



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Implementación de un sistema de clasificación inteligente mediante la transformación Wavelets utilizados en modulaciones digitales**

AUTOR:

Ing. Alvarado Pihuave, Xavier Alonso

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de

**MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**

TUTOR:

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

6 de Marzo del 2020



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster **Alvarado Pihuave, Xavier Alonso** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

---

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DEL PROGRAMA

---

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, 6 de marzo del 2020



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Alvarado Pihuave Xavier Alonso**

**DECLARÓ QUE:**

El trabajo de titulación: **“Implementación de un sistema de clasificación inteligente mediante la transformación Wavelets utilizados en modulaciones digitales”**, previa a la obtención del grado Académico de **Magíster en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del trabajo de titulación del Grado Académico en mención.

Guayaquil, 6 de marzo del 2020

EL AUTOR

---

Alvarado Pihuave, Xavier Alonso



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **Alvarado Pihuave, Xavier Alonso**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación de Maestría titulada: **“Implementación de un sistema de clasificación inteligente mediante la transformación Wavelets utilizados en modulaciones digitales”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 6 de marzo del 2020

EL AUTOR

---

Alvarado Pihuave, Xavier Alonso

# REPORTE DE URKUND

The screenshot shows the URKUND interface. On the left, document details are displayed: 'Documento: TT\_Aivarado\_HET.docx (D63386558)', 'Presentado: 2020-02-03 14:26 (-05:00)', 'Presentado por: fernandopr23@hotmail.com', 'Recibido: edwin.pasacios.ucsp@anayisis.arkund.com', and 'Mensaje: Revisión Aivarado. [Mostrar el mensaje completo](#)'. A yellow box highlights the text: '2% de estas 23 páginas, se componen de texto presente en 3 fuentes.' On the right, a 'Lista de fuentes' table is shown with columns 'Categoría' and 'Enlace/nombre de archivo'. The table lists several sources, including URLs from 'sites.roseje.com', 'docuaytr.es', and 'Escuela.egitecnica.delelectr'. At the bottom, there are navigation icons and a '1 Advertencia' warning.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA: Implementación de un sistema de clasificación inteligente mediante la transformación Wavelets utilizados en modulación digital

AUTOR: Ing. Aivarado Pihuave, Xavier Alonso

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de Magister en Telecomunicaciones

TUTOR: M. Sc. PASACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO

Guayaquil, Ecuador

20 de Noviembre del 2019

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magister Aivarado Pihuave, Xavier Alonso como requerimiento para la obtención del

## **Agradecimientos**

Agradezco a Dios, por darme la salud y bienestar.

A mi amada esposa, por ser mi compañera.

A mi hija Valita, por ser mi motor e impulso.

A mis padres, por guiarme en todo momento.

Alvarado Pihuave, Xavier Alonso

## **Dedicatoria**

A todos mis profesores y maestros de las épocas de primaria, secundaria y universitaria que dieron su grano de arena para formarme de manera académica y forjarme para la vida profesional.

A mi querida abuelita Hermelinda Luzuriaga, que espero me siga sonriendo desde el cielo.

Alvarado Pihuave, Xavier Alonso



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando**  
TUTOR

f. \_\_\_\_\_

**M. Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio**  
REVISOR

f. \_\_\_\_\_

**M. Sc. Zamora Cedeño, Néstor Armando**  
REVISOR

f. \_\_\_\_\_

**M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús**  
DIRECTOR DEL PROGRAMA

## ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1: Descripción del proyecto de intervención .....	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Antecedentes del problema a investigar. ....	3
1.3. Definición del problema. ....	3
1.4. Justificación del problema. ....	3
1.5. Objetivos. ....	4
1.5.1. Objetivo general.....	4
1.5.2. Objetivos específicos.....	4
1.6. Hipótesis.....	4
1.7. Metodología de investigación. ....	4
Capítulo 2: Fundamentación Teórica .....	6
2.1. Tipos de modulación. ....	6
2.2. Modulación de onda continua.....	6
2.2.1. Modulación de amplitud (AM). ....	7
2.2.1.1. Modulación de amplitud de portadora.....	8
2.2.1.2. Modulación de amplitud de doble banda lateral. ....	9
2.2.2. Modulación de frecuencia (FM). ....	9
2.2.3. Modulación de fase (PM).....	11
2.3. Modulación de pulsos o impulsos.....	11
2.3.1. Modulación de amplitud de pulso – PAM.....	12
2.3.2. Modulación de ancho de pulso – PWM. ....	12
2.3.3. Modulación de posición de pulso – PPM. ....	12
2.3.4. Modulación de código de pulso. ....	13
2.4. Técnicas de modulación digital. ....	13
2.4.1. Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK). ....	15
2.4.2. Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK). ....	16
2.4.3. Modulación por desplazamiento de fase (PSK). ....	19
2.4.4. Modulación por desplazamiento de fase binario (BPSK).....	20

2.4.5. Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK)	21
.....	21
CAPÍTULO 3: Desarrollo y Resultados obtenidos.....	24
3.1. Eliminación de características utilizando transformada de Wavelet. ...	24
3.1.1. Reconocimiento de patrones. ....	24
3.1.2. Formulación del problema de reconocimiento de patrones. ...	26
3.1.3. Sistemas de reconocimiento de patrones. ....	27
3.2. Componentes del sistema de reconocimiento de patrones .....	30
3.2.1. Preprocesamiento.....	31
3.2.2. Extracción de características.....	31
3.3. Transformada Wavelet .....	33
3.4. Desarrollo del reconocimiento de modulación digital basado en redes neuronales.....	35
3.5. Generación de señales de modulación digital. ....	36
3.5.1. Generación de señales 8-ASK. ....	36
3.5.2. Generación de señales 8-FSK.....	37
3.5.3. Generación de señales 8-PSK. ....	37
3.5.4. Generación de señales 8-QASK.....	38
3.6. Extracción de características.....	39
3.6.1. Algoritmo Genético .....	40
3.6.2. Transformada Wavelet .....	41
3.7. Clasificación .....	45
3.8. Discusión de los resultados experimentales.....	47
Conclusiones .....	49
Recomendaciones .....	50
Bibliografía .....	51

