modo sleep, activando el código primario para ensamblar el paquete y luego sacarlo por un pin de salida. Después de eso, vuelve a entrar en modo de suspensión hasta que se detecte otra señal a 915MHz.

**Figura 9**  
*Diagrama de Bloques del Nodo por Retrodispersión*



Fuente: Elaboración propia.

### **2.2.5. Modulación y demodulación**

(Tomasi, 2001) Un sistema de comunicaciones se conforma por un transmisor, un medio de transmisión y un receptor. El transmisor es el dispositivo encargado de que cierta información sea transmitida por un medio de transmisión. El medio de transmisión es por dónde la información va a ser transmitida desde el transmisor hacia el receptor y éste puede ser: corriente eléctrica por medio de un conductor eléctrico, ondas electromagnéticas luminosas por medio de fibra óptica o el medio físico y ondas electromagnéticas de radio también por el medio físico. El receptor es el dispositivo encargado de captar la señal proveniente desde el transmisor y recuperar la información transmitida.

Para establecer una comunicación en un sistema que utiliza el medio físico como medio de transmisión es necesario modular la información en el transmisor utilizando una

señal analógica de alta frecuencia la cual es denominada como portadora. La información modula a la señal portadora, modificando alguna de sus características que puede ser: amplitud, fase o frecuencia. La modulación es el proceso por el cual se cambia alguna característica de la señal portadora proporcionalmente con la información a transmitir. La Ecuación 7 es la forma general de una onda senoidal variable en el tiempo en donde se denotan sus variables.

$$v(t) = V\text{sen}(2\pi ft + \theta), \quad (7)$$

Donde  $v(t)$  es el voltaje variable de forma senoidal en el tiempo,  $V$  es la amplitud máxima en volts,  $f$  es la frecuencia en Hertz y  $\theta$  es el desplazamiento de fase en radianes.

La modulación puede ser de dos tipos: modulación analógica y modulación digital, los cuales dependen del tipo de señal de información.

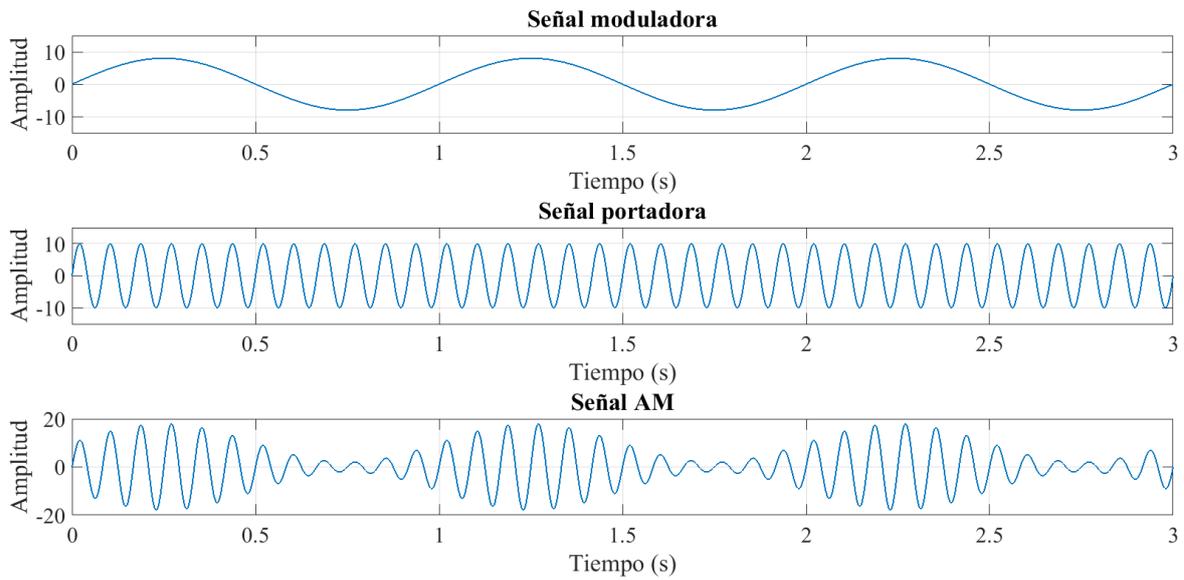
Si la señal de información es una señal analógica y ha modulado la portadora en función de su amplitud es una modulación de amplitud (AM de amplitude modulation). Si se ha modulado la portadora en función de la frecuencia es una modulación de frecuencia (FM de frequency modulation). Si se ha modulado la portadora en función de la fase es una modulación de fase (PM de phase modulation). AM, FM y PM son tipos de modulación analógica.

Si la señal de información es una señal digital y ha modulado la portadora en función de su amplitud es una modulación por desplazamiento de amplitud (ASK de amplitude shift keying). Si se ha modulado la portadora en función de la frecuencia es una modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK de frequency shift keying). Si se ha modulado la portadora en función de la fase es una modulación por desplazamiento de fase (PSK de phase shift keying). Si se ha modulado la portadora en función del tiempo y fase al mismo tiempo es una modulación de amplitud en cuadratura (QAM de quadrature amplitude modulation). ASK, FSK, PSK y QAM son tipos de modulación digital.

La demodulación es el proceso inverso a la modulación y se realiza en el receptor. En este proceso se recupera la información transmitida que se encuentra contenida en la onda portadora.

En la Figura 10 se observa la modulación AM, en donde se muestra la información analógica a transmitir, la señal portadora y la señal resultante modulada en amplitud.

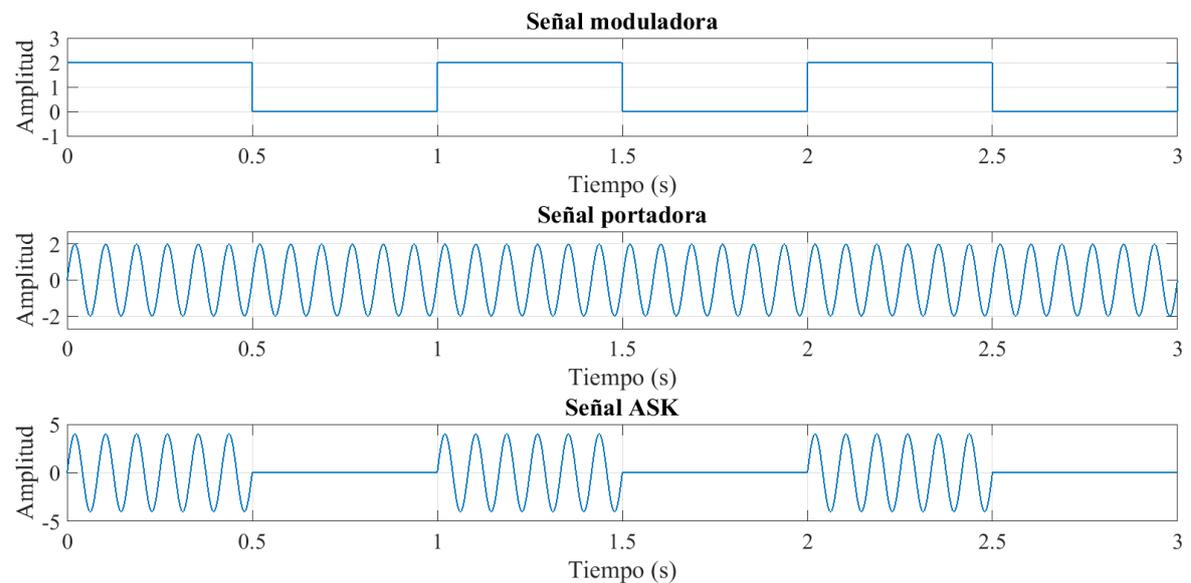
**Figura 10**  
*Modulación AM*



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 11 se observa la modulación ASK, en donde se muestra la información digital a transmitir, la señal portadora y la señal resultante modulada por desplazamiento de amplitud.

**Figura 11**  
*Modulación ASK*



Fuente: Elaboración propia

### III. METODOLOGÍA

#### 3.1 Descripción de la metodología

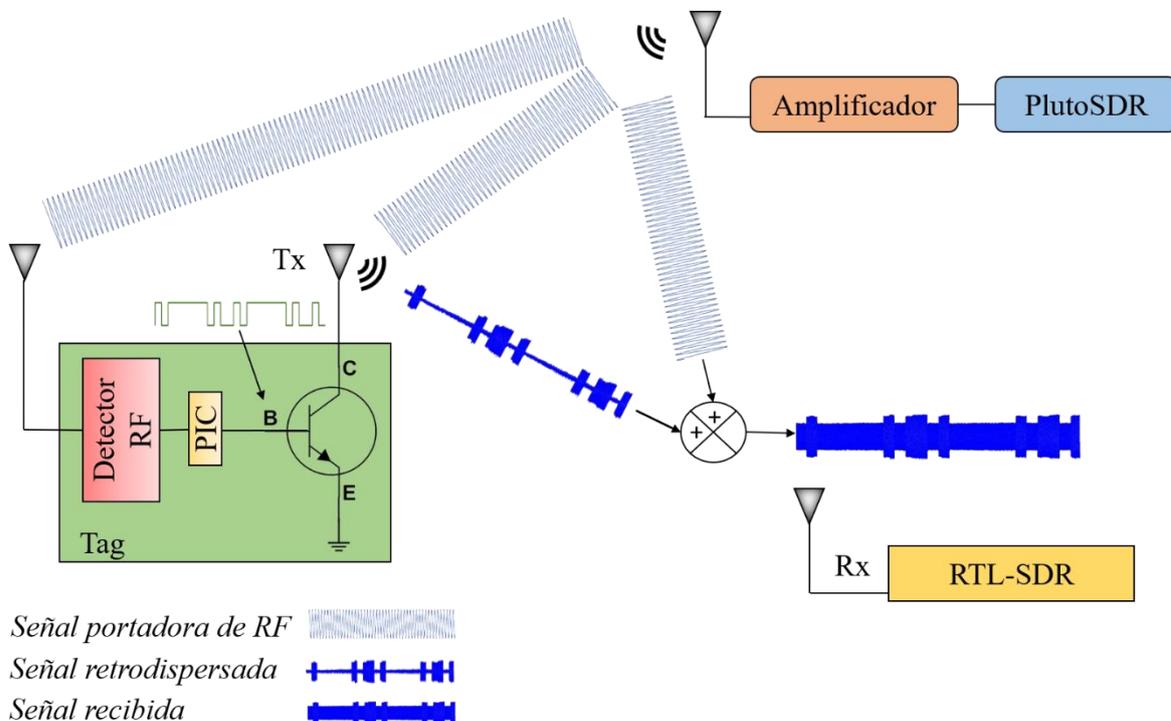
##### 3.1.1 Etapas del desarrollo de la tesis

###### 3.1.1.1 Diseño del sistema

En esta sección se desarrolla el diseño del sistema de comunicaciones por retrodispersión, el cual involucra el diseño del transmisor que comprende el uso del dispositivo PlutoSDR conectado a un amplificador, el diseño del circuito electrónico del nodo por retrodispersión incluyendo el detector de RF, y el diseño del receptor el cual es el RTL-SDR. Ambos dispositivos SDR utilizan el software GNU Radio para realizar la configuración de la onda portadora y su posterior transmisión, así como el proceso de demodulación de la señal recibida, respectivamente. En la Figura 12 se muestra el esquema del sistema a implementar donde se pueden ver los componentes indicados anteriormente. El procedimiento inicia cuando el transmisor irradia una onda portadora hacia el sistema por retrodispersión el cual detecta la señal existente y activa el nodo, este intercepta la señal, la refleja, modula y trasmite hacia el receptor. En el receptor se realiza la demodulación de la señal, obteniendo así la información transmitida por el nodo.

**Figura 12**

*Esquema del Sistema de Comunicaciones por Retrodispersión*



Fuente: Elaboración propia

### **3.1.1.2 Implementación del sistema**

En esta etapa se realiza la implementación del sistema siguiendo el diseño establecido previamente. Para ello se elabora una placa electrónica en donde se encuentra el nodo por retrodispersión y también al detector de RF. Se procede con la fabricación e integración de los componentes a la PCB para la respectiva soldadura.

Debido a que el dispositivo que se usará para la transmisión de la onda portadora a una frecuencia de 915MHz es un SDR el cual tiene la cualidad de cambiar sus características por medio de un software es necesario realizar un programa por bloques en el software GNU Radio. El mismo caso se tiene para el receptor, se debe crear una programación por bloques, que permita realizar la demodulación de la señal retrodispersada por el nodo y así obtener la información.

### **3.1.1.3 Pruebas de funcionamiento del sistema**

En cuanto a las pruebas de funcionamiento del sistema de esta investigación, se plantea verificar que el transmisor de RF irradie la señal a una frecuencia de 915MHz según lo establecido en los objetivos. Luego verificar el correcto funcionamiento del sistema por retrodispersión validando en primer lugar que el circuito detector de RF este recolectando voltaje y a la vez analizar la distancia máxima de recolección. En segundo lugar, se plantea transmitir una secuencia de datos programadas en el microcontrolador, colocando al nodo por retrodispersión en la línea de vista entre la antena del transmisor de la onda portadora y la antena del receptor para verificar la operación del sistema bajo el esquema propuesto. Además, se van a realizar cambios de ubicación del nodo como también del transmisor de onda portadora para explorar el rango del sistema y encontrar la posición de los dispositivos en donde se tenga un mejor rendimiento. Dadas las pruebas mencionadas, se realiza un análisis junto con la medición de la potencia del sistema para identificar características específicas sobre su operación.

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema y su rango de operación, se va a medir la tasa de error de bit o bit error rate (BER), indicador que permite validar la fiabilidad de la comunicación del sistema y finalmente obtener las conclusiones sobre este proyecto de investigación.

## **3.2 Implementación de la metodología**

Según lo explicado en el apartado anterior, en la implementación de esta tesis se debe lograr lo siguiente:

- Implementar un transmisor de onda portadora a 915MHz.

- Diseñar el circuito del nodo por retrodispersión.
- El sistema debe ser elaborado con componentes comerciales.
- Elaborar una placa de circuito impreso o PCB para el nodo por retrodispersión.
- Generar un programa en bloques en GNU Radio para la transmisión de onda portadora.
- El receptor debe trabajar a una distancia prudente y obtener la información transmitida.

### 3.2.1 Transmisor de onda portadora

Para la transmisión de onda portadora se tuvo que adquirir componentes ideales para que puedan trabajar dentro del rango establecido en esta tesis. Por ello se optó por el módulo PlutoSDR el cual se muestra en la Figura 13 y sus características en la Tabla 3.

**Figura 13**  
*Módulo PlutoSDR*



Fuente: (*ADALM-PLUTO Evaluation Board* / Analog Devices, s/f)

**Tabla 3***Características del PlutoSDR*

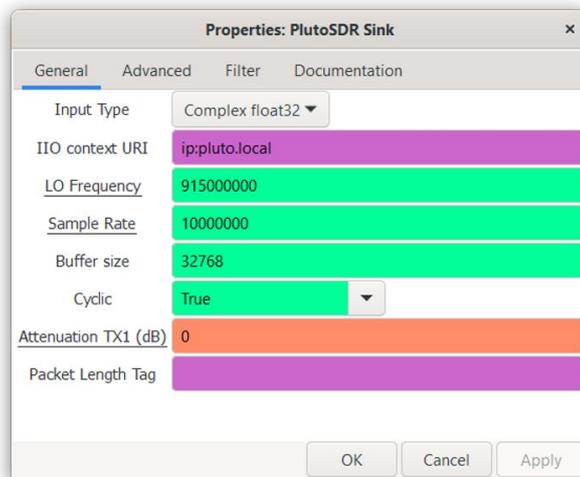
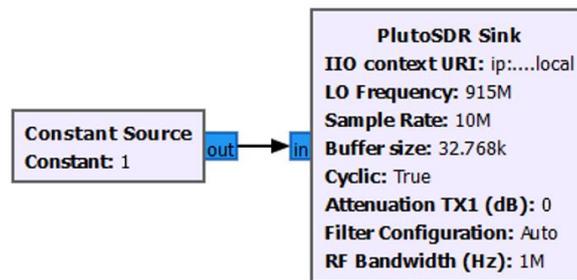
<b>Característica</b>	<b>Unidad</b>
Rango de trabajo	325MHz - 3.8 GHz
Ancho de banda	220kHz - 20 MHz
Velocidad de datos de salida	44MSPS - 65.1kSPS
Potencia de salida máxima	7dBm
Peso	114g
Temperatura	10 °C a 40 °C

Fuente: Elaboración propia

Uno de los beneficios de este dispositivo es la compatibilidad con el software GNU Radio, debido a ello como siguiente paso se procedió con la integración del PlutoSDR con la interfaz gráfica del software, como primer paso se conecta al módulo con la computadora personal mediante cable USB (2.0). Una vez en la interfaz, se procede con la configuración y conexión de bloques en dicho entorno para generar la señal portadora a 915MHz. En la Figura 14 se observa los bloques y sus respectivos parámetros en la interfaz de GNU Radio.

**Figura 14**

*Interfaz Gráfica de GNU Radio para Transmisión de Onda Portadora*

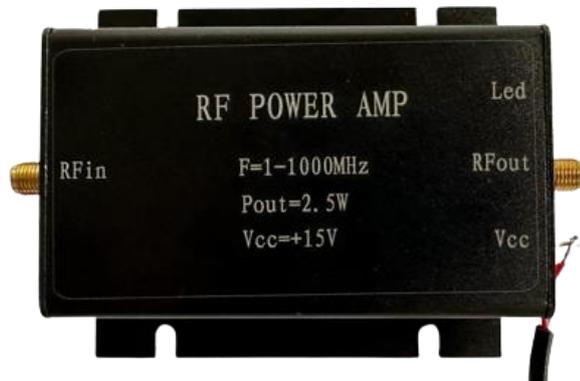


Fuente: Elaboración propia

El bloque “Constante Source” es un bloque que va a generar un valor de forma constante, este valor es 1 con la finalidad de generar una onda portadora constante. Este bloque se conecta con “PlutoSDR Sink”, donde se configura estableciendo los parámetros mostrados en la Figura 14, tales como: identificador uniforme de recursos o URI, que según (T. Collins, 2023) se debe colocar como “ip:pluto.local”, frecuencia del oscilador que es 915MHz, la tasa de muestreo que es 10Mps y además el ancho de banda RF a 1MHz.

Externamente el puerto Tx del PlutoSDR está conectado a un amplificador de potencia de hasta 2.5W que opera en el rango de frecuencia de 1-1000MHz, de la marca TZT. Este amplificador se emplea con la finalidad de obtener mayor potencia en la onda portadora y se muestra en la Figura 15.

**Figura 15**  
*Amplificador de Potencia*



Fuente: Elaboración propia

Por último, el sistema de transmisor de onda portadora necesita ir conectado a una antena. La antena es el componente encargado de propagar la señal portadora de RF en el medio hasta el sistema por retrodispersión. Para la elección de la antena se tuvo en cuenta la frecuencia a la cual opera el sistema implementado en esta tesis, por ello se decidió trabajar con una antena ya elaborada a esa frecuencia la cual se muestra en la Figura 16 y cuya descripción se encuentra en la Tabla 4.

**Figura 16**  
*Antena TI.92.2113 i 915MHz*



Fuente: (915MHz Terminal Mount Dipole Antenna / Taoglas TI.92.2113, s/f)

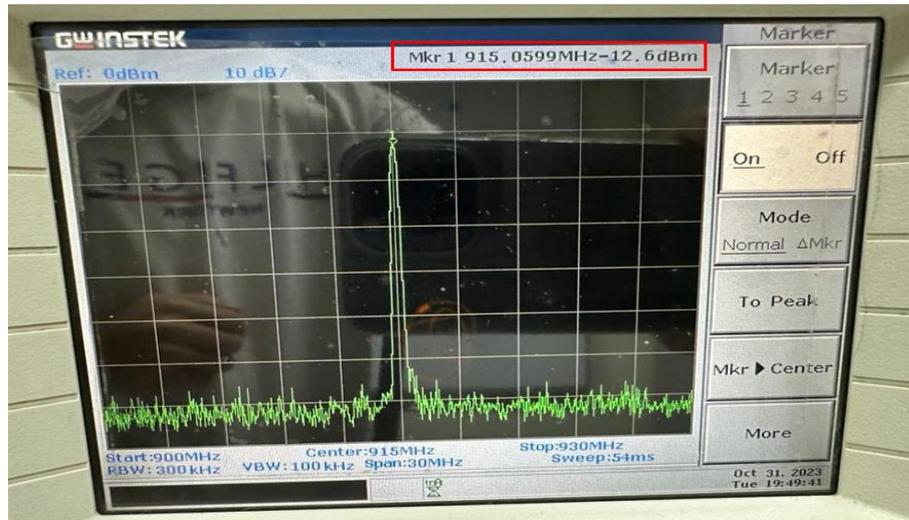
**Tabla 4***Descripción de la Antena*

<b>Característica</b>	<b>Unidad</b>
Modelo	TI.92.2113 i
Frecuencia	ISM – 915MHz
Impedancia	50Ω
Ganancia	2 dBi
Polarización	Lineal
Eficiencia	80%
Conector	SMA
Peso	22.5g

Fuente: Elaboración propia

Teniendo los dispositivos necesarios para la transmisión de la onda portadora, los conectamos y ponemos en funcionamiento. Para verificar que se está transmitiendo la señal, se utilizó un analizador de espectros modelo GSP-830 de la marca GWINSTEK con rango de frecuencia de 9kHz - 3GHz. En la Figura 17 se puede observar que en analizador de espectro se utiliza un marcador para localizar la mayor potencia de la señal transmitida. Según lo realizado se valida que la señal se encuentra en una frecuencia de 915.0599MHz con una potencia de -12.6dBm. Con lo cual se ha corroborado la generación de la onda portadora con las características requeridas.

**Figura 17**  
*Analizador de Espectro Centrado en 915MHz*

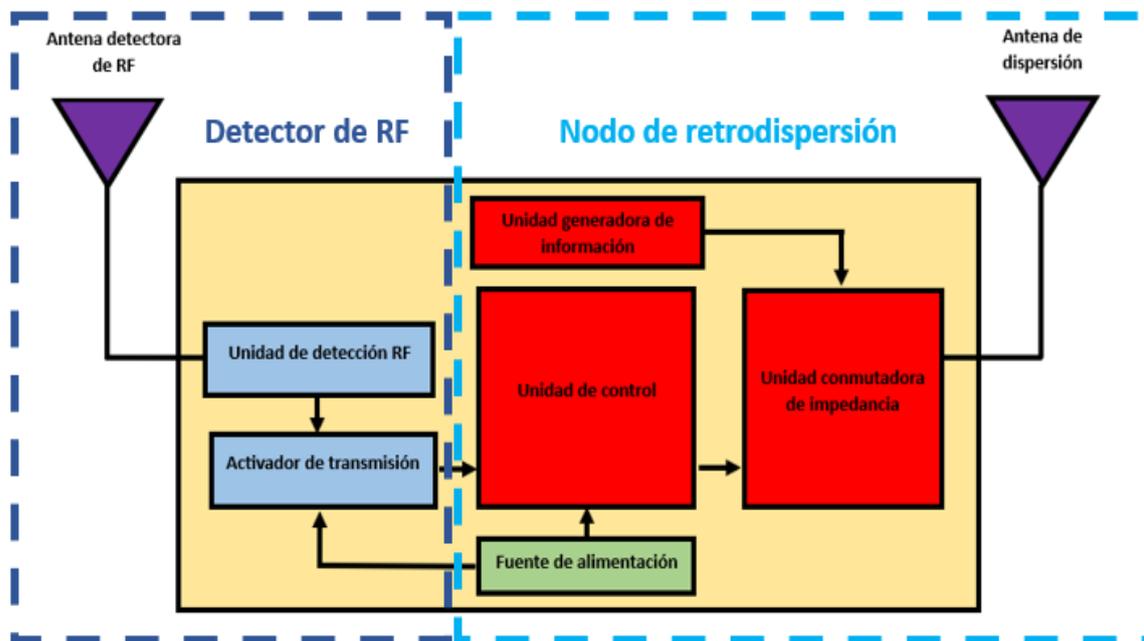


Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2 Sistema por retrodispersión

Para iniciar la implementación de este diseño se debe determinar el diagrama de bloques del sistema por retrodispersión en cual se muestra en la Figura 18.

**Figura 18**  
*Diagrama de Bloques del Sistema por Retrodispersión*



Fuente: Elaboración propia

La unidad de detección RF y el activador de transmisión hacen referencia a un circuito detector de RF. La unidad de control, unidad generadora de información y unidad conmutadora de impedancia están incluidos dentro del nodo por retrodispersión y la fuente de alimentación es el componente que suministra voltaje a todo el sistema. Cabe mencionar que para el sistema por retrodispersión se utilizó el mismo modelo de antena tanto para la antena detectora de RF y la antena de dispersión

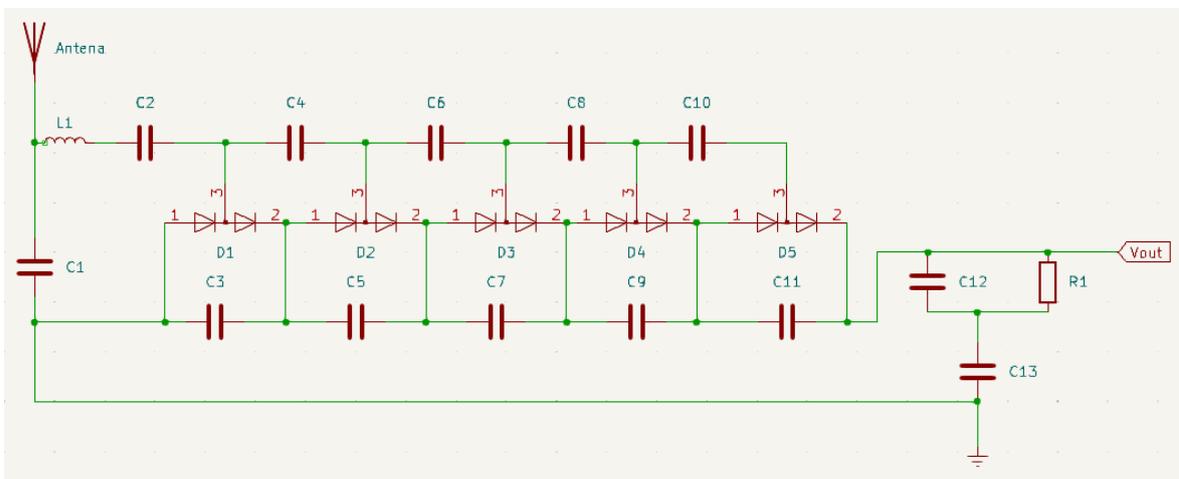
### 3.2.2.1. Detector de RF

En esta etapa se diseña la topología del circuito detector de RF el cual comprende un cosechador de energía y un comparador tal cual se indicó anteriormente. Se determina también los componentes comerciales a utilizar y que trabajen de manera eficiente en el sistema.

#### 3.2.2.1.1. Circuito cosechador de energía

Este circuito inicia con un acoplador de impedancia el cual aumenta la eficiencia de la señal recibida por la antena a la frecuencia de 915 MHz. Para ello, se utilizan componentes reactivos como son los inductores y capacitores que reservan la energía brindada de la antena mejorando la potencia de recepción. Luego de este proceso la energía obtenida ingresa al circuito rectificador-multiplicador para obtener un voltaje rectificado y a la vez aumentarlo según la cantidad de etapas implementadas, el diseño del circuito se puede apreciar en la Figura 19.

**Figura 19**  
*Circuito del Cosechador de Energía*



Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que de la antena va conectada a un circuito acoplador de impedancia compuesta por un inductor  $L_1$  y un capacitor  $C_1$ , los cuales se conectan en serie a un circuito duplicador de voltaje de 5 etapas comprendida de capacitores ( $C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}$  y  $C_{11}$ ) y además se utilizó integrados SMS7630-005LF ( $D_1, D_2, D_3, D_4$  y  $D_5$ ) como rectificadores. Finalmente se conectan a los capacitores  $C_{12}, C_{13}$  y una resistencia de carga  $R_1$ . Los valores de los componentes utilizados se muestran en la Tabla 5.

Se utilizó el integrado SMS7630-005LF debido a que internamente está compuesto por diodos Schottky de silicio que tienen la propiedad de trabajar con señales RF de forma adecuada y pueden ser utilizadas en sistemas que trabajen en alta frecuencia.

**Tabla 5**  
*Valor de Componentes Utilizados*

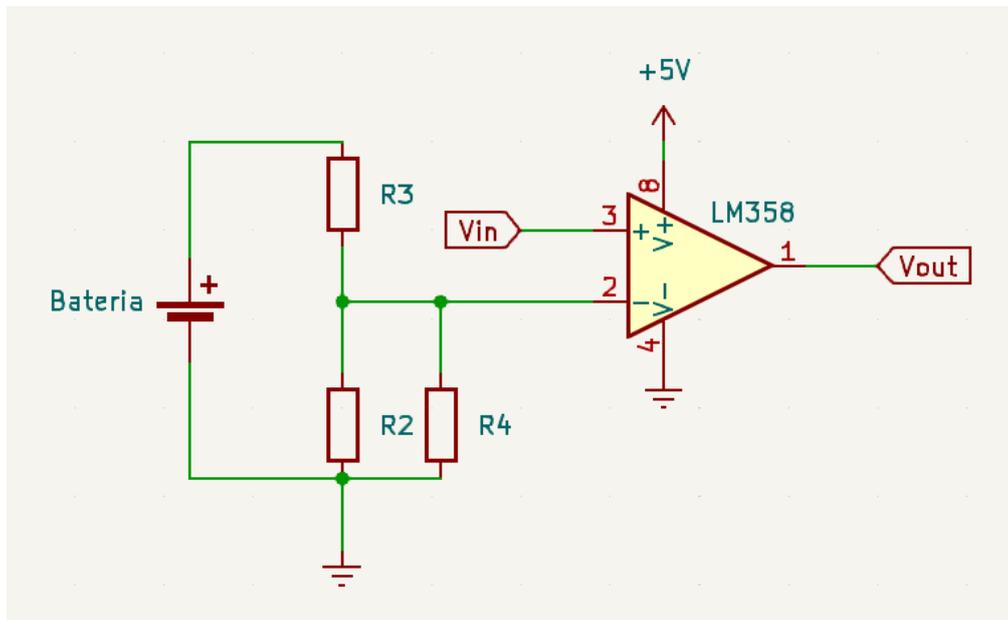
Componente	Valor
$L_1$	20nH
$C_1$	8.2 pF
$D_{1,.....,5}$	SMS7630-005LF
$C_{2,.....,11}$	30 pF
$C_{12}$	100 pF
$C_{13}$	1 uF
$R_1$	2 M $\Omega$

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2.1.2. Circuito comparador

Este circuito se implementó con la finalidad de hacer una comparación entre el voltaje de salida del cosechador de energía con un voltaje de referencia para obtener un voltaje de salida estable que sea detectada por el nodo de retrodispersión. Para ello, se diseñó la topología que se muestra en la Figura 20.

**Figura 20**  
*Circuito Comparador*



Fuente: Elaboración propia

Para este circuito se utilizó un amplificador operacional LM358 debido a que tiene salidas protegidas ante cortocircuitos, además su tensión funcionamiento esta entre 3.0V a 32V, haciendo que sus características sean adecuadas para el sistema. El diseño del circuito comparador también cuenta con las resistencias  $R_2 = 10M\Omega$ ,  $R_3 = 330\Omega$  y  $R_4 = 22K\Omega$ .

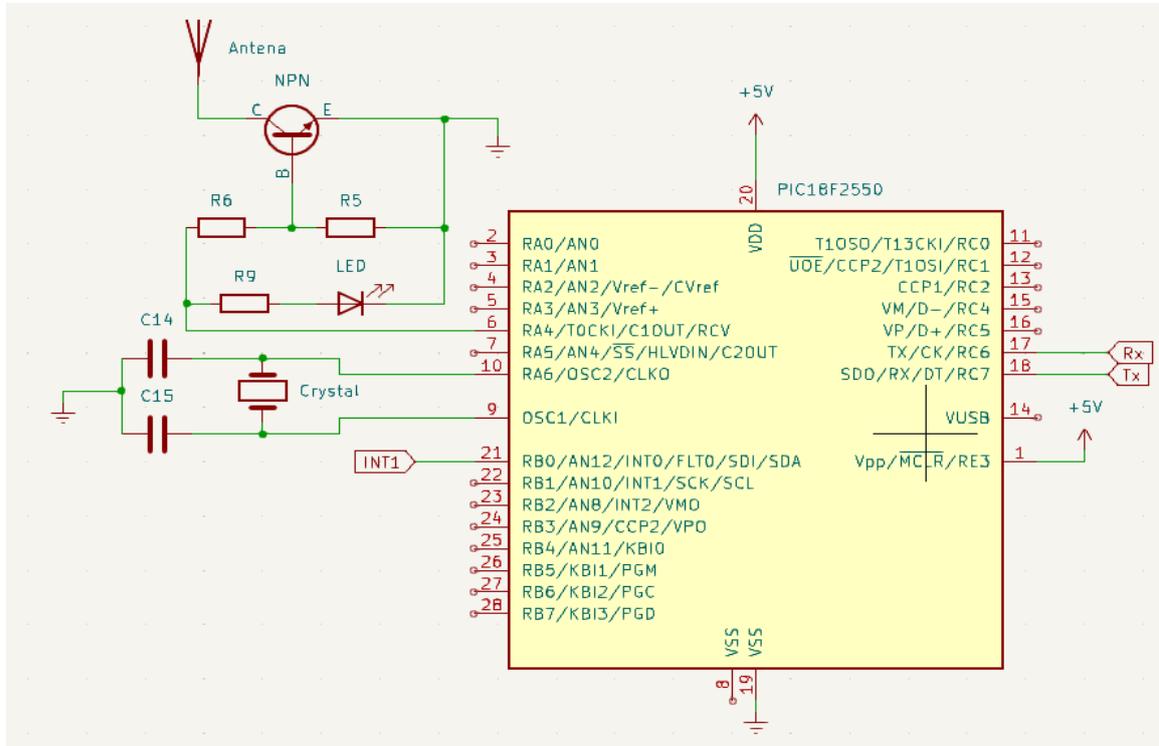
### 3.2.2.2. Nodo por retrodispersión

Este circuito está conformado por un microcontrolador como unidad de control, un transistor como interruptor de radiofrecuencia y una antena para enviar la secuencia de información. Al microcontrolador ingresa una señal proveniente del detector RF, la cual genera una interrupción en el dispositivo que se encontraba en modo reposo y lo pone en modo activo corriendo la programación interna. La programación elabora una secuencia de bits que serán enviados al transistor conectado en emisor común lo que genera el cambio de acoplamiento de la antena.

Para este diseño se utilizó un microcontrolador PIC 18f2550 debido a su bajo consumo energético de 25mA en modo activo y de 0.1µA en modo reposo, además su amplio rango de voltaje de operación de 2V a 5V es el adecuado para el sistema trabajado en esta tesis. Siguiendo con la descripción de los componentes también se utilizó un transistor 2N5551 tipo NPN ya que cuenta con una velocidad de conmutación muy rápida y la disipación de potencia es 0.625 W. Complementariamente se tiene las resistencias  $R_5$  y  $R_6 =$

$10K\Omega$  y  $R_7 = 330\Omega$ , dos condensadores  $C_{14}$  y  $C_{15} = 22\mu F$ , un cristal de  $4MHz$  y un diodo LED para verificar el funcionamiento del sistema. La topología elaborada se puede apreciar en la Figura 21.