## Índice de Figuras

### Capítulo 2:

Figura 2. 1: Tipos de modulación analógica. ....	6
Figura 2. 2: Gráfica espectral de la modulación de frecuencia de banda estrecha. ....	10
Figura 2. 3: Gráfica espectral de la modulación de frecuencia de banda ancha. ....	11
Figura 2. 4: Tipos de modulación de pulso. ....	11
Figura 2. 5: Gráfica del esquema de modulación PAM utilizado en sistemas de comunicación de datos en modo serial. ....	12
Figura 2. 6: Gráfica del esquema de modulación PWM utilizado en sistemas de comunicación de datos en modo serial. ....	12
Figura 2. 7: Gráfica del esquema de modulación PPM utilizado en sistemas de comunicación de datos en modo serial. ....	13
Figura 2. 8: Gráfica del esquema de modulación PCM utilizado en sistemas de comunicación de datos en modo serial. ....	13
Figura 2. 9: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación digital utilizado en transmisiones digitales. ....	14
Figura 2. 10: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación digital utilizado en transmisiones de radio digitales. ....	14
Figura 2. 11: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación digital utilizado en transmisiones de radio digitales. ....	15
Figura 2. 12: Formas de ondas de la señal modulada por desplazamiento de amplitud (ASK).....	15
Figura 2. 13: Diagrama de bloques del modulador ASK. ....	16
Figura 2. 13: Diagrama de bloques del demodulador ASK. ....	16
Figura 2. 15: Formas de ondas de la señal modulada por desplazamiento de frecuencia (FSK).....	17
Figura 2. 16: Diagrama de bloques del transmisor FSK binario. ....	18

Figura 2. 17: Diagrama de bloques del demodulador FSK. ....	19
Figura 2. 18: Diagrama de bloques del transmisor PSK. ....	19
Figura 2. 19: Diagrama de bloques del demodulador PSK. ....	20
Figura 2. 20: Diagrama de bloques del demodulador BPSK. ....	21
Figura 2. 21: Diagrama de bloques del modulador QPSK. ....	22
Figura 2. 22: Diagrama de bloques del demodulador ASK. ....	23

### **Capítulo 3:**

Figura 3. 1: Estructura conceptual de reconocimiento de patrones. ....	25
Figura 3. 2: Vista general del diseño del reconocimiento de patrones. ....	26
Figura 3. 3: Vista del componente de la capa de red – módulo compuesto. ....	27
Figura 3. 4: Sistema de reconocimiento de patrones estructurales. ....	29
Figura 3. 5: Componentes del sistema de reconocimiento de patrones. ....	30
Figura 3. 6: Ejemplos de wavelets comúnmente utilizados. ....	34
Figura 3. 7: Diagrama de bloques de la transformada Wavelet. ....	34
Figura 3. 8: Diagrama de bloques de estructura de la transformada Wavelet con nivel $n=3$ . ....	35
Figura 3. 9: Ejemplo de una señal modulada para $M=8$ (8-ASK) con $F_c= 10$ Hz. ....	36
Figura 3. 10: Ejemplo ampliado de una señal modulada 8-ASK con $F_c= 10$ Hz. ....	36
Figura 3. 11: Ejemplo de una señal modulada para $M=8$ (8-FSK) con $F_c= 10$ Hz. ....	37
Figura 3. 12: Ejemplo ampliado de una señal modulada 8-FSK con $F_c= 10$ Hz. ....	37
Figura 3. 13: Ejemplo de una señal modulada para $M=8$ (8-PSK) con $F_c= 10$ Hz. ....	38
Figura 3. 14: Ejemplo ampliado de una señal modulada 8-PSK con $F_c= 10$ Hz. ....	38

Figura 3. 13: Ejemplo de una señal modulada para $M=8$ (8-QASK) con $F_c= 10$ Hz. ....	39
Figura 3. 14: Ejemplo ampliado de una señal modulada 8-QASK con $F_c= 10$ Hz. ....	39
Figura 3. 17: Comparativa del tráfico generado en cada isla para diferentes enfoques de multidifusión. ....	41
Figura 3. 18: Comparación del tráfico que cruza la red troncal para diferentes enfoques de multidifusión. ....	42
Figura 3. 19: Gráficas de las señales digitales 8-ASK utilizando wavelet. ....	42
Figura 3. 20: Gráficas de las señales digitales 8-FSK utilizando wavelet. ....	43
Figura 3. 21: Gráficas de las señales digitales 8-PSK utilizando wavelet. ....	43
Figura 3. 22: Gráficas de las señales digitales 8-QASK utilizando wavelet. ....	44
Figura 3. 23: Gráfica del logro de aprendizaje de la RNA. ....	46

## Índice de Tablas

### Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Estructura de RNA y parámetros de entrenamiento.....	45
Tabla 3. 2: Valores óptimos obtenidos mediante el uso del algoritmo y rendimiento de clasificación RNWAG. ....	47

## Resumen

El presente documento presenta el tema de titulación denominado “Implementación de un sistema de clasificación inteligente mediante la transformación Wavelets utilizados en modulaciones digitales” y en este se muestra los conocimientos adquiridos en la formación de máster. El proyecto tuvo complicaciones al inicio debido al desconocimiento de como emplear el método de la transformada Wavelet en MatLab, así como también, del reconocimiento de patrones sobre los esquemas de modulaciones digitales. Estos esquemas de modulación fueron abordados sin inconvenientes, pero se tenía que realizar el reconocimiento de patrones, así como también la extracción de características utilizando redes neuronales. Posteriormente se realiza la generación de las modulaciones por desplazamiento de amplitud (ASK), frecuencia (FSK) y fase (PSK). Las modulaciones analizadas para la clasificación inteligente fueron 8-ASK, 8-FSK, 8-PSK y 8-QASK, estas se extraen las características mediante algoritmos genéticos y transformada wavelet. Finalmente, se realiza la discusión de los resultados experimentales obtenidos.