**Figura 21**  
Circuito del Nodo por Retrodispersión

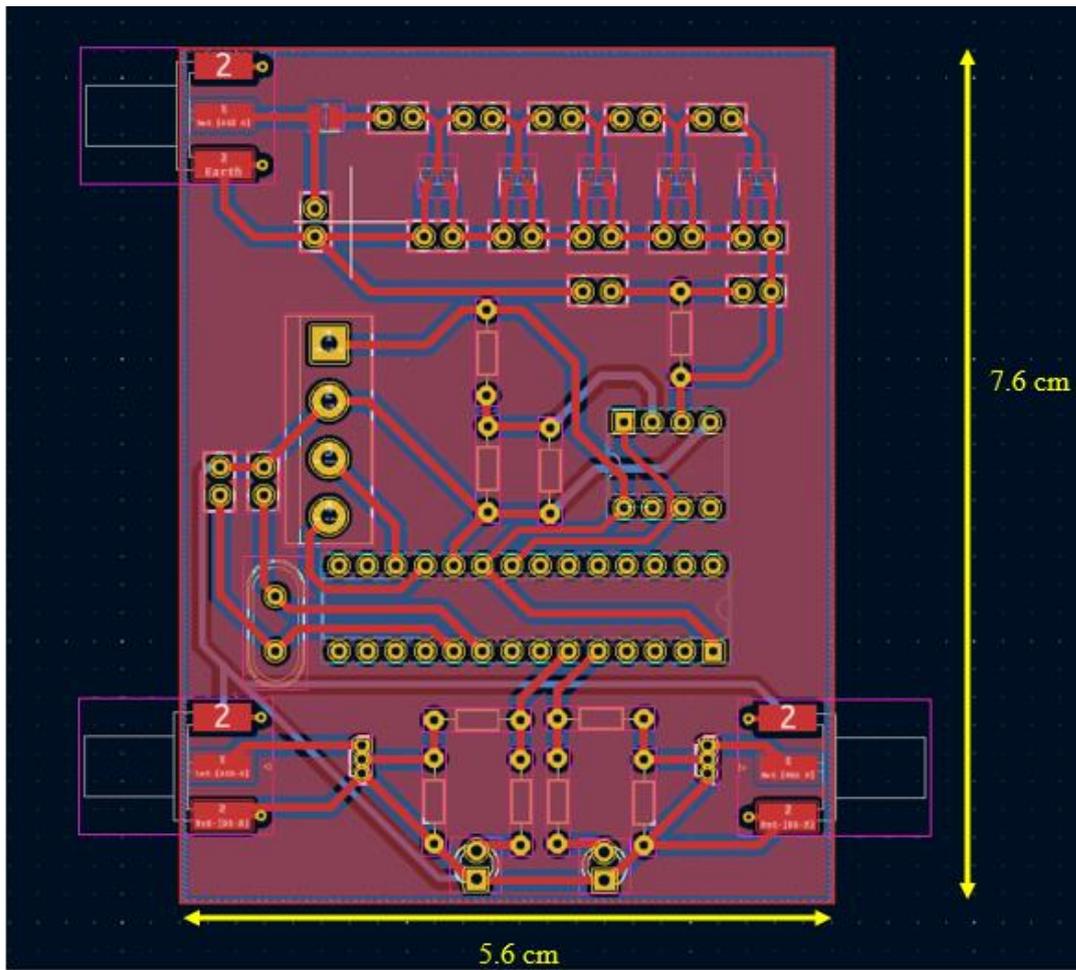


Fuente: Elaboración propia

### 3.2.3 Diseño de la PCB

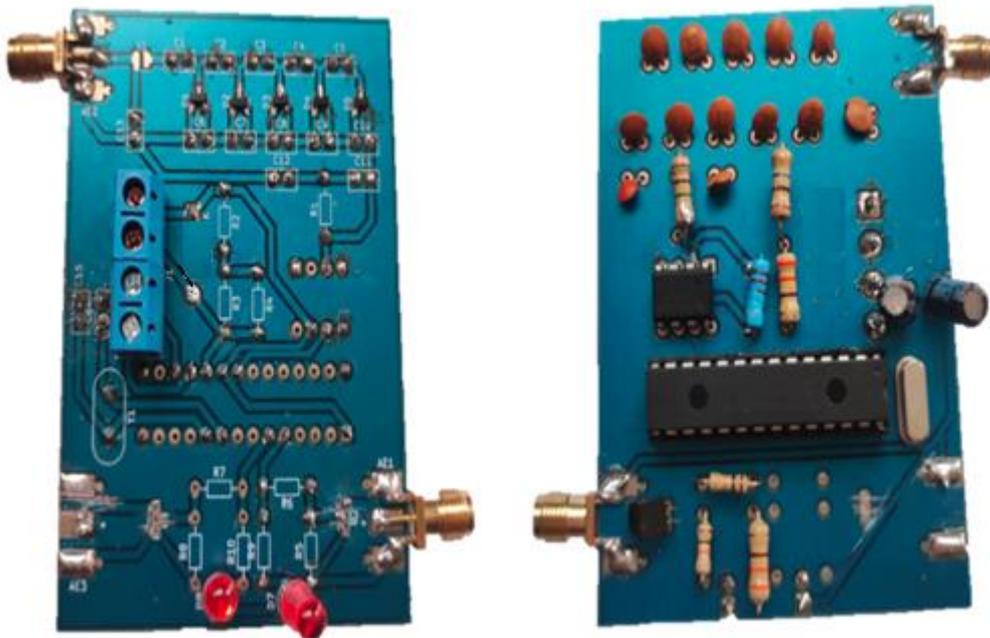
Luego de haber realizado los circuitos en la etapa a anterior se diseñó la placa PCB de doble cara en el programa KICAD como prototipo, luego se fabricó la placa en material FR-4 debido a que por característica tiene un funcionamiento correcto en sistemas de alta frecuencia. La medida de la PCB es de 7.6 cm de alto y 5.6 cm de ancho como se muestra en la Figura 22. Luego de la fabricación se procedió con el soldado de componentes como se observa en la Figura 23.

**Figura 22**  
*Diseño de la PCB en KICAD*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 23**  
*Placa PCB Soldada*



Fuente: Elaboración propia

### 3.2.4 Sistema de recepción

El nodo por retrodispersión propuesto ha sido implementado en un PCB, como siguiente paso se tuvo que buscar un dispositivo SDR para poder implementar el receptor y proceder con las pruebas de funcionamiento. El dispositivo empleado como receptor ha sido el RTL-SDR, el cual es mostrado en la Figura 24.

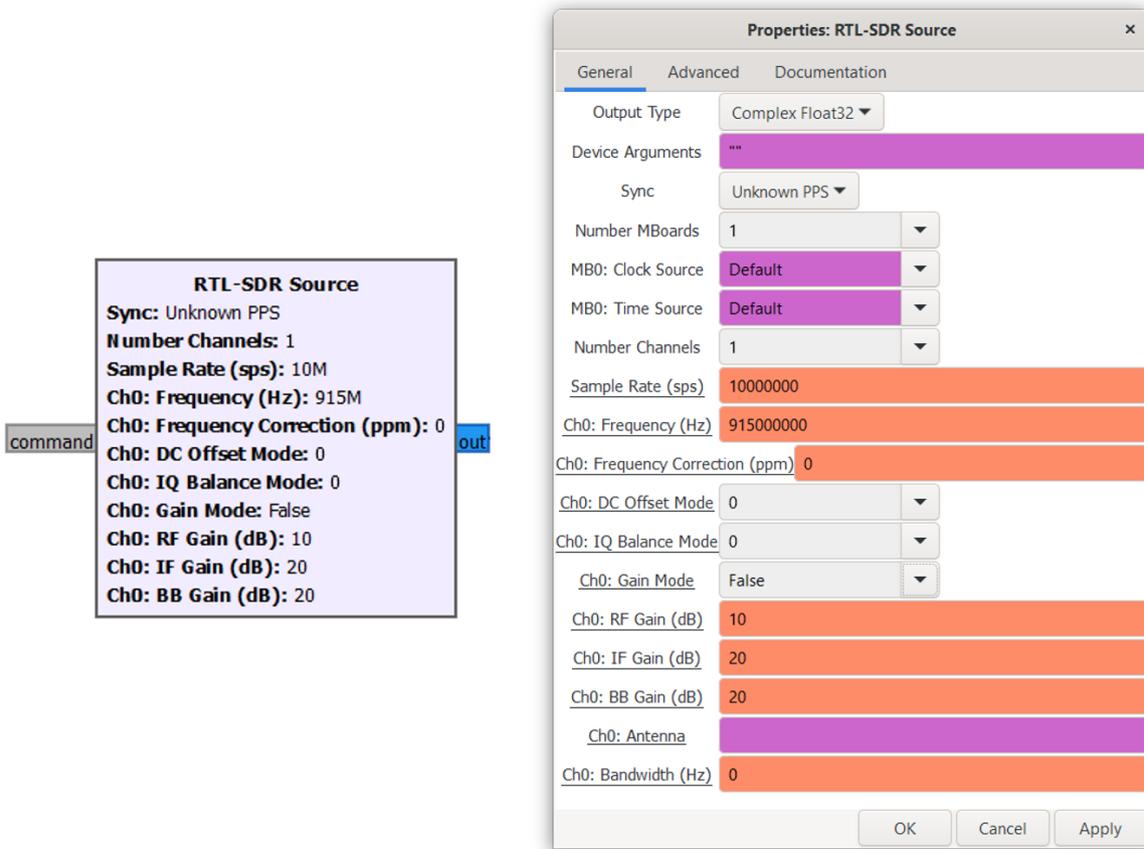
**Figura 24**  
*Dispositivo RTL-SDR*



Fuente: (RTL-SDR Blog V3 Datasheet, s/f)

El receptor ha sido manejado bajo la interfaz gráfica desarrollada en el software GNU Radio. El bloque para configurar a este dispositivo físico es denominado como “RTL-SDR Source” y sus parámetros se observan en la Figura 25, donde se establece valores como tasa de muestreo a 10Mps, frecuencia del oscilador a 915MHz y las ganancias.

**Figura 25**  
*Configuración Bloque RTL-SDR Source*



Fuente: Elaboración propia

En el dispositivo RTL-SDR se utilizó una antena de 915MHz de 3dBi, que se puede observar en la Figura 26.

**Figura 26**  
*Antena de Módulo RTL-SDR*



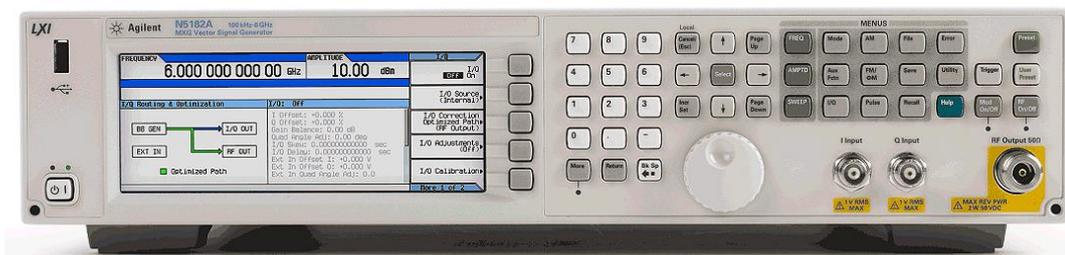
Fuente: Elaboración propia

### 3.2.5 Pruebas realizadas

Para realizar las pruebas del sistema de comunicación por retrodispersión que fueron planteadas en la sección 3.1.1, se inició con una prueba preliminar de un prototipo del sistema en una jaula de Faraday que se encuentra en las instalaciones de INICTEL-UNI. Para esto, se varió el esquema en cuanto a componentes ya que en lugar del PlutoSDR y amplificador se empleó un generador de señales. Por el lado del nodo por retrodispersión se implementó el circuito electrónico en un protoboard y al receptor se le conectó la antena presentada en la Figura 17. Este prototipo del sistema y las pruebas preliminares se realizó con la finalidad de tener unos primeros resultados e impresiones de su funcionamiento, para luego ser escalado al sistema planteado con ciertas variaciones.

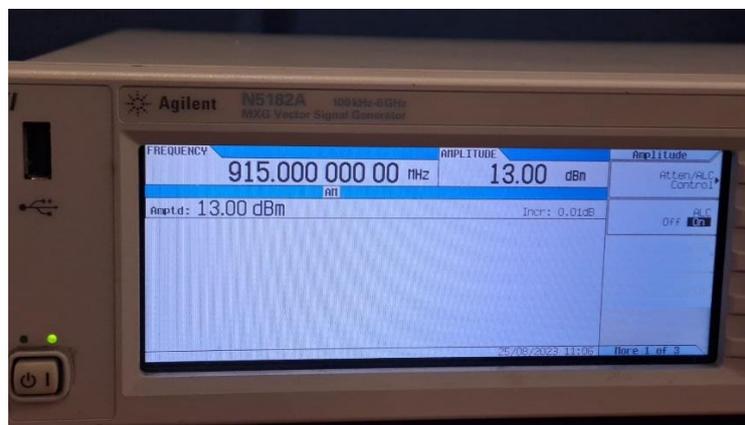
En el sistema de prueba se utilizó un generador de señales modelo N5182A de la marca Agilent, que se muestra en la Figura 27, para producir una onda portadora continua a 915MHz empleando una potencia de 13dBm tal como se observa en la Figura 28.

**Figura 27**  
*Generador de Señales Agilent N5182A*



Fuente: (Keysight/Agilent N5182A MXG Vector Signal Generator, s/f)

**Figura 28**  
*Parametrización de Onda Portadora*



Fuente: Elaboración propia

Para la transmisión de la onda se utilizó una antena periódica del modelo SAS-510-7 del fabricante A.H. Systems, Inc. que se muestra en la Figura 29.

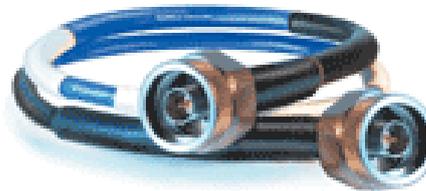
**Figura 29**  
*Antena Periódica SAS-510-7*



Fuente: (*SAS-510-7 Log Periodic Antenna / A.H. Systems, s/f*)

La antena se conecta al generador de señales mediante el cable CBL-1.5M-NMNM+ que se puede ver en la Figura 30.

**Figura 30**  
*Cable CBL-1.5M-NMNM+*



Fuente: (*Precision Test Cable, 18.0 GHz / CBL-1.5M-NMNM+ / Mini-Circuits, s/f*)

En la Figura 31 se puede observar la conexión entre el generador N5182A y la antena SAS-510-7 mediante en cable CBL-1.5M-NMNM+.

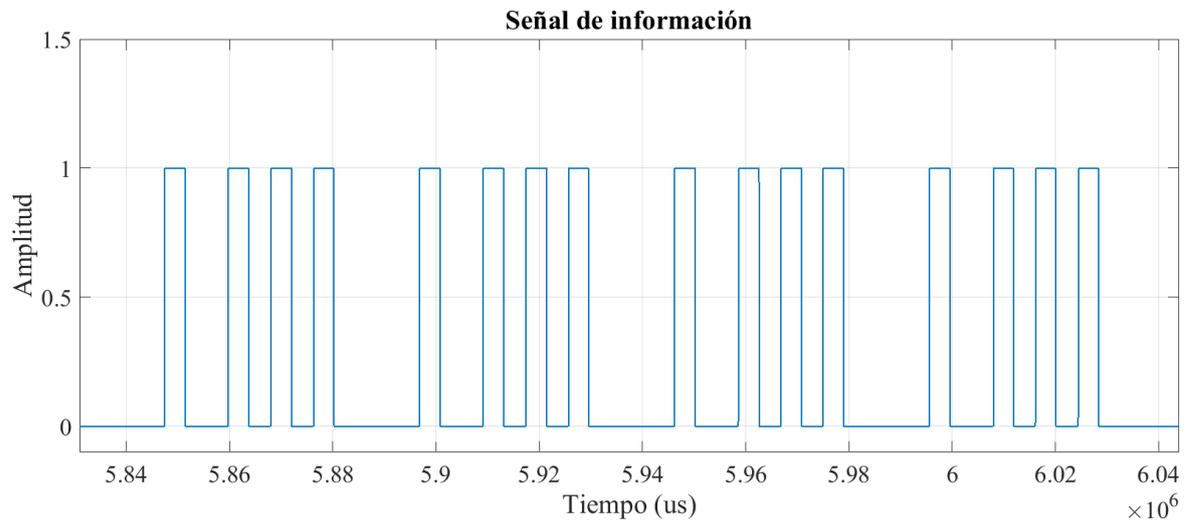
**Figura 31**  
*Conexión Entre Generador N5182A y Antena SAS-510-7*