**Palabras claves:** COMUNICACIONES, MODULACIÓN, DIGITALES, TRANSFORMADA, WAVELET, FRECUENCIA, FASE, AMPLITUD

## **Abstract**

This document presents the subject of qualification called “Implementation of an intelligent classification system by means of the Wavelets transformation used in digital modulations” and this shows the knowledge acquired in the master's training. The project had complications at the beginning due to the ignorance of how to use the Wavelet transform method in MatLab, as well as the recognition of patterns on digital modulation schemes. These modulation schemes were approached without inconvenience, but the pattern recognition had to be performed, as well as the extraction of features using neural networks. Subsequently, the generation of the amplitude displacement modulations (ASK), frequency (FSK) and phase (PSK) is performed. The modulations analyzed for the intelligent classification were 8 – ASK, 8 – FSK, 8 – PSK and 8 – QASK, these characteristics are extracted using genetic algorithms and transformed wavelet. Finally, the discussion of the experimental results obtained is carried out.

**Keywords:** COMMUNICATIONS, MODULATION, DIGITAL, TRANSFORMED, WAVELET, FREQUENCY, PHASE, AMPLITUDE

## Capítulo 1: Descripción del proyecto de intervención

### 1.1. Introducción

La comunicación es la transmisión, recepción y procesamiento de información a través de circuitos electrónicos. Un sistema de comunicación consta de tres partes básicas: transmisor, receptor y medio de transmisión. El entorno terrestre no es adecuado para transmitir la señal de información de baja frecuencia. Por lo tanto, en la comunicación por radio, las señales de baja frecuencia se transmiten superponiéndolas en señales de alta frecuencia. De esta manera, la transmisión de información (datos, voz, imágenes, entre otras) utiliza la señal portadora, lo que se denomina modulación. En otras palabras, la modulación significa cambiar el formato de las comunicaciones antes de que se entreguen al medio de transmisión.

La banda ocupada por las comunicaciones antes de la modulación se llama banda base y la banda ocupada después de la modulación se llama banda de paso. Hay dos razones principales para la modulación en los sistemas de comunicación electrónica:

- La transmisión directa de señales de comunicación causará grandes problemas de interferencia ya que generará ondas de radio aproximadamente a las mismas frecuencias.
- La mayoría de las señales de comunicación tienen frecuencias relativamente bajas. Por otro lado, para que las antenas funcionen eficientemente, sus dimensiones deben estar en el rango de longitud de onda. Por esta razón, si no se realiza la modulación, es necesario utilizar antenas extremadamente grandes.

Se necesitan dos señales para realizar el proceso de modulación; estas son señales de información y señal de portadora. La señal de información de baja frecuencia también se denomina modulación, moduladora, señal de modulación, señal a enviar, señal de baja frecuencia (*Low Frequency, LF*). La señal de portadora de alta frecuencia también se puede llamar señal de RF (radiofrecuencia) modulada, o señal de portadoras. La señal de modulación

de señalización es la señal de información, y la señal de modulación o modulación es la señal portadora.

## **1.2. Antecedentes del problema a investigar.**

En la actualidad las investigaciones en el área de comunicaciones digitales utilizan diversas herramientas de simulación, en especial mediante el método de wavelets a través de plataformas como MatLab y LabVIEW. Entre las cosas más interesantes que se hallaron en la búsqueda bibliográfica de la información de este tema, es que resulta ser prometedor utilizar funciones de paquetes de wavelet superpuestos eficientes de ancho de banda para la modulación.

También, se ha encontrado que la ortogonalidad de las wavelets puede explotarse para aumentar la eficiencia del ancho de banda. Dado que las funciones del paquete wavelet se superponen, una banda de protección que consiste en un prefijo cíclico no está disponible para las wavelets con un esquema multicanal. La ventaja de esto es la mayor eficiencia del ancho de banda a costa de una menor flexibilidad frente a la tolerancia al desvanecimiento por trayectos múltiples debido a la falta de un prefijo cíclico.

## **1.3. Definición del problema.**

Los esquemas de modulaciones digitales son muy utilizados en diferentes sistemas de comunicaciones y en los trabajos desarrollados en la maestría en Telecomunicaciones se encontraron que los proyectos no cuentan con una clasificación inteligente de que modulación sería la más eficiente. Por esto surge la necesidad de proponer la implementación de un sistema de clasificación inteligente mediante la transformación Wavelets utilizados en modulaciones digitales.

## **1.4. Justificación del problema.**

El análisis Wavelet ha disfrutado de una tremenda atención y éxito durante la última década, y por una buena razón. Casi todas las señales encontradas en la práctica requieren un análisis de frecuencia de tiempo, y las wavelets proporcionan un medio muy simple y eficiente para realizar dicho

análisis. Las áreas de aplicación de las wavelets han estado creciendo durante los últimos diez años a un ritmo muy rápido. No es posible revisarlos todos en un par de páginas.

## **1.5. Objetivos.**

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

Realizar la implementación de un sistema de clasificación inteligente mediante la transformación Wavelets utilizados en modulaciones digitales

### **1.5.2. Objetivos específicos.**

- ✓ Describir los fundamentos teóricos de los esquemas de modulación digital que se utilizan en redes de telecomunicaciones.
- ✓ Realizar la eliminación de características de reconocimiento de patrones utilizando la transformada de Wavelets.
- ✓ Aplicar la transformada de Wavelets para el reconocimiento de modulaciones digitales basados en redes neuronales.
- ✓ Analizar los resultados obtenidos de las generaciones de señales de modulación digital.

## **1.6. Hipótesis.**

Se desarrolla y presenta un esquema de identificación de modulación generalizada. Con la ayuda de este esquema, la clasificación de modulación automática y el reconocimiento de señales de comunicación inalámbrica con parámetros desconocidos a priori son posibles de manera efectiva. Las características especiales del procedimiento son la posibilidad de adaptarlo dinámicamente a casi todos los tipos de modulación y la capacidad de identificación.

## **1.7. Metodología de investigación.**

El presente trabajo de titulación utiliza un enfoque cuantitativo basado en el método empírico – analítico, y se emplea el diseño de investigación de manera descriptiva, exploratoria y de simulación. Estos diseños son de gran importancia para el desarrollo de la fundamentación teórica por eso es

descriptiva y exploratoria, y el uso de herramientas de simulación para el reconocimiento de patrones y emplear la transformada de Wavelets.