Fuente: Elaboración propia

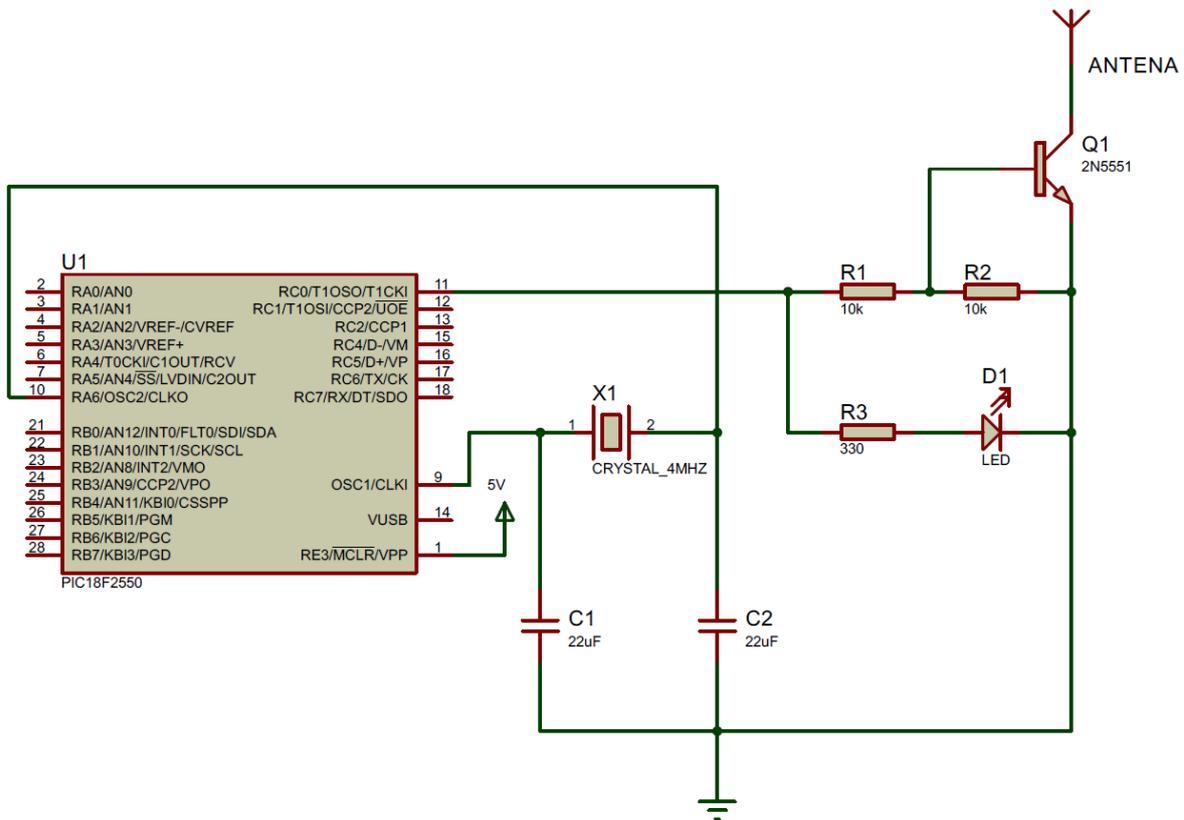
El nodo por retrodispersión utiliza un circuito integrado programable (o PIC de programmable integrated circuit) PIC18F2550 para generar la señal de información que se muestra en la Figura 32, la misma que es enviada a la base de un transistor 2N5551 de canal N el cual se conecta a la antena por medio del pin colector, como se mencionó anteriormente, para esta prueba el nodo fue implementado en un protoboard y el circuito electrónico se puede observar en la Figura 33.

**Figura 32**  
*Señal de Información del Nodo*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 33**  
*Circuito Electrónico de Nodo por Retrodispersión*



Fuente: Elaboración propia

El proceso de funcionamiento del nodo inicia cuando el transistor recibe la señal de información del PIC, éste trabaja como un switch ya que sólo tendrá dos estados, el primero es cuando el PIC recibe un valor “1” digital en donde cortocircuita al colector conectándolo al emisor, el mismo que está conectado a tierra, de esta manera durante la duración de ese estado el nodo no realiza retrodispersión de la señal portadora. El segundo estado es cuando el PIC recibe un valor “0” digital, en este caso el PIC no toma acción alguna y durante la duración de este estado realiza la retrodispersión de la señal, de esta manera se estaría modulando a la onda portadora empleando la modulación ASK del tipo On-Off. Entonces, debido al efecto inverso que realiza el transistor la señal observada en el receptor lucirá como la inversa de la señal de información.

El nodo por retrodispersión se colocó en la línea de vista entre la antena que transmite la onda portadora y la antena del receptor, el mismo que está conectado a una laptop por medio un puerto USB. La laptop empleada tiene el software GNU Radio Companion con una programación bajo una interfaz gráfica que permite ajustar los parámetros del

dispositivo SDR de acuerdo con el sistema, entre los principales parámetros se encuentran los señalados que en la Tabla 6.

**Tabla 6**

*Parámetros Principales de RTL-SDR en GNU Radio Companion*

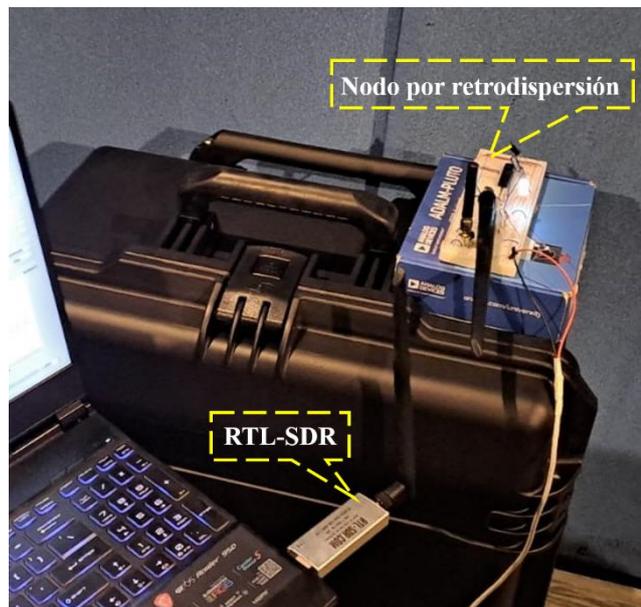
Parámetro	Unidad	Valor
Tasa de muestreo	sps	10M
Frecuencia	Hz	915M
RF Gain	dB	10

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 34 se muestra el dispositivo RTL-SDR conectado a la laptop y el nodo por retrodispersión.

**Figura 34**

*Dispositivo RTL-SDR y Nodo por Retrodispersión*



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, los componentes del sistema son ubicados en línea de vista en un entorno cerrado, que para este caso es una jaula de Faraday, y de esta manera reducir la probabilidad de recibir alguna interferencia externa. El sistema se muestra en la Figura 35.

### **Figura 35**

#### *Sistema de Comunicaciones por Retrodispersión en Jaula de Faraday*



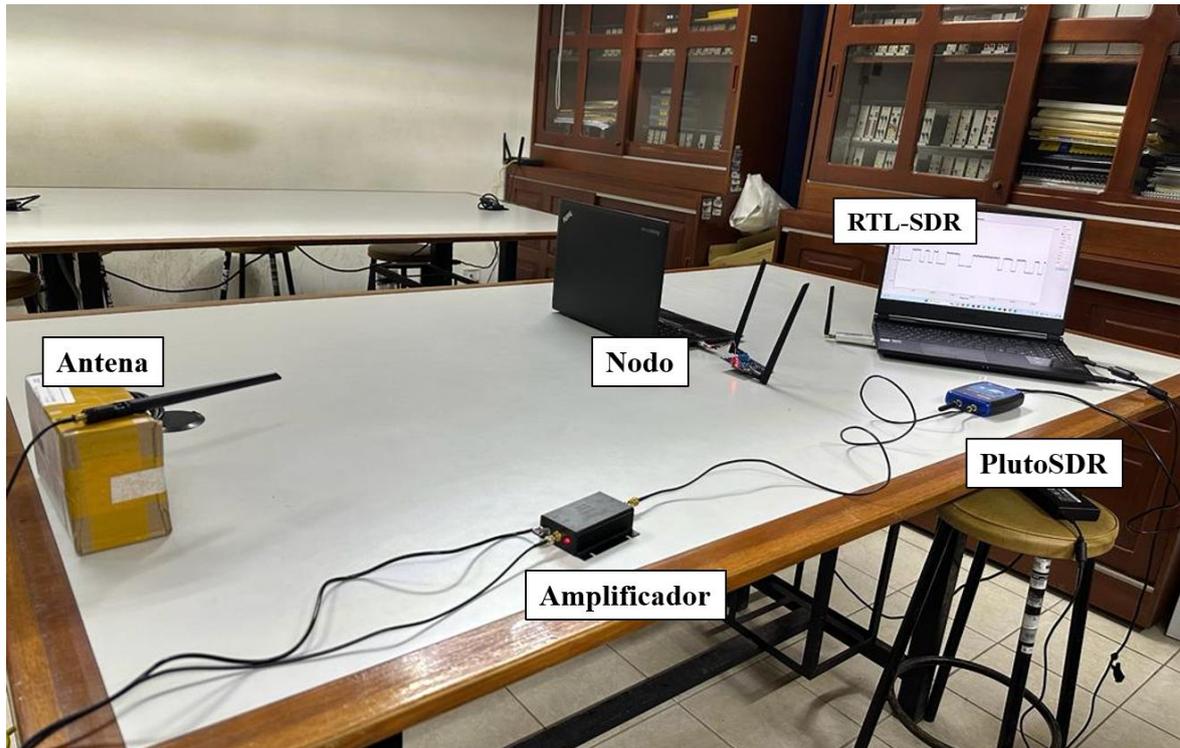
Fuente: Elaboración propia

Después de haber configurado y ubicado los elementos del sistema, ponemos en funcionamiento el generador de señales para empezar a transmitir la onda portadora y a la vez encendemos el nodo que contiene un led de color blanco el cual indica que el nodo está en funcionamiento. La onda portadora llega al nodo y éste la modula de acuerdo con la información enviada por el PIC, como se detalló anteriormente, para después reflejarla hacia el receptor. En el receptor se emplea un bloque denominado “Time Sink” que permite visualizar gráficamente la señal recibida en tiempo real, así también se emplea el bloque “File Sink” para almacenar la información en un archivo .dat y acceder al mismo posteriormente para su análisis.

Al término de las pruebas preliminares se procedió con el armado del sistema planteado en la metodología, en este caso los componentes fueron expuestos a un entorno libre y real tal como se muestra en la Figura 36.

**Figura 36**

*Sistema de Comunicaciones por Retrodispersión en Entorno Libre*



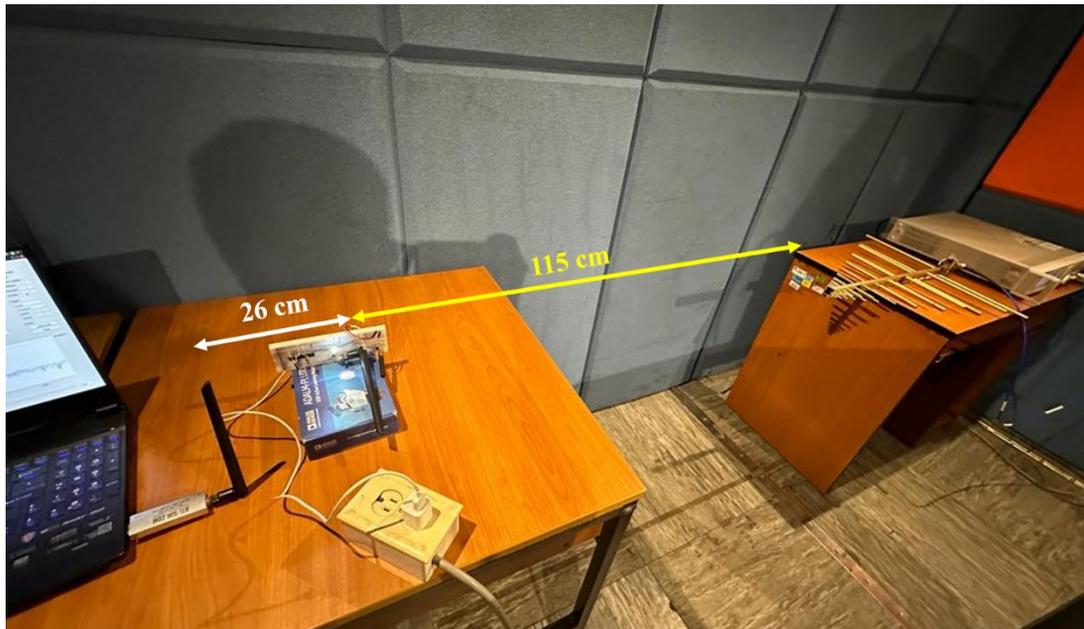
Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en la jaula de Faraday de INICTEL-UNI y en el entorno libre se mostrarán en la siguiente sección.

### **3.3 Resultados**

Para poder visualizar la señal esperada, en INICTEL-UNI, se tuvo que buscar la ubicación óptima entre los elementos del sistema, teniendo así el mejor resultado ubicando los elementos con las distancias que se detallan a continuación: antena transmisora de onda portadora hacia el nodo por retrodispersión igual a 115 cm y nodo por retrodispersión hacia receptor RTL-SDR igual a 26 cm. Para más detalle visualizar la Figura 37.

**Figura 37**  
*Distancias Entre los Componentes del Sistema*



Fuente: Elaboración propia

Como resultado de las distancias identificadas se muestra en la Figura 38 la señal recibida en la computadora la cual es graficada por la interfaz gráfica del receptor, coincidiendo con la señal esperada.

**Figura 38**  
*Señal Recibida por RTL-SDR en GNU Radio Companion*

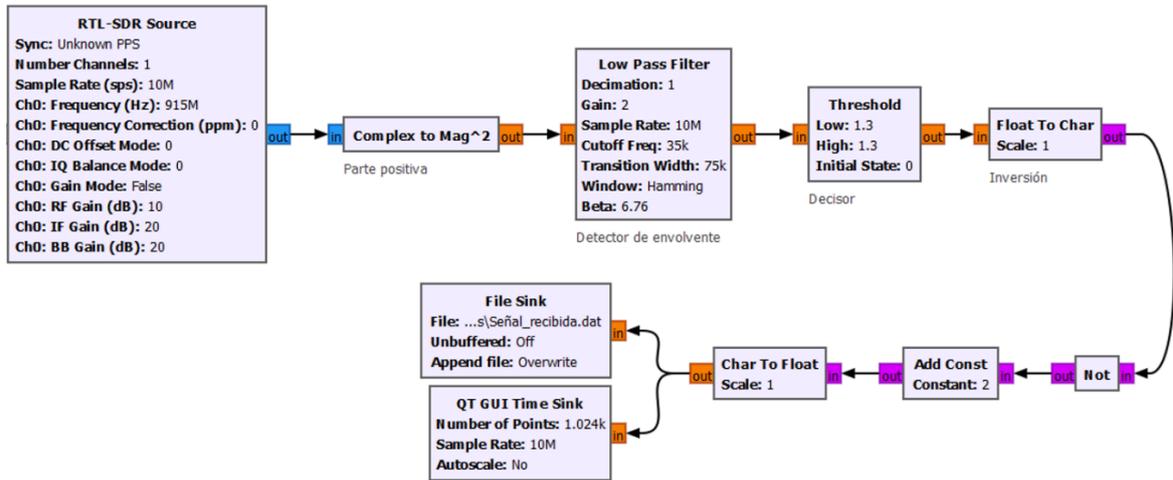


Fuente: Elaboración propia

En el entorno de GNU Radio Companion se realizó la programación por bloques que se muestra en la Figura 39, en donde se observa distintas etapas como: “Parte positiva”,

“Detector de envoltura”, “Decisor” e “Inversión”. Es en ese orden que se realiza la demodulación de la señal recibida y el procedimiento se explica a continuación.

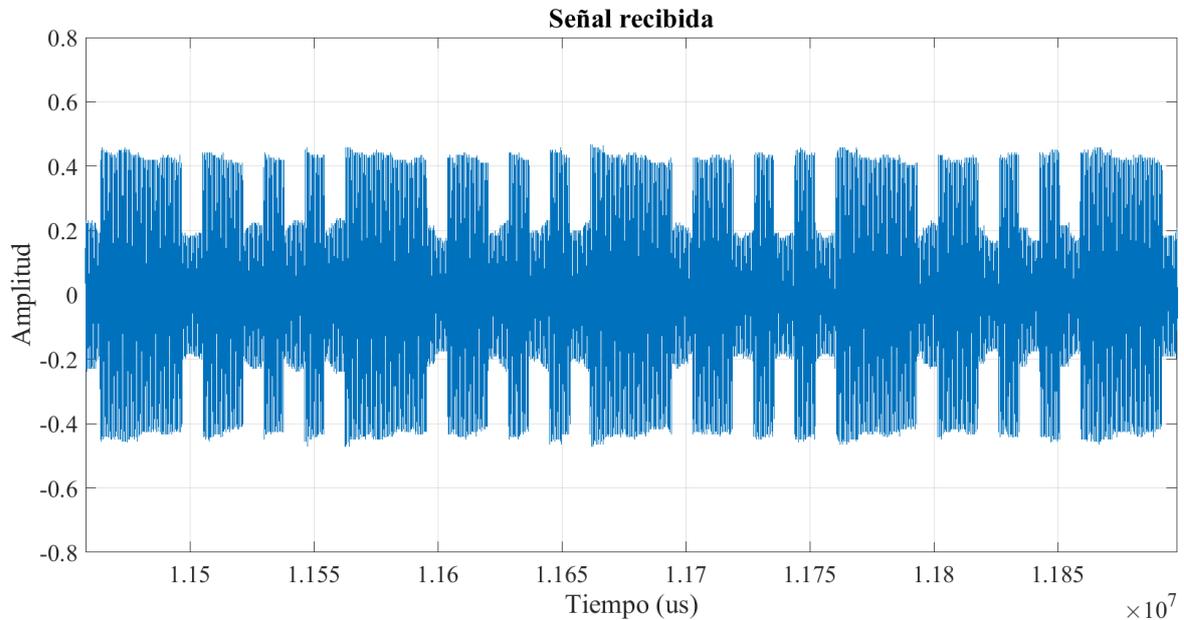
**Figura 39**  
*Esquema de Demodulación en GNU Radio Companion*



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 40 se puede observar la señal recibida, la misma que fue almacenada en un archivo de formato .dat y graficada en el software MATLAB.