## Capítulo 2: Fundamentación Teórica

### 2.1. Tipos de modulación.

La elección del tipo de modulación es una de las primeras cosas que se debe hacer al diseñar un sistema de comunicación. Se debe hacer una selección apropiada considerando las diferentes características de los diferentes tipos de modulación. Varios tipos de modulación se pueden clasificar de diferentes maneras. Los tipos de modulación pueden clasificarse según la onda portadora y de la señal de información utilizada.

Como resultado de la clasificación según la onda portadora, se obtienen dos tipos de modulación. Estos tipos de modulación son modulación de onda continua y modulación de pulso. Y según la señal de información, los tipos de modulación se dividen en dos como analógico y digital.

### 2.2. Modulación de onda continua.

La modulación analógica es también conocida como modulación de onda continua. En este tipo de modulación, la señal portadora es una onda sinusoidal. Según Morales P. & Robalino B., (2013) los tipos de onda de modulación analógica se obtienen cambiando los parámetros de amplitud, frecuencia y fase de la onda portadora. A continuación, se expresa matemáticamente la ecuación de la modulación de onda continua,

$$C(t) = A \cos(\omega_o t + \varphi) \quad (2.1)$$

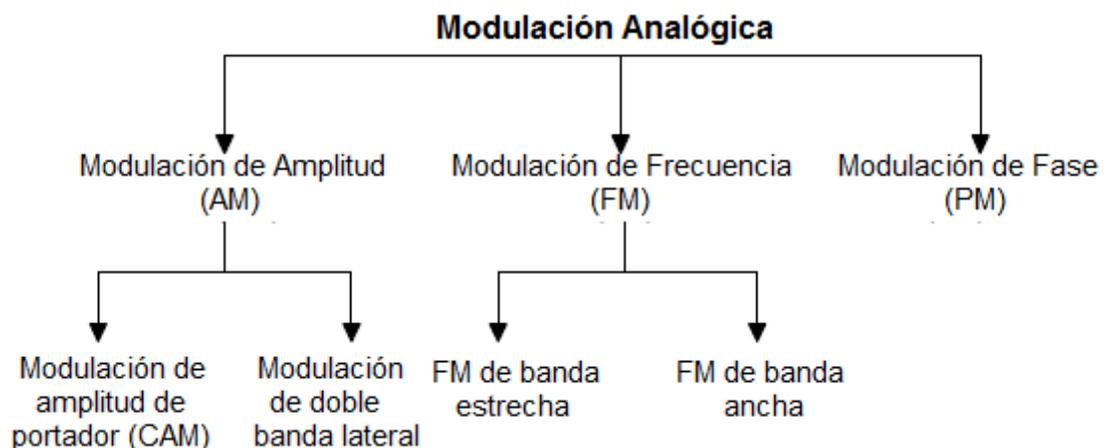


Figura 2. 1: Tipos de modulación analógica.

Fuente: (Tomasi, 2010)

Donde,  $A$  es la amplitud de la portadora,  $\omega_o$  es la frecuencia de la onda de la portadora, y  $\varphi$  es la fase de la portadora. En la figura 2.1 se muestran los diferentes tipos de modulación analógica.

### 2.2.1. Modulación de amplitud (AM).

La modulación de amplitud (*Amplitude Modulation, AM*) es el cambio de la amplitud de la señal portadora dependiendo de la señal de información. Según Choi & Liu, (2016) la modulación de amplitud es una modulación lineal. La forma general de la forma de onda modulada en amplitud es la siguiente,

$$C(t) = A(t) \cos(\omega_o t + \varphi) \quad (2.2)$$

Se obtienen diferentes formas de modulación de amplitud dependiendo de la relación entre la amplitud “ $A(t)$ ” y la señal de información modulada “ $f(t)$ ”. Aquí,  $f(t)$  indica la señal de modulación (señal de información) y  $\omega_o$  indica la frecuencia portadora. De acuerdo con Valero Jiménez, (2015) existen tres tipos de modulación de amplitud, que son:

- 1) Modulación de amplitud de portadora (Carrier Amplitude Modulation, CAM).
- 2) Modulación de amplitud de doble banda lateral (Double Sideband Amplitude Modulation, DSB-AM).
- 3) Modulación de amplitud de banda lateral única (Single Sideband Amplitude Modulation, SSB-AM).

La modulación de amplitud es más barata y sencilla en la transmisión de audio y video que otros tipos de modulación. La modulación de amplitud se utiliza en transmisores de onda larga y media en el mundo. Además, en la transmisión de televisión, la señal de video está sujeta a una modulación de amplitud negativa. La frecuencia de la señal de información es menor que la frecuencia de la señal portadora.

Una de las áreas de aplicación de la modulación de amplitud son los transmisores de radio de onda media y onda larga de alta potencia. Con la modulación de amplitud aplicada en transmisores de onda media y larga

producida en los últimos años, la eficiencia del transmisor puede aumentarse a más del 85%.

La modulación de amplitud da como resultado dos nuevas frecuencias. Estas dos nuevas frecuencias que ocurren por encima y por debajo de la frecuencia portadora se denominan bandas laterales. De estas bandas laterales, la frecuencia  $f_c + f_m$  se denomina banda lateral superior y se indica mediante BLS. La frecuencia  $f_c - f_m$  se denomina banda lateral inferior y está indicada por BLI. En la ecuación (2.3), se muestra la expresión matemática de los signos de BLS y BLI.

$$C(t) = A \cos \omega_o t + \frac{mA}{2} \cos(\omega_o - \omega_m)t + \frac{mA}{2} \cos(\omega_o + \omega_m)t \quad (2.3)$$