**Figura 40**  
*Señal Recibida por RTL-SDR en MATLAB*

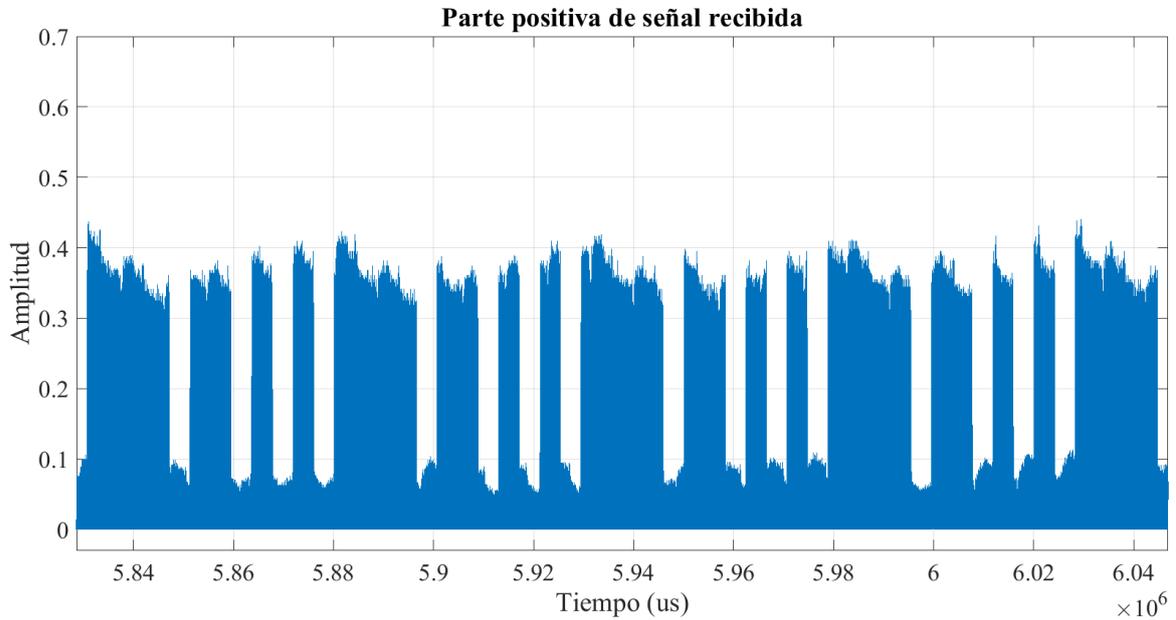


Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar la señal recibida tiene parte positiva y negativa, para iniciar con el proceso de demodulación se debe obtener la parte positiva, para ello utilizamos el

bloque “Complex to Mag<sup>2</sup>” de la interfaz gráfica de GNU Radio Companion, el resultado puede observarse en la Figura 41.

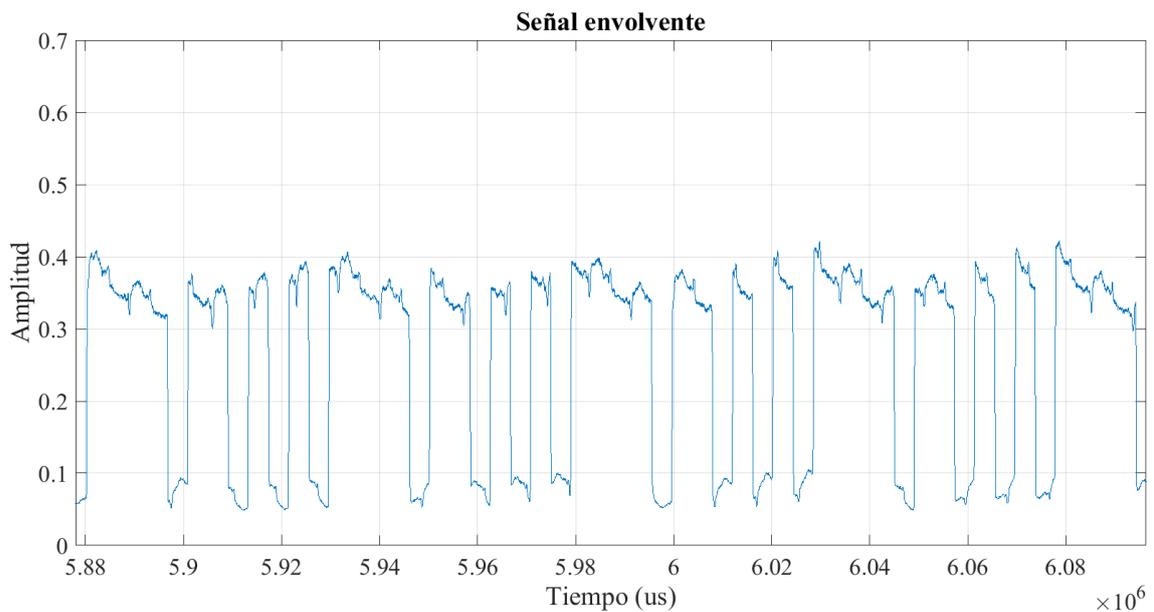
**Figura 41**  
*Parte Positiva de Señal Recibida*



Fuente: Elaboración propia

Como siguiente paso, se extrae la envolvente de la parte positiva de la señal recibida, para lo cual utilizamos el bloque “Low Pass Filter” y así obtenemos la señal de la Figura 42.

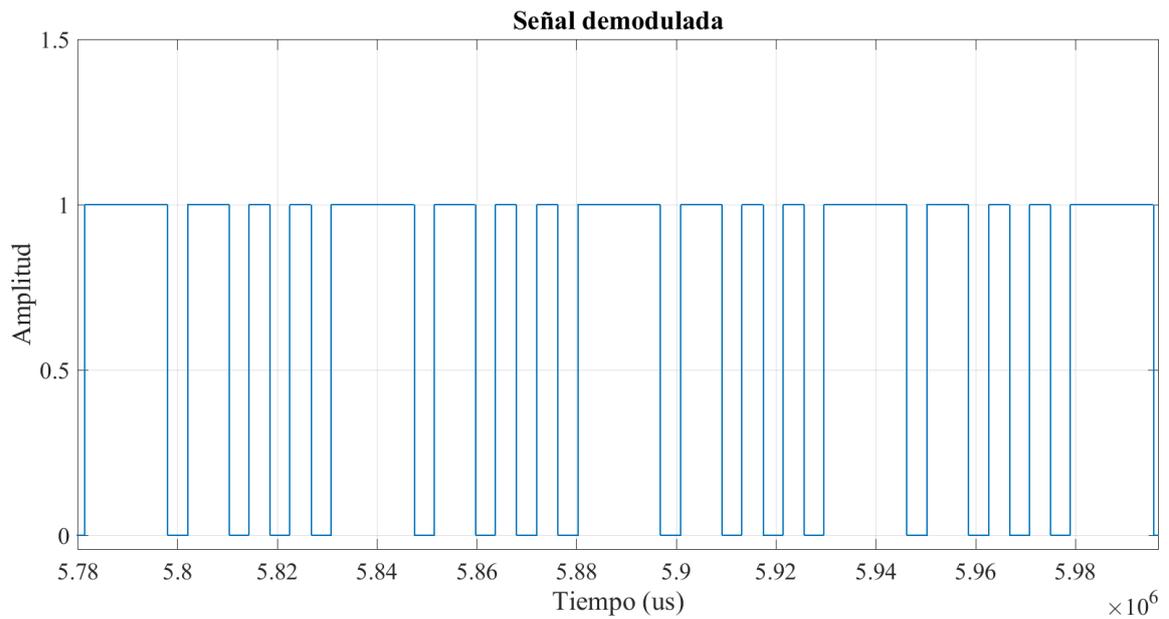
**Figura 42**  
*Señal Envolvente*



Fuente: Elaboración propia

Para demodular la señal envolvente de tal forma que se pueda obtener una señal de solo dos estados, utilizamos un bloque “Threshold” que cumple la función de decisor, para ello se elige un valor como umbral y establecer dos regiones de decisión, el valor de umbral para este caso es 0.2, de esta manera los valores de la señal que sean mayor a 0.2 serán 1 y los valores menores a 0.2 será 0, la señal resultante se observa en la Figura 43.

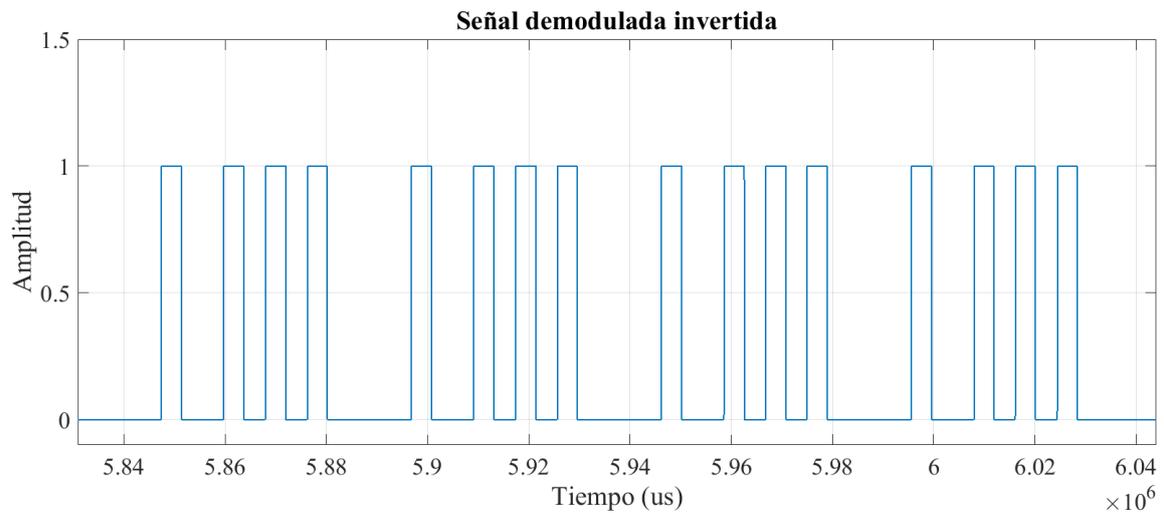
**Figura 43**  
*Señal Demodulada*



Fuente: Elaboración propia

Como se había mencionado anteriormente la señal recibida es la inversa a la señal de información del nodo, debido al efecto del transistor, por ello la señal demodulada pasa a ser invertida y de esta manera se obtiene la misma señal de información del nodo, tal como se muestra en la Figura 44.

**Figura 44**  
*Señal Demodulada Invertida*

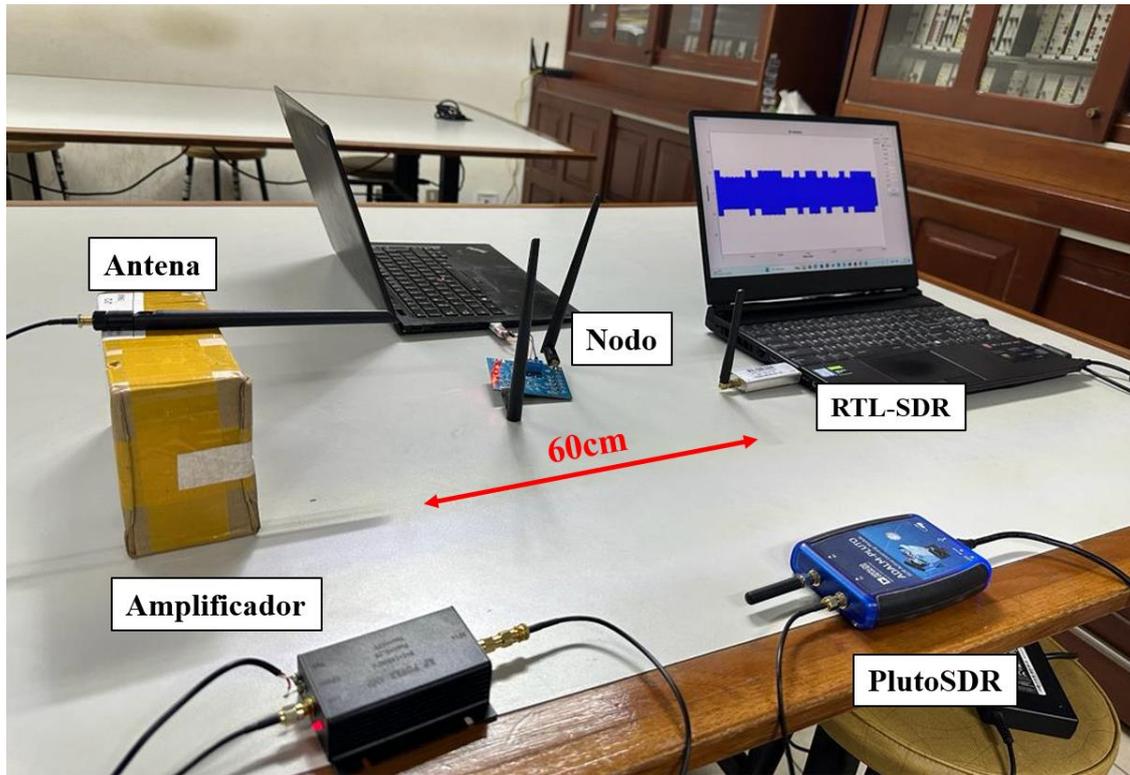


Fuente: Elaboración propia

Luego se realizó la prueba del sistema utilizando el diseño y componentes descritos inicialmente, en un ambiente como el laboratorio de telecomunicaciones de la UNTELS, que es un entorno más común a diferencia de una jaula de Faraday, y bajo estas condiciones verificar los resultados y desempeño.

Los dispositivos del sistema fueron situados de acuerdo con lo observado en la Figura 45, en donde se observa una distancia de 60cm entre la antena de transmisión de onda portadora y el módulo receptor RTL-SDR.

**Figura 45**  
*Sistema de Comunicaciones por Retrodispersión*

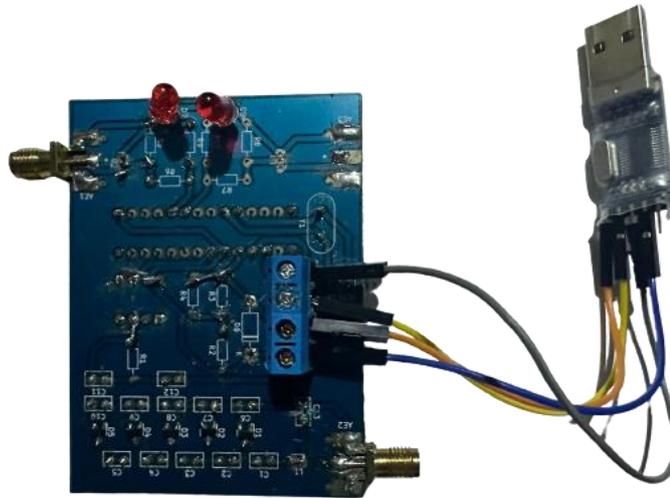


Fuente: Elaboración propia

En este sistema se puede observar que el nodo está conectado a una computadora mediante un módulo CP2102, este dispositivo permite comunicar al nodo, específicamente al PIC, con la computadora.

En la Figura 46 se muestra la conexión nodo a módulo CP2102, el módulo es un conversor de comunicación serial a USB, esto nos permite transferir y almacenar en la computadora la información generada por el PIC para posteriormente analizarla junto a la información demodulada por el receptor. El módulo tiene 5 pines, de los cuales se debe conectar el pin RXD con el pin TX del PIC y el pin TXD con el RX del PIC, además tiene un pin de 3.3V de salida, uno de 5V de salida y un pin de tierra.

**Figura 46**  
*Conexión Nodo-Módulo CP2102*



Fuente: Elaboración propia

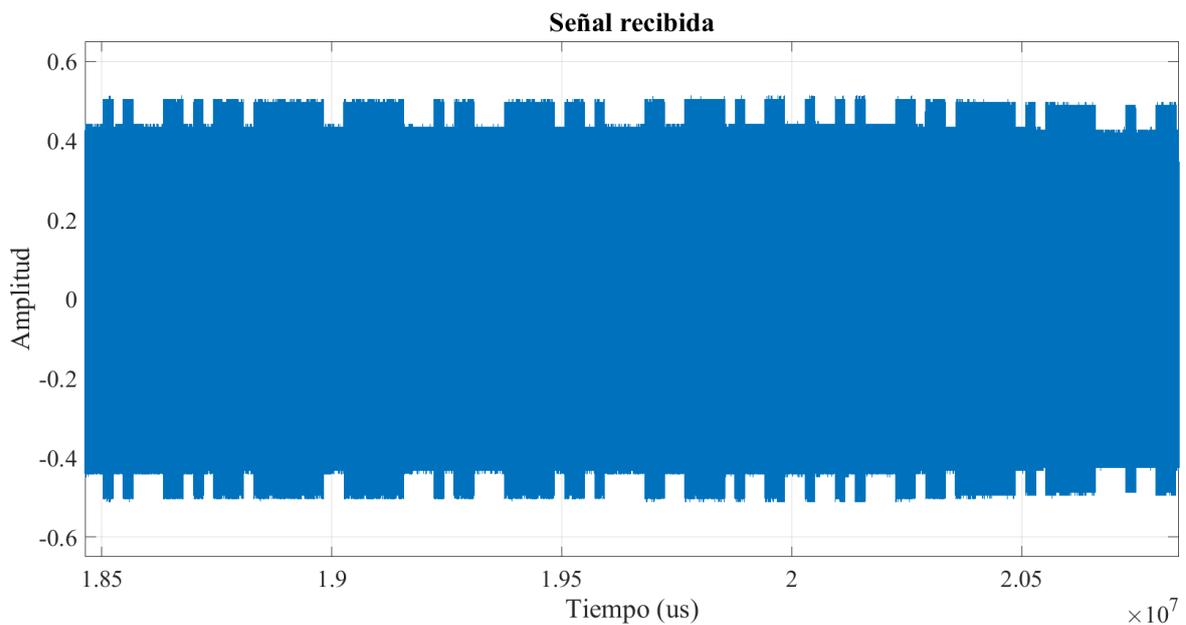
A diferencia de la prueba realizada con el prototipo del sistema, en esta prueba se programó al PIC para que envíe una información de tipo aleatoria de forma indefinida, con duración de un estado alto o bajo de 8ms, dejando de enviar información solo cuando el nodo se apague.

El funcionamiento del sistema inicia al transmitir la onda portadora de 915MHz a la salida del amplificador, esta señal es captada por el nodo el cual está equipado con dos antenas de 915MHz, una de las antenas se conecta con el detector RF interno y el mismo envía la señal al microcontrolador para generar una interrupción en el nodo que se encontraba en modo reposo y lo pone en modo activo corriendo la programación interna. La programación interna del nodo genera bits aleatorios indefinidos, el cual de acuerdo al valor, que puede ser 5V o 0V, controlará el acoplamiento de la segunda antena mediante el transistor conectado en emisor común. De esta manera, cuando la salida del PIC sea 5V la antena se cortocircuita, conectándose a tierra, y durante la duración de ese estado no se reflejará la señal portadora hacia el receptor. Cuando la salida del PIC sea 0V no se realiza algún cambio en la impedancia de la antena, por lo tanto la señal portadora es reflejada hacia el receptor durante ese periodo de tiempo. Es así entonces que entre estos cambios de estados y por lo tanto cambios entre retrodispersión y no retrodispersión, que se modula a la señal portadora con la información del nodo y es transmitida hacia el receptor.

En la Figura 47 se observa la señal recibida por el módulo RTL-SDR en donde se puede identificar, a primera vista, la recepción de una cierta información que por el modo de operación del nodo, es una señal inversa a la información generada por el PIC.

Además de ello se observa una magnitud entre -0.41 y 0.41, aproximadamente. Esta magnitud no forma parte de la señal transmitida por el nodo, pues es la señal constante que proviene desde el transmisor de onda portadora generada por el PlutoSDR. Tal como se puede observar en el esquema del sistema general presentado en la Figura 12, en el receptor se obtiene la suma de la señal de onda portadora constante y la señal transmitida por el nodo, esto es debido a que todo el sistema trabaja bajo la misma frecuencia.

**Figura 47**  
*Señal Recibida*

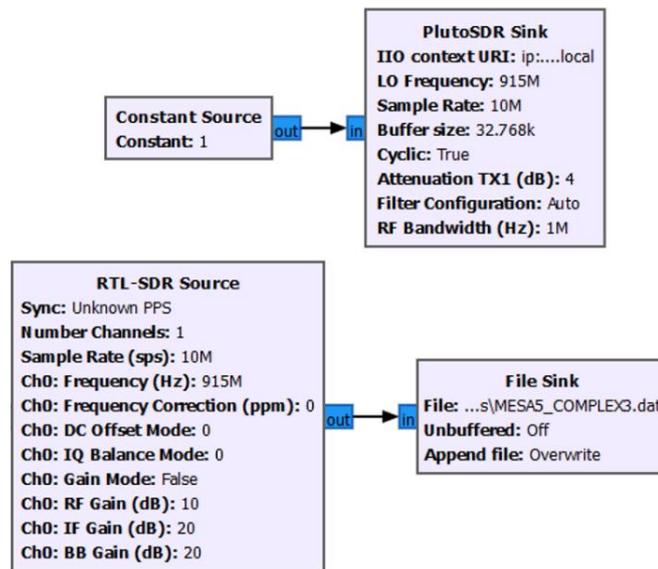


Fuente: Elaboración propia

La recepción de la señal se hace por medio del esquema en GNU Radio que se muestra en la Figura 48. Con este esquema se va a almacenar la información en un archivo de tipo .dat utilizando el bloque "File Sink", en donde se debe colocar la ruta para el almacenamiento del archivo.

**Figura 48**

*Almacenar Información Recibida en GNU Radio Companion*

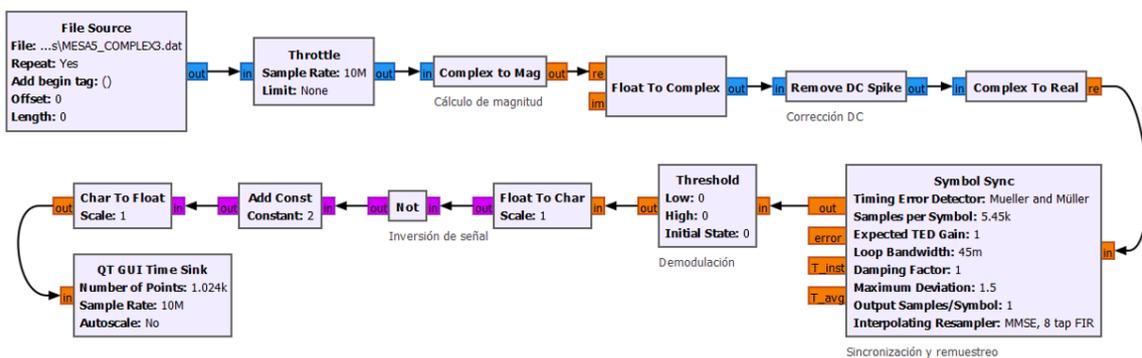


Fuente: Elaboración propia

Para demodular la señal recibida, se realizó una programación en la interfaz gráfica del receptor el cual se observa en la Figura 49.

**Figura 49**

*Demodulador Implementado en GNU Radio Companion*

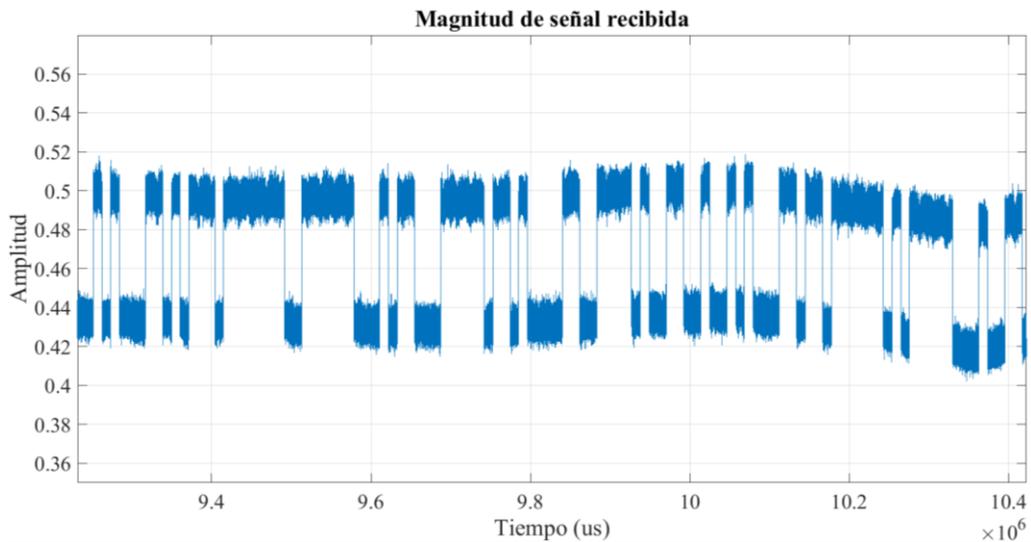


Fuente: Elaboración propia

El esquema que se presenta se realizó con la finalidad de obtener un señal la cual esté compuesta por una sola muestra de cada estado, por ello presenta algunas variaciones con respecto al esquema presentado en la Figura 39 debido a que se buscó una mejor precisión para la demodulación y el correcto downsampling (reducción de cantidad de muestras) de la señal para después realizar la comparación con la señal generada por el PIC.

En primer lugar se utiliza el bloque “File Source” para abrir el archivo grabado de la señal recibida, luego se conecta el bloque “Complex to Mag” para calcular la magnitud de dicha señal y así obtener la envolvente que se observa en la Figura 50.

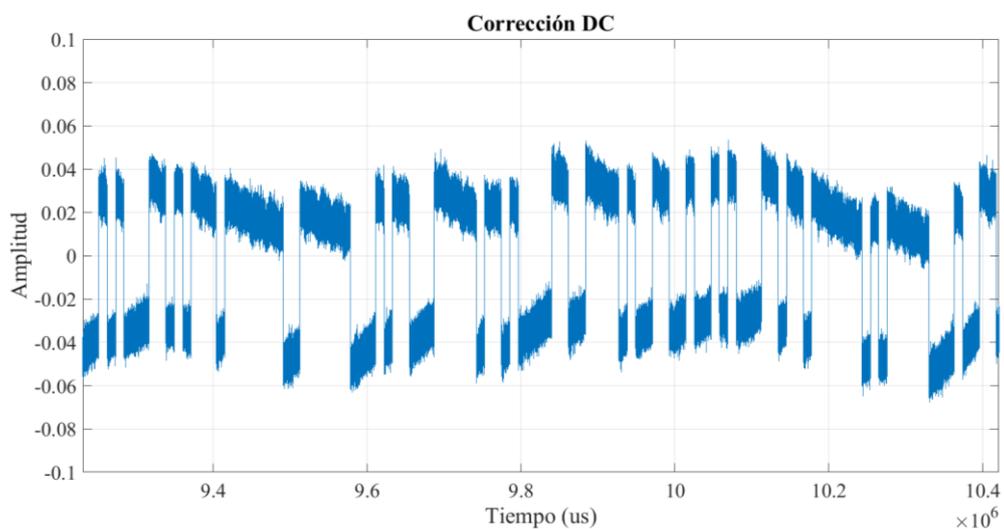
**Figura 50**  
*Magnitud de Señal Recibida*



Fuente: Elaboración propia

Debido a que la señal recibida es la suma de la onda portadora limpia y la señal transmitida por el nodo, teniendo así la componente DC distinta de cero, se utiliza el bloque “Remove DC Spike” para filtrar la señal portadora pura y obtener solo la señal transmitida por el nodo con la componente DC en cero, la cual se muestra en la Figura 51.

**Figura 51**  
*Señal con Componente DC en Cero*

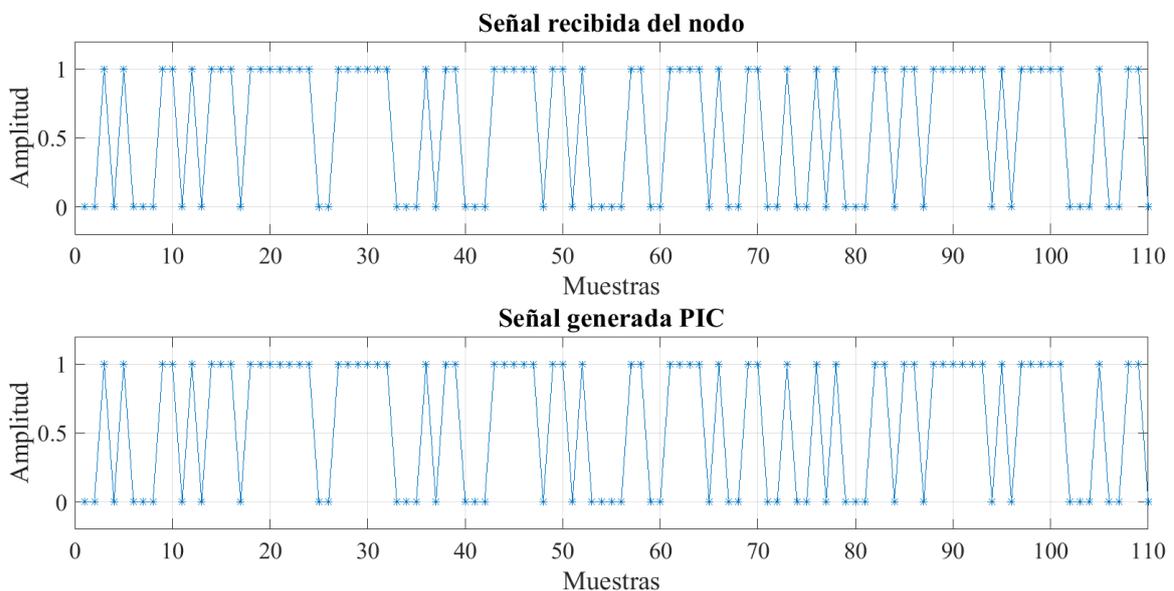


Fuente: Elaboración propia

Seguido a ello se emplea el bloque “Symbol Sync” para sincronizar y reducir la cantidad de muestras a 1 bit por estado, seguido a ello se conecta el bloque “Threshold” el cual se encargada de arrojar un bit de acuerdo a la magnitud recibida, dependiendo del umbral configurado, que en este caso es 0 debido a que en ese valor encontramos la componente DC o media de la señal. Finalmente debido a que la señal recibida es la inversa de la señal del PIC, se invierte la señal a la salida del decisor, con os bloques “Not” y “Add Const”.

En la Figura 52, se puede observar la señal demodulada y la señal aleatoria generada en el PIC, para la cual ambas son iguales.

**Figura 52**  
*Señal Recibida del Nodo y Generada en PIC*



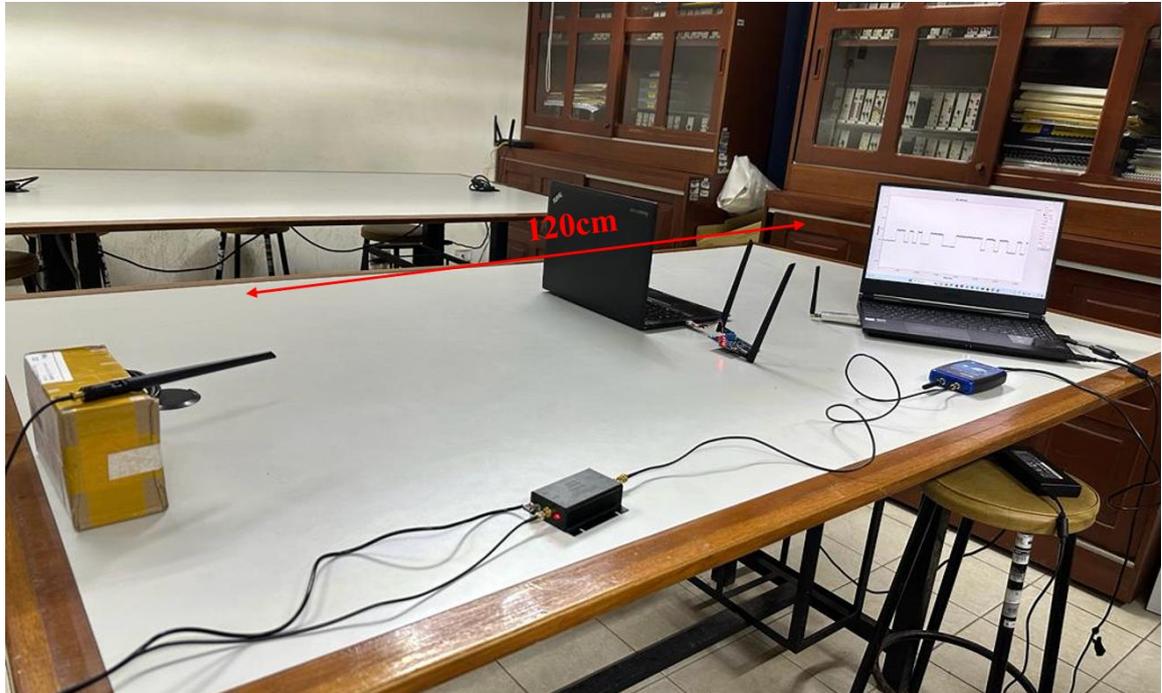
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, el sistema muestra un resultado óptimo, lo cual puede ser comprobado por la medida de la tasa de error de bits o BER (bit error rate), esta medida se obtiene dividiendo el número de bits errados entre el número de bits transmitidos, el mismo que para esta prueba da un valor de 0 debido a que toda la información fue recibida con éxito y no hubo bits errados en esta transmisión.

Sin embargo, existe una distancia en la cual la recepción es de menor calidad, esa distancia es de 120cm, en la Figura 53 se puede observar la distribución de los dispositivos que conforman el sistema a esa distancia y en la figura 54 la señal recibida después de ser

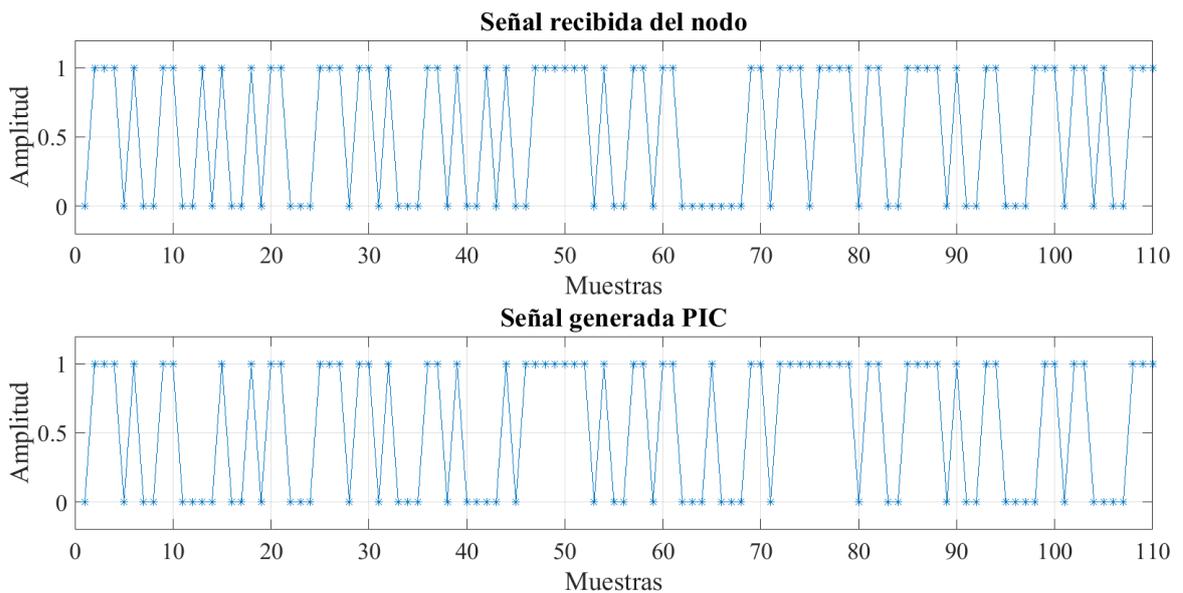
demodulada como la señal generada en el PIC. Distancias mayores a la señalada se reciben señales débiles y distorsionadas por el canal.