El área cubierta por la señal modulada en el espectro de frecuencia se denomina ancho de banda (Bandwidth, BW). La ecuación (2.4) del ancho de banda es,

$$BW = f_{BLS} - f_{BLI} = 2f_m \quad (2.4)$$

Como resultado del proceso de modulación, la cantidad de cambio en la amplitud de la señal portadora se denomina índice de modulación. El índice de modulación se indica como “m”. El índice de modulación es la relación entre la amplitud de la señal de información ( $E_m$ ) y la amplitud de la señal portadora ( $E_c$ ) (Ecuación 2.5):

$$m = \frac{E_m}{E_c} \quad (2.5)$$

### 2.2.1.1. Modulación de amplitud de portadora.

En este tipo de modulación de amplitud, la forma de onda modulada se expresa de la siguiente manera:

$$A(t) = [1 + mf(t)] \rightarrow C(t) = A[1 + mf(t)] \cos(\omega_0 t) \quad (2.6)$$

aquí;  $f(t)$  indica la señal de modulación (señal de información) y  $\omega_0$  indica la frecuencia portadora, m y A son constantes invariantes, m es el grado de modulación. En condiciones normales, estos parámetros deben cumplir algunas de las siguientes condiciones:

- 1) La frecuencia portadora  $\omega_0$  es el componente de frecuencia más grande de  $f(t)$  y mucho más grande que  $\omega_m$ . Si no se cumple esta condición, es decir,  $\omega_0 \gg \omega_m$ , la envolvente de la forma de onda modulada  $C(t)$  no se puede determinar con exactitud. Sin embargo, el concepto de envolvente es especialmente importante en este tipo de modulación. Los métodos de demodulación más comunes y fáciles utilizan el hecho de que la envolvente  $C(t)$  es similar a  $f(t)$ .
  - $A[1 + mf(t)] \rightarrow 1$  ilustra en términos de portadora. La constante  $A$  es la amplitud de esta portadora y no hay restricción en su valor.
  - $\varphi = 0$ , esta suposición no causa ningún problema, ya que el inicio del tiempo puede tomarse como se desee.
  
- 2)  $m$  es constante; grado de modulación (índice, porcentaje) y la limitación más importante en la modulación de amplitud de portadora ocurre para todos los valores de  $t$ .
  - $A[1 + mf(t)] \geq 0$  (o  $mf(t) \leq 1$ ), cuando se cumple esta condición, la envolvente del marcador modulado es similar al marcador modulado  $f(t)$ , pero el tamaño es diferente.
  - $0 < m \leq 1$
  - Si  $m > 1$ , se realiza una modulación excesiva.

#### 2.2.1.2. Modulación de amplitud de doble banda lateral.

En este tipo de modulación, la señal modulada no contiene una onda portadora. Como no hay onda portadora, la señal de información también puede ser negativa. Se ahorra gran cantidad de energía al no utilizar la señal de portadora. La señal de información se lleva en las bandas laterales. Este tipo de modulación tiene la siguiente forma de onda:

$$C(t) = f(t) \cos \omega_0 t \quad (2.7)$$

#### 2.2.2. Modulación de frecuencia (FM).

Si se cambia la frecuencia de portadora  $\omega_0$ , se obtiene la modulación de frecuencia, conocida como FM dependiendo de la señal de información. FM es un tipo de modulación de onda continua y la frecuencia de la portadora

sinusoidal cambia según el signo de la señal de información  $\ll f(t) \gg$ . La frecuencia de la portadora es  $\omega_0 = kf(t)$  y donde  $k$ , es una constante. La forma de onda de FM modulada es:

$$C(t) = \cos \theta(t)$$

Donde,  $\theta(t) = \omega_0 t + \theta$

Existen dos tipos de modulación de frecuencia, que son:

➤ **FM de banda estrecha**,  $\beta \ll \frac{\pi}{2}$  y el grado de modulación es  $m \cong \beta$ . La figura 2.2 muestra el espectro de modulación FM de banda estrecha. Suponga que  $f(t)$  es un senoidal y  $\beta \ll \frac{\pi}{2}$  como  $\beta = 0.2 \text{ rad.}$  y después de la expansión trigonométrica, queda

$$\begin{aligned} C(t) &= \cos(\omega_0 t + \beta \sin \omega_m t) \\ &= \cos(\omega_0 t) \cos(\beta \sin \omega_m t) - \sin(\omega_0 t) \sin(\beta \sin \omega_m t) \end{aligned}$$

Nota:

1. Si  $Q$  es sumamente menor ( $\ll$ ), entonces  $\cos Q = 1$  y  $\sin Q = 0$ .
2.  $\cos(\beta \sin \omega_m t) = 1$
3.  $\sin(\beta \sin \omega_m t) = \beta \sin \omega_m t$

En consecuencia, la expresión general de FM de banda estrecha es:

$$C(t) = \cos \omega_0 t - \sin \omega_0 t \beta \sin \omega_m t$$

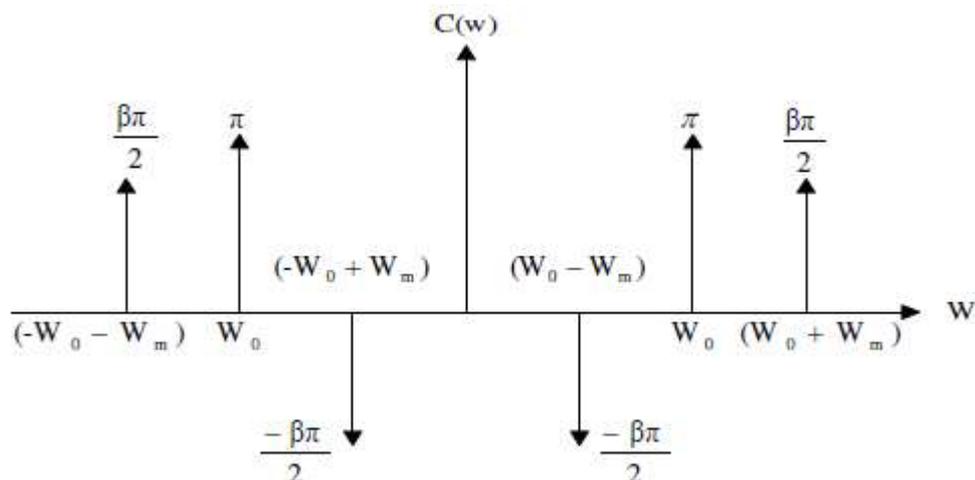


Figura 2. 2: Gráfica espectral de la modulación de frecuencia de banda estrecha.