**Figura 53**  
*Máxima Distancia de Funcionamiento*



Fuente: Elaboración propia

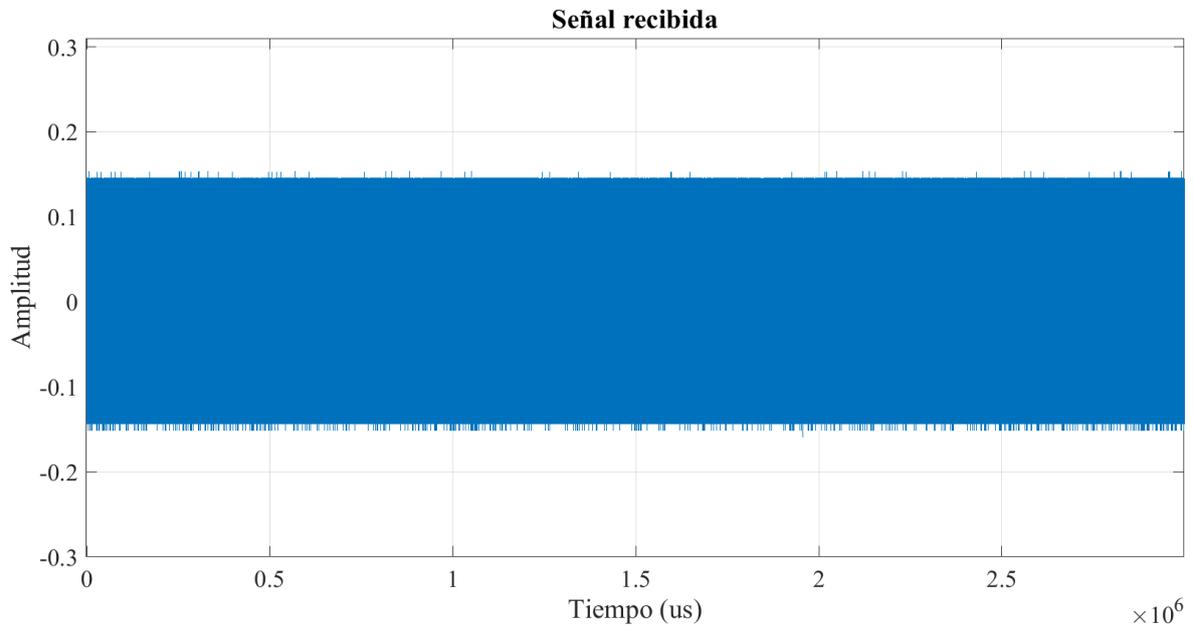
**Figura 54**  
*Señal Recibida en el Nodo y Generada en el PIC*



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 55 se muestra la señal recibida a 160cm de distancia entre la antena de transmisión de onda portadora y el módulo receptor RTL-SDR en donde solo se puede observar la señal portadora sin recibir la información del nodo.

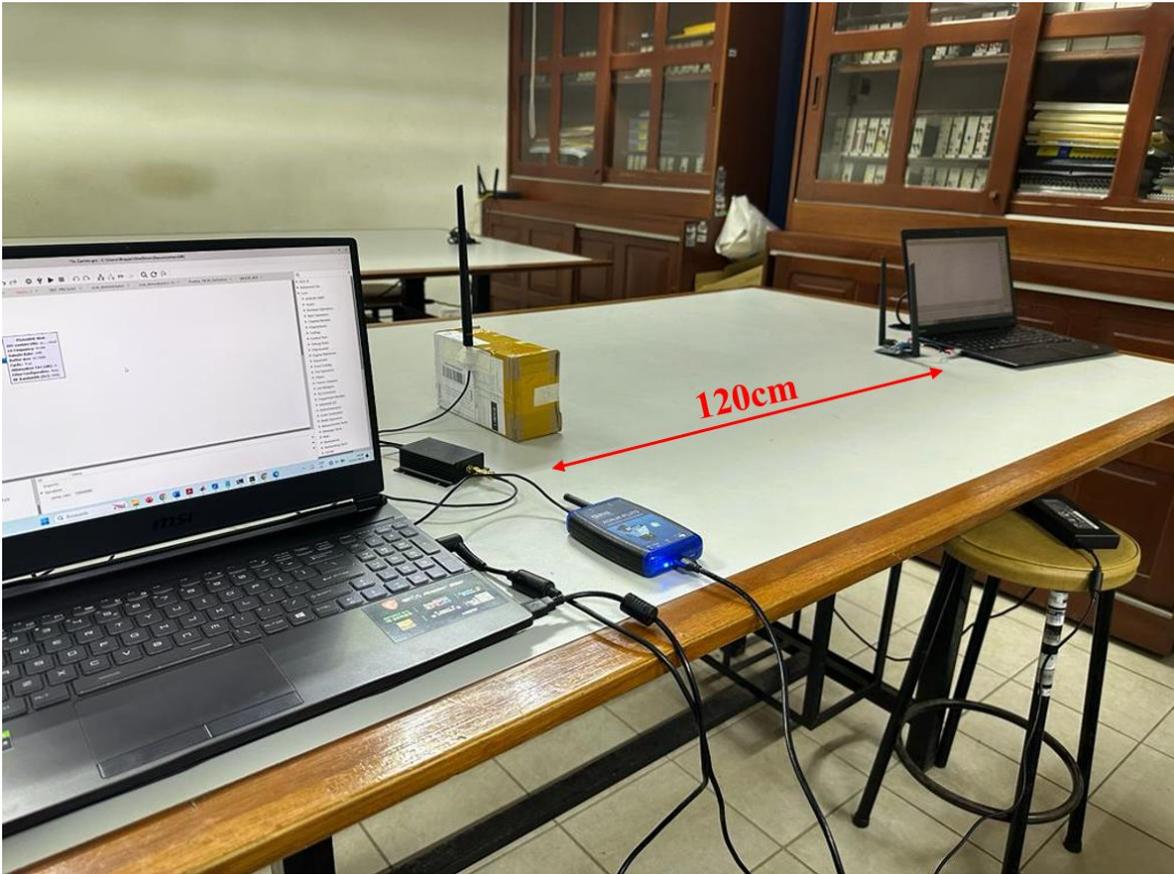
**Figura 55**  
*Señal Recibida a Distancia de 160cm*



Fuente: Elaboración propia

Con respecto al circuito detección de RF se realizaron pruebas con un amplificador en el transmisor para que la potencia que incide en la antena sea mayor y así obtener un voltaje de salida considerable. Como se muestra en la Figura 56 se estuvo variando las distancias entre el detector de RF y el transmisor de onda portadora para poder determinar cuál es la distancia máxima de operación de este circuito.

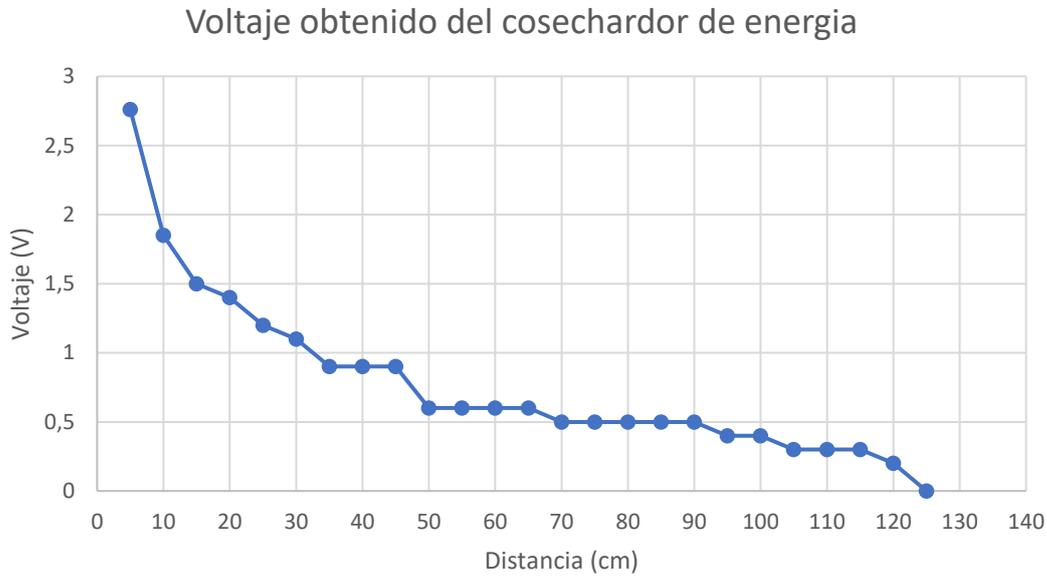
**Figura 56**  
*Pruebas Realizadas con el Detector RF*



Fuente: Elaboración propia

Los datos obtenidos en estas pruebas los podemos observar en la Figura 57. Según se representa en la gráfica el voltaje obtenido del cosechador de energía va disminuyendo, dependiendo de la distancia hasta un voltaje mínimo de 0.2V a 120cm.

**Figura 57**  
*Relación de Voltaje y Distancia*



Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos del cosechador de energía se puede calibrar el circuito comparador para hacer un balance entre el voltaje obtenido y el voltaje fijo determinado. Este voltaje fijo se determinó tomando en consideración los resultados obtenidos en la prueba anterior por lo que se consideró un voltaje fijo de 0.2 V.

#### IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La implementación del circuito de retrodispersión se implementó con componentes comerciales y según las pruebas realizadas se obtiene un correcto funcionamiento a la frecuencia indicada de 915 MHz la cual es reflejada por la antena realizando una modulación AM-2ASK. La secuencia de transmisión programada en el PIC se activa a una distancia de hasta 120cm, esto debido a la calibración implementada en el detector de RF.

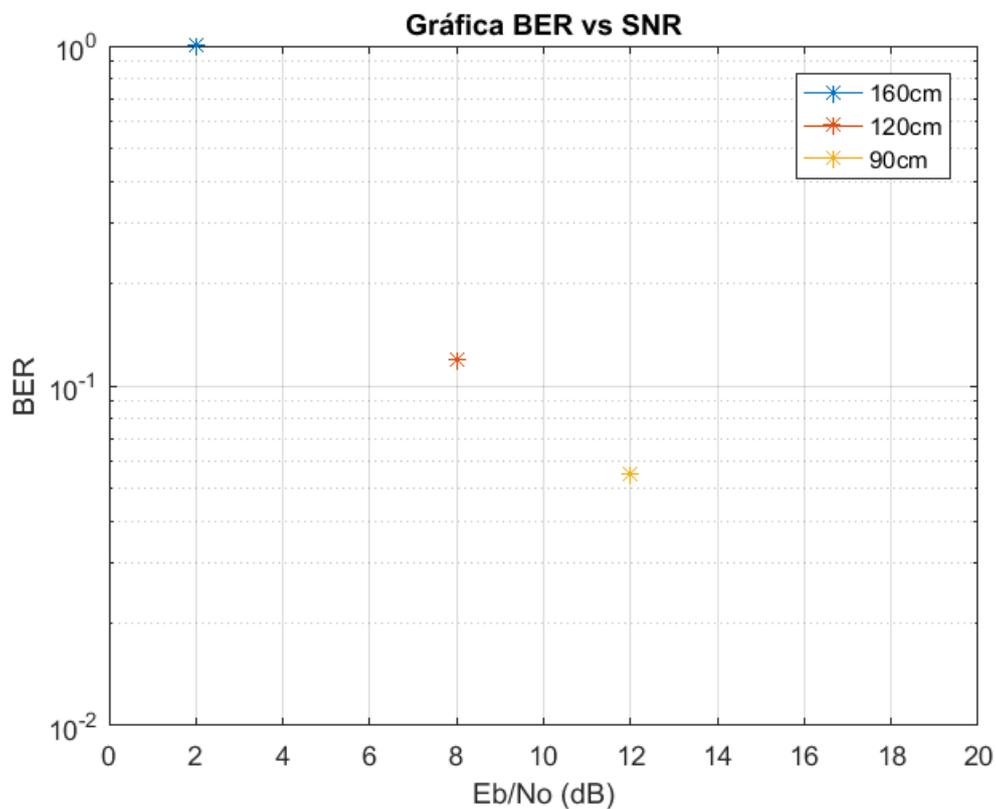
Se ha demostrado por medio del desarrollo de esta tesis que es posible implementar un sistema de comunicación inalámbrica sin necesidad de generar una onda de alta frecuencia en un nodo que contiene alguna información, sin embargo su limitante en distancia lo hace aplicable para monitorear variables dentro del rango de operación del sistema que son 120cm. Distancias mayores al rango establecido no reciben información transmitida por el nodo, por lo tanto la señal recibida es solo la onda portadora. En la Figura 58 se observa la gráfica BER vs la relación señal a ruido SNR (signal to noise ratio) considerando las distancias de 160cm, 120cm y 90cm. Para el cálculo del SNR se debe calcular dos

magnitudes: la energía de bit ( $E_b$ ) y la densidad espectral del ruido ( $N_0$ ). Para calcular  $E_b$  se debe hallar el promedio de la energía de la señal recibida y para calcular  $N_0$  se debe calcular la varianza ( $\sigma^2$ ) ya que  $N_0 = 2(\sigma^2)$ . Para realizar el cálculo de la varianza se debe utilizar la Ecuación 8.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}{N}, \quad (8)$$

Donde  $N$  es el número de muestras,  $x_i$  es un elemento del conjunto de datos y  $\bar{X}$  es la media del conjunto de muestras.

**Figura 58**  
Gráfica BER vs SNR



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se utilizaron 3 escenarios, en donde la distancia entre el transmisor de onda portadora y el receptor varían. El primer escenario es una distancia entre los elementos mencionados de 90cm, para lo cual se obtuvo un valor de SNR de 12dB y BER de 0.055. El segundo escenario es a una distancia de 120cm, con un valor de SNR de 8dB y BER de 0.12. El tercer escenario es a una distancia de 160cm, con un valor de SNR de 2dB y BER de 1, el cual indica que la información del nodo no se recibe a esa distancia. Con ello se puede verificar el rango de operación del sistema.

## V. CONCLUSIONES

- Como objetivo 1 en esta tesis se planteó generar una onda electromagnética a 915MHz para aplicaciones por retrodispersión, con las pruebas realizadas podemos validar que se logró generar la señal RF a la frecuencia indicada tal como se observa en el analizador de espectro .
- Como objetivo 2 en esta tesis se planteó diseñar e implementar un nodo de comunicaciones por retrodispersión empleando componentes comerciales. Según el diseño propuesto se logró implementar el nodo y se obtuvieron resultados óptimos en el desempeño del circuito.
- Las pruebas realizadas con el detector de RF fueron óptimas a una distancia máxima de 120 cm. Se tuvo que utilizar un amplificador de señal en el trasmisor de onda portadora para mejorar la obtención de voltaje del cosechador.
- Como objetivo 3 en esta tesis se planteó implementar un receptor para comunicaciones por retrodispersión empleando plataformas SDR, según las pruebas realizadas, el receptor tiene un funcionamiento correcto al demodular la señal.
- Se verificó el correcto funcionamiento del sistema de comunicaciones por retrodispersión, al obtener la señal transmitida por el nodo y así mismo realizar la medición del BER.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 915MHz Terminal Mount Dipole Antenna | Taoglas TI.92.2113.* (s/f). Recuperado el 13 de noviembre de 2023, de <https://www.taoglas.com/product/ti-92-2113-915mhz-terminal-mount-hinged-dipole-antenna/>
- ADALM-PLUTO Evaluation Board | Analog Devices.* (s/f). Recuperado el 13 de noviembre de 2023, de <https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/adalm-pluto.html>
- Akter, N., Hossain, B., Kabir, H., Bhuiyan, A. H., Yeasmin, M., & Sultana, S. (2014). Design and Performance Analysis of 10-Stage Voltage Doublers RF Energy Harvesting Circuit for Wireless Sensor Network. *Journal of Communications Engineering and Networks*, 84–91.  
[https://www.academia.edu/6960065/Design\\_and\\_Performance\\_Analysis\\_of\\_10\\_Stage\\_Voltage\\_Doublers\\_RF\\_Energy\\_Harvesting\\_Circuit\\_for\\_Wireless\\_Sensor\\_Network](https://www.academia.edu/6960065/Design_and_Performance_Analysis_of_10_Stage_Voltage_Doublers_RF_Energy_Harvesting_Circuit_for_Wireless_Sensor_Network)
- Al-Azawy, M. M., & Sari, F. (2019). Analysis of Dickson Voltage Multiplier for RF Energy Harvesting. *Proceedings - 2019 IEEE 1st Global Power, Energy and Communication Conference, GPECOM 2019*, 10–14. <https://doi.org/10.1109/GPECOM.2019.8778492>
- Collins, T. (2023). *GNU Radio and IIO Devices: gr-iio [Analog Devices Wiki]*.  
<https://wiki.analog.com/resources/tools-software/linux-software/gnuradio>
- Collins, T. F., Getz, R., Pu, D., & Wyglinski, A. M. (2018). *Software-defined radio for engineers.* 352. <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Software-Defined-Radio-for-Engineers-2018/SDR4Engineers.pdf>
- Daskalakis, S. N., Correia, R., Goussetis, G., Tentzeris, M. M., Carvalho, N. B., & Georgiadis, A. (2018). Four-PAM Modulation of Ambient FM Backscattering for Spectrally Efficient Low-Power Applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 66(12), 5909–5921.  
<https://doi.org/10.1109/TMTT.2018.2879105>
- Daskalakis, S. N., Goussetis, G., Assimonis, S. D., Tentzeris, M. M., & Georgiadis, A. (2018). A uW Backscatter-Morse-Leaf Sensor for Low-Power Agricultural Wireless Sensor Networks. *IEEE Sensors Journal*, 18(19), 7889–7898.  
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2861431>