Fuente: (Tomasi, 2010)

➤ **FM de banda ancha.**

Significa FM sin banda estrecha, entonces la condición de eliminación es  $\beta \ll \frac{\pi}{2}$ . Por ejemplo;  $\beta = 6$

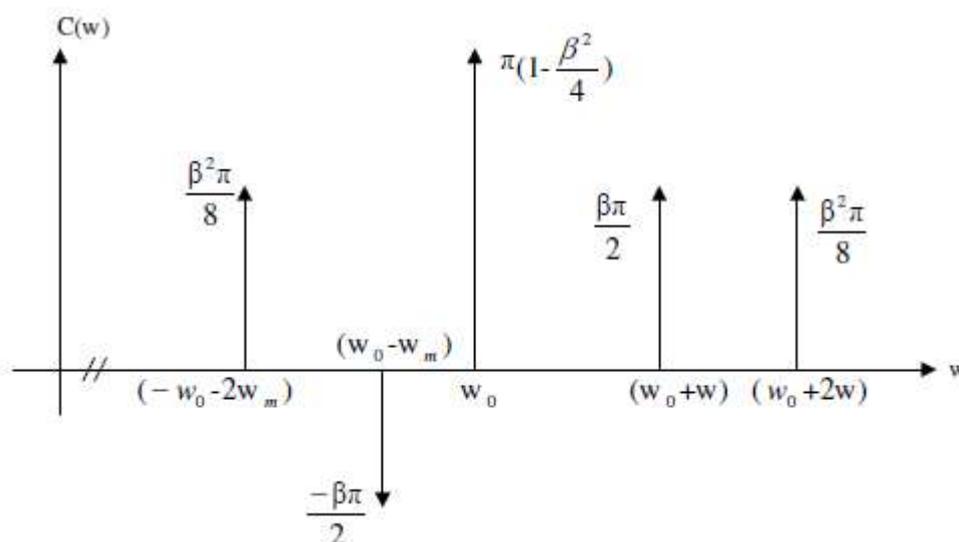


Figura 2. 3: Gráfica espectral de la modulación de frecuencia de banda ancha.  
Fuente: (Tomasi, 2010)

**2.2.3. Modulación de fase (PM).**

Es el cambio de fase de la señal portadora dependiendo de la señal de información. La fase modulada se obtiene mientras se deriva la señal de información. Mientras que la desviación de frecuencia ocurre en la modulación de frecuencia, la desviación de fase ocurre en la modulación de fase.

**2.3. Modulación de pulsos o impulsos.**

Este tipo de portadora no es una serie continua de pulsos. Los tipos de modulación de esta especie se muestran en la figura 2.4.

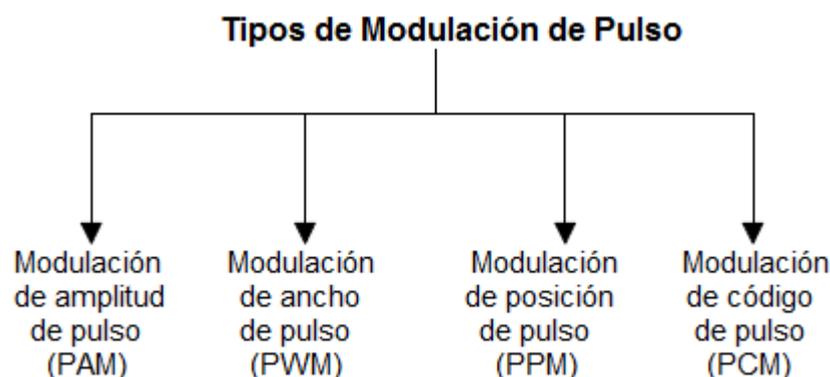


Figura 2. 4: Tipos de modulación de pulso.  
Fuente: (Tomasi, 2010)

### 2.3.1. Modulación de amplitud de pulso – PAM.

La amplitud de un pulso de tiempo fijo y posición fija cambia dependiendo de la señal de información. En la modulación de amplitud de pulso (*Pulse Amplitude Modulation, PAM*), es posible enviar otras señales de información en espacios distintos de los tiempos de muestreo. Así, se obtienen sistemas multiplexados en el tiempo. La figura 2.5 muestra la gráfica correspondiente al esquema de modulación de amplitud de pulso.

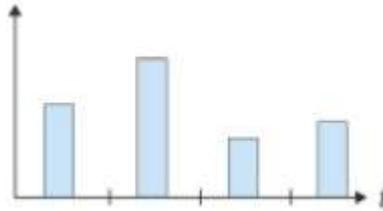


Figura 2. 5: Gráfica del esquema de modulación PAM utilizado en sistemas de comunicación de datos en modo serial.

Fuente: (Wilson et al., 2016)

### 2.3.2. Modulación de ancho de pulso – PWM.

Este método a veces se denomina modulación de tiempo de pulso (*Pulse Time Modulation, PTM*) o modulación de longitud de pulso (*Pulse Length Modulation, PLM*). En este método, el ancho del pulso es proporcional a la amplitud de la señal de información. La figura 2.6 muestra la gráfica correspondiente al esquema de modulación de ancho de pulso.

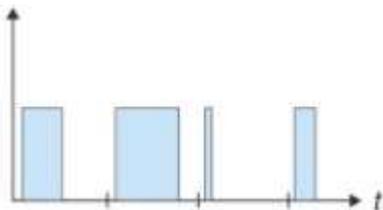


Figura 2. 6: Gráfica del esquema de modulación PWM utilizado en sistemas de comunicación de datos en modo serial.

Fuente: (Wilson et al., 2016)

### 2.3.3. Modulación de posición de pulso – PPM.

La posición de un pulso de ancho fijo varía en proporción a la amplitud de la señal de información dentro de un período de tiempo predeterminado. La figura 2.7 muestra la gráfica correspondiente al esquema de modulación de posición de pulso.

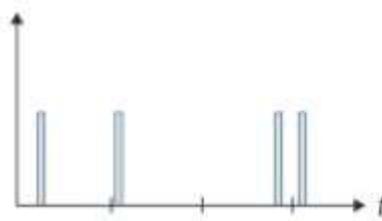


Figura 2. 7: Gráfica del esquema de modulación PPM utilizado en sistemas de comunicación de datos en modo serial.

Fuente: (Wilson et al., 2016)

#### 2.3.4. Modulación de código de pulso.

En la modulación de código de pulso (*Pulse Code Modulation, PCM*), la señal de información se muestrea y se convierte en un número de serie binario fijo para la transmisión. El número binario cambia según la amplitud de la señal analógica. En PCM, los pulsos son de longitud fija (ancho) y amplitud constante. En consecuencia, PCM es un sistema binario.

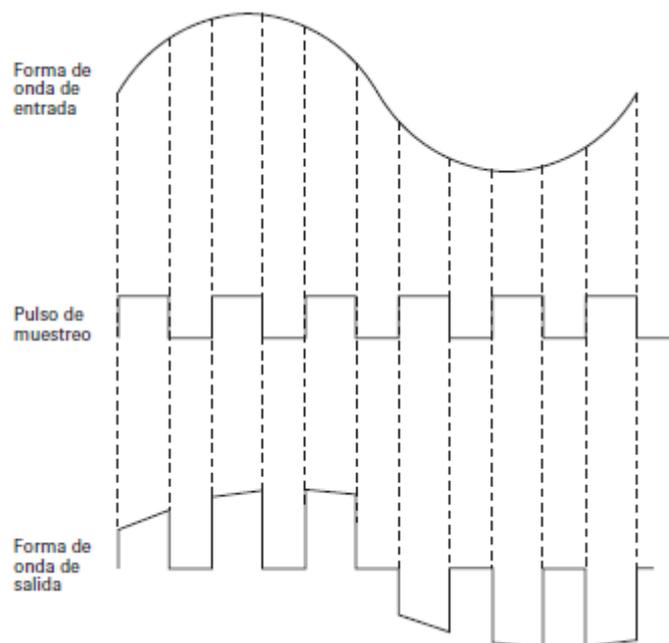


Figura 2. 8: Gráfica del esquema de modulación PCM utilizado en sistemas de comunicación de datos en modo serial.

Fuente: (Wilson et al., 2016)

#### 2.4. Técnicas de modulación digital.

La transmisión digital es la transmisión de pulsos digitales entre dos puntos en un sistema de comunicación. La radio digital es la transmisión de portadoras analógicas con modulación digital entre dos puntos en un sistema de comunicación. Los sistemas de transmisión digital requieren un material

físico como un par de cables metálicos, un cable coaxial o un cable de fibra óptica entre el transmisor (Tx) y el receptor (Rx). En los sistemas de radio digital, el medio de transmisión es un espacio vacío o una atmósfera terrestre.

En las figuras 2.9 y 2.10 se muestran los diagramas de bloques de un sistema de transmisión digital y un sistema de radio digital. En un sistema de transmisión digital, la fuente de información inicial puede estar en forma digital o en forma analógica. Si la fuente de información está en formato analógico, puede causar pulsos digitales antes de la transmisión; en el extremo receptor, debe volver a convertirse al formato analógico. En un sistema de radio digital, la señal de entrada de modulación y la señal de salida demodulada son pulsos digitales.

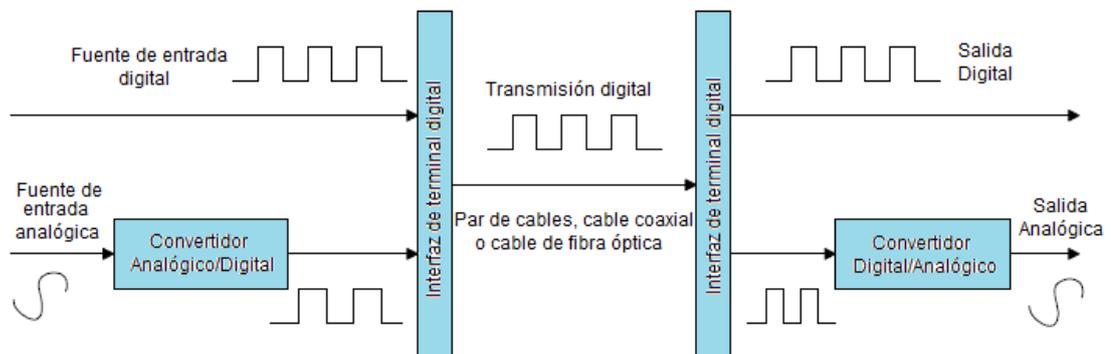


Figura 2. 9: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación digital utilizado en transmisiones digitales.

Fuente: (Tomasi, 2010)

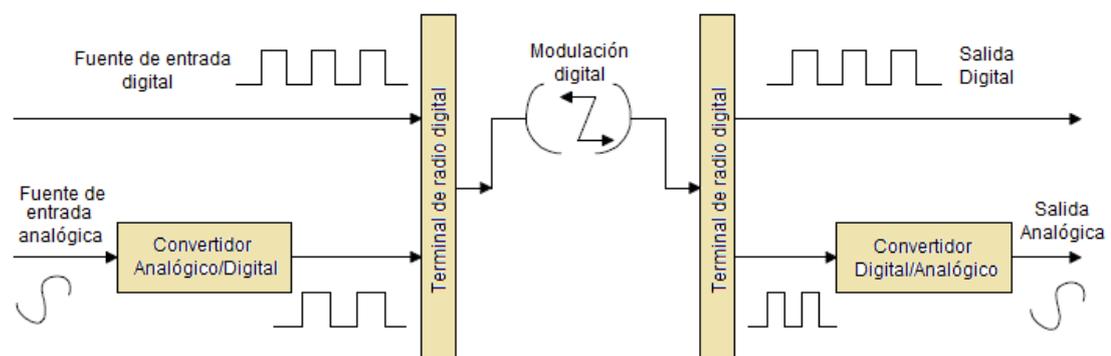


Figura 2. 10: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación digital utilizado en transmisiones de radio digitales.