- Daskalakis, S. N., Kimionis, J., Collado, A., Goussetis, G., Tentzeris, M. M., & Georgiadis, A. (2017). Ambient Backscatterers Using FM Broadcasting for Low Cost and Low Power Wireless Applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 65(12), 5251–5262. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2765635>
- De Jong Bsc, R. J. (2019). *Range characterization of backscatter wireless sensor networks*. [https://essay.utwente.nl/78854/1/Thesis Final.pdf](https://essay.utwente.nl/78854/1/Thesis%20Final.pdf)
- ITU-R. (2015). *Nomenclatura de las bandas de frecuencias y de las longitudes de onda empleadas en telecomunicaciones*. <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>
- Keysight/Agilent N5182A MXG Vector Signal Generator. (s/f). Recuperado el 5 de septiembre de 2023, de <https://avalontest.com/keysightagilent-n5182a-mxg-vector-signal-generator>
- Kim, Y. H., Yoon, C., Ahn, H. S., & Lim, S. O. (2019). Implementation of multi-level modulated-backscatter communication system using ambient wi-fi signal. *2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications, RFID-TA 2019*, 476–479. <https://doi.org/10.1109/RFID-TA.2019.8892246>
- López Alonso, C. (2019). *Diseño y validación de un sistema transceptor para la realización de ataques radio en bandas ISM sub-gigahercio* [Universidad politécnica de Madrid]. [https://oa.upm.es/56222/1/PFC\\_CRISTINA\\_LOPEZ\\_ALONSO\\_2019.pdf](https://oa.upm.es/56222/1/PFC_CRISTINA_LOPEZ_ALONSO_2019.pdf)
- Memon, M. L., Saxena, N., Roy, A., & Shin, D. R. (2019). Backscatter Communications: Inception of the Battery-Free Era—A Comprehensive Survey. *Electronics 2019, Vol. 8, Page 129*, 8(2), 129. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS8020129>
- Precision Test Cable, 18.0 GHz | CBL-1.5M-NMNM+ | Mini-Circuits. (s/f). Recuperado el 5 de septiembre de 2023, de <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=CBL-1.5M-NMNM%2B>
- RTL-SDR Blog V3 Datasheet. (s/f). Recuperado el 5 de septiembre de 2023, de [www.rtl-sdr.com/qsg](http://www.rtl-sdr.com/qsg)
- San Román Castillo, E., Castillo Aranibar, P., Sotomayor Polar, M., Gonzales Fuentes, L., & Zenteno Bolaños, E. (2018). *Teoría y Aplicaciones de Ingeniería de Microondas*. Universidad Católica San Pablo. <https://ucsp.edu.pe/teoria-y-aplicaciones-de>

ingenieria-de-microondas/

SAS-510-7 Log Periodic Antenna | A.H. Systems. (s/f). Recuperado el 5 de septiembre de 2023, de <https://www.ahsystems.com/catalog/SAS-510-7.php>

Shahabuddin, A. A., Shalu, P. D., & Akter, N. (2018). *Optimized Process Design of RF Energy Harvesting Circuit for Low Power Devices*.

Thomas, S. J., & Reynolds, M. S. (2012). A 96 Mbit/sec, 15.5 pJ/bit 16-QAM modulator for UHF backscatter communication. *2012 IEEE International Conference on RFID, RFID 2012*, 185–190. <https://doi.org/10.1109/RFID.2012.6193049>

Thomas, S. J., Wheeler, E., Teizer, J., & Reynolds, M. S. (2012). Quadrature amplitude modulated backscatter in passive and semipassive UHF RFID systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 60(4), 1175–1182. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2012.2185810>

Tomasi, W. (2001). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*.

Tountas, K. (2014). *Implementation of Frequency Division Multiple Access Digital Backscatter Sensor Network*.

Van Huynh, N., Hoang, D. T., Lu, X., Niyato, D., Wang, P., & Kim, D. I. (2018). Ambient backscatter communications: A contemporary survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 20(4), 2889–2922. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2841964>

Vena, A., Samat, N., Sorli, B., & Podlecki, J. (2021). Ultralow Power and Compact Backscatter Wireless Device and Its SDR-Based Reading System for Environment Monitoring in UHF Band. *IEEE Sensors Letters*, 5(5). <https://doi.org/10.1109/LSENS.2021.3074187>

## ANEXOS

### Anexo 1. Matriz de consistencia

**Título: “Diseño e implementación de un sistema de comunicaciones por retrodispersión empleando radio definida por software para aplicaciones de monitoreo inalámbrico”**

PROBLEMAS	OBJETIVOS	METODOLOGÍA
<p><b>Problema General</b></p> <p>¿Cómo diseñar e implementar un sistema de comunicaciones por retrodispersión empleando radio definida por software (SDR) para aplicaciones de monitoreo inalámbrico?</p> <p><b>Problema Específico 1</b></p> <p>¿Cómo generar una radiación electromagnética a 915 MHz para comunicaciones por retrodispersión?</p> <p><b>Problema Específico 2</b></p> <p>¿Cómo diseñar e implementar un nodo de comunicaciones por retrodispersión empleando componentes comerciales?</p>	<p><b>Objetivo General</b></p> <p>Diseñar e implementar un sistema de comunicaciones por retrodispersión empleando radio definida por software (SDR) para aplicaciones de monitoreo inalámbrico.</p> <p><b>Objetivo Específico 1</b></p> <p>Generar una radiación electromagnética a 915 MHz para comunicaciones por retrodispersión.</p> <p><b>Objetivo Específico 2</b></p> <p>Diseñar e implementar un nodo de comunicaciones por retrodispersión empleando componentes comerciales.</p>	<p><b>Tipo investigación</b></p> <p>Esta investigación es tipo de aplicada</p> <p><b>Diseño de investigación</b></p> <p>Diseño del sistema Implementación del sistema Prueba de funcionamiento del sistema</p>

<p><b>Problema Específico 3</b></p> <p>¿Cómo implementar un receptor para comunicaciones por retrodispersión empleando plataformas de SDR?</p> <p><b>Problema Específico 4</b></p> <p>¿Cómo verificar el correcto funcionamiento del sistema de comunicaciones por retrodispersión?</p>	<p><b>Objetivo Específico 3</b></p> <p>Implementar un receptor para comunicaciones por retrodispersión empleando plataformas de SDR.</p> <p><b>Objetivo Específico 4</b></p> <p>Verificar el correcto funcionamiento del sistema de comunicaciones por retrodispersión.</p>	
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

## Anexo 2. Glosario de términos

**Backscatter (Retrodispersión):** término que indica la reflexión de una onda incidente en una antena.

**SDR (Software Defined Radio):** dispositivo de radio utilizado en sistemas de comunicaciones que tiene la propiedad de cambiar sus características por medio de software.

**RF (Radiofrecuencia):** señales que se encuentran dentro del espectro electromagnético que se utilizan en telecomunicaciones.

**UHF (Ultra High Frequency):** define una banda del espectro electromagnético que comprende desde 300 MHz hasta 3 GHz.

**TDMA (Time Division Multiple Access):** técnica de modulación digital que designa un pequeño ancho de banda a cada usuario para permitir una conversación simultánea.

**PAM (Pulse Amplitude Modulation):** transmisión de data modulada por medio de la variación de amplitud de pulsos que puede ser voltaje o nivel de potencia.

**FSK (Frequency Shift Keying):** es un método de transmisión digital de datos por medio de cambios de frecuencia de la señal portadora para representar un bit 1 o 0.

**QAM (Quadrature Amplitude Modulation):** es un método de modulación en el que se utilizan dos señales para modular en amplitud dos portadoras que están en cuadratura (90 grados desfasadas entre sí). Las dos señales moduladas se combinan.

**MCU (Microcontroller unit):** término que hace referencia al microcontrolador embebido el cual quiere decir que se encuentra dentro de un circuito, tales como robots, máquinas, entre otros.

**IoT (Internet of things):** red de dispositivos conectados entre sí o a la nube para intercambiar datos.

**RFID (Radio Frequency Identification):** sistema de comunicación inalámbrica entre lector y receptor por radiofrecuencia para identificación de dispositivos.

**BER (Bit Error Rate):** medida que permite validar la fiabilidad de las señales de telecomunicaciones basado en cantidad o porcentaje de bits transmitidos que se reciben incorrectamente.

**SNR (Signal to Noise Ratio):** medida que indica la proporción entre la potencia de la señal recibida y la potencia del ruido.

### Anexo 3. Programación del microcontrolador para señal conocida

```
# #include <18F2550.h>
#FUSES HS,NOPROTECT,NOWDT,NOCPD,NOBROWNOUT,NOPUT,NOLVP
#use delay(clock=4MHz,crystal)

void main()
{
    set_tris_b(0x01);
    set_tris_a(0);
    set_tris_c(0);
    setup_comparator(NC_NC_NC_NC);
    setup_vref(FALSE);
    enable_interrupts(GLOBAL);      //Interrupciones habilitadas
    enable_interrupts(INT_EXT);
    ext_int_edge(L_TO_H);

    while(true){                  //Modo sleep

        output_c(0b0000000);
        output_b(0b0000000);
        output_a(0b0000000);
        sleep();
        delay_cycles(1);
    }
}

#INT_EXT

despierta(){                    //Modo activo
    set_tris_b(0x01);
    set_tris_a(0);
```

```

set_tris_c(0);
int32 i;
for(i=0;i<1000000;i++){           // Inicio de paquete
output_low (pin_a3);
delay_ms(2);
output_low (pin_a3);
delay_ms(2);
output_low (pin_a3);
delay_ms(2);
output_high (pin_a3);
delay_ms(2);
output_low(pin_a3);
delay_ms(2);
output_low (pin_a3);
delay_ms(2);
output_high (pin_a3);
delay_ms(2);
output_low(pin_a3);
delay_ms(2);
output_high (pin_a3);
delay_ms(2);
output_low(pin_a3);
delay_ms(2);
output_low(pin_a3);           // Fin de paquete
delay_ms(2);
}
return 0;
}

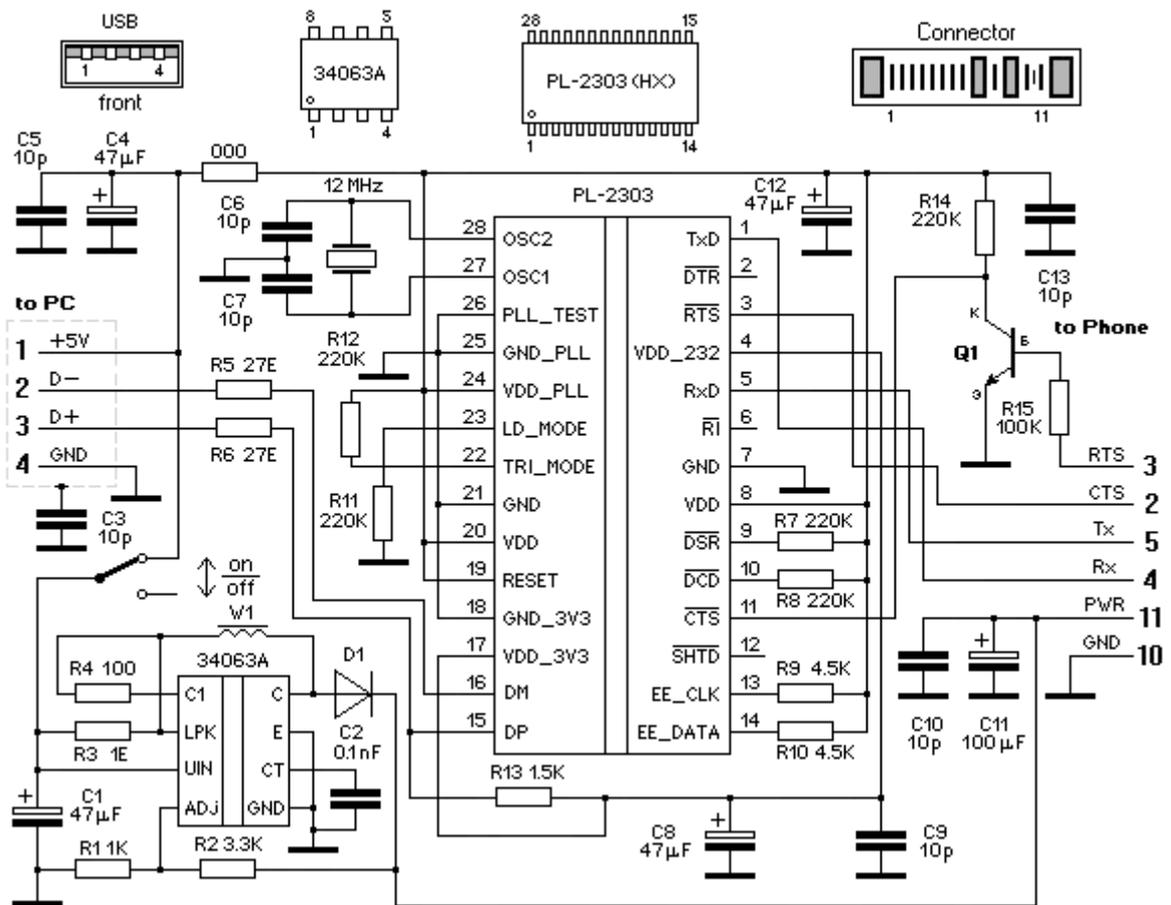
```



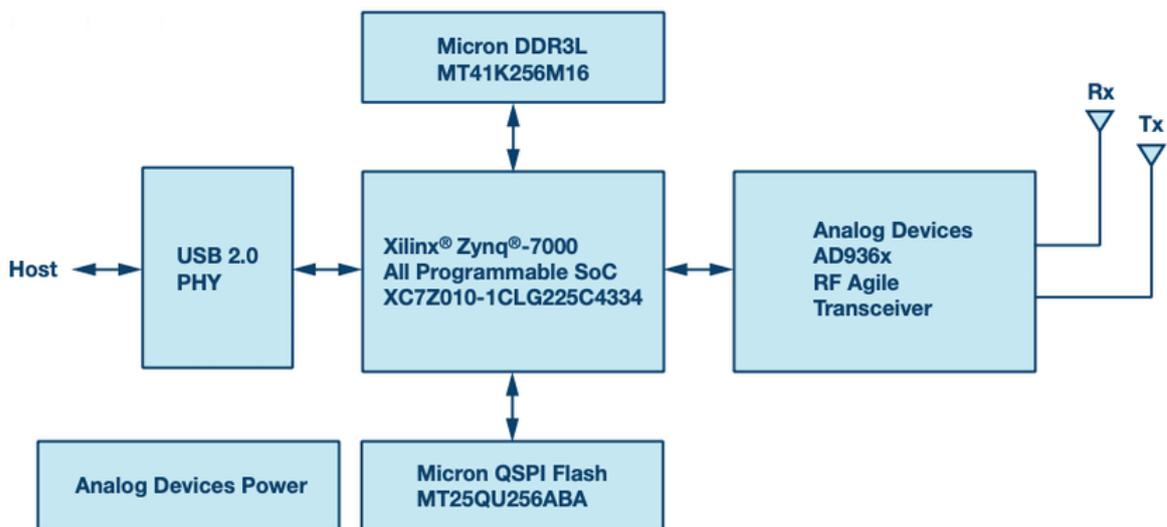
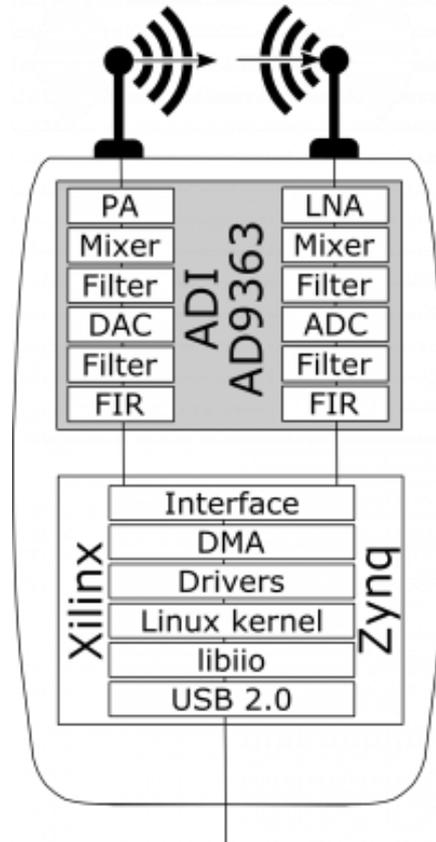
```
        printf("%d\n",vector[j]);
        delay_ms(2);
    }
while(true)
{
    n=rand()%2;
    for (i=0; i<1; i++)
    {
        output_bit(pin_a3,n);
        printf("%d\n",n);
        delay_ms(2);
    }
}
}
```

## Anexo 5. Hoja de datos del TTL-USB

### Data cable for T series



## Anexo 6. Composición interna de PlutoSDR



## Anexo 7. Composición interna de RTL-SDR