Fuente: (Tomasi, 2010)

Lo que distingue un sistema de radio digital de los sistemas de radio clásicos, tales como, AM, FM o PM es que las señales moduladoras y demoduladas en el sistema de radio digital no son formas de onda digitales

sino pulsos digitales. Tal como sucede en los sistemas convencionales, las portadoras analógicas se utilizan en la radio digital. Sin embargo, las señales moduladoras y demoduladas no son formas de onda digitales sino pulsos digitales. Estos son los signos "0" y "1", que son los "bloques de construcción del mundo moderno". Los sistemas de comunicaciones digitales más utilizados se muestran en la figura 2.11.

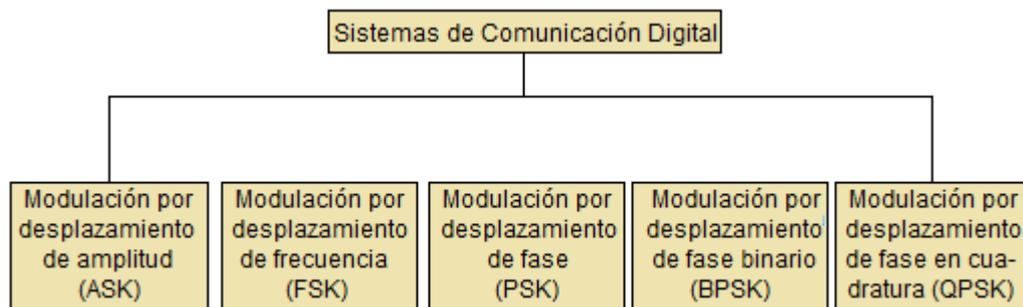


Figura 2. 11: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación digital utilizado en transmisiones de radio digitales.

Fuente: (Tomasi, 2010)

#### 2.4.1. Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK).

La modulación por desplazamiento de amplitud (*Amplitude Shift Keying*, ASK) es la aplicación de señales de información binarias de la modulación de amplitud. Las formas de onda modificadas de encendido-apagado (*On-Off Keying*, OOK) se muestran en la figura 2.12.

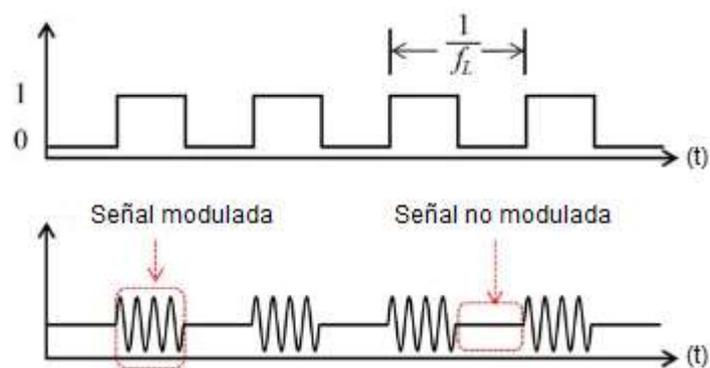


Figura 2. 12: Formas de ondas de la señal modulada por desplazamiento de amplitud (ASK)

Fuente: (Jeong & Jeong, 2012)

Aquí, el estado de presencia corresponde al código de 1 lógico, y el estado de ausencia corresponde al código de 0 lógico. La parte del transmisor ASK, el sistema de generación de señal analógica es similar a la modulación

de doble banda lateral. La figura 2.13 muestra el diagrama de bloques del modulador ASK empleado en transmisores ASK.

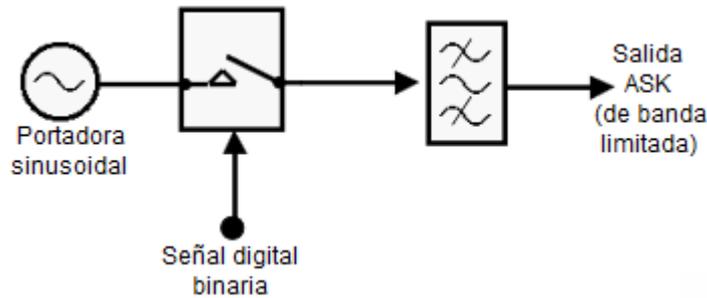


Figura 2. 13: Diagrama de bloques del modulador ASK.  
Fuente: (Gott, 2019)

El ancho de banda de la señal ASK se calcula de la siguiente manera:

$$C(t) = Af(t) \cos(\omega_0 t)$$

$$C(\omega) = \frac{A}{2} [F(\omega - \omega_0) + F(\omega + \omega_0)]$$

Con la modulación ASK, el espectro de la señal binaria se desplaza a  $\pm\omega_0$ . En la parte del receptor ASK, hay dos formas principales para su demodulación.

1. Demodulación simultánea
2. Demodulación asincrónica

Estos son los mismos que en las comunicaciones analógicas.

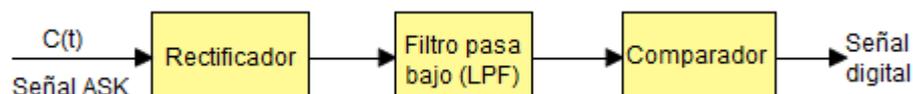


Figura 2. 14: Diagrama de bloques del demodulador ASK.  
Fuente: (Xiao et al., 2011)

#### 2.4.2. Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK).

La modulación por desplazamiento de frecuencia (*Frequency Shift Keying, FSK*) es una forma simple de bajo rendimiento de modulación digital. FSK es una forma de modulación de ángulo de envolvente fija similar a la modulación de frecuencia (FM). La diferencia es que la señal de modulación es un tren de pulsos binario (dual) que varía entre dos niveles de voltaje separados, no una forma de onda que cambia continuamente. En resumen,

FSK es la aplicación de señales de información binaria a la modulación de frecuencia. La figura 3.6 muestra el modo de modulación por desplazamiento de frecuencia.

En la etapa del transmisor FSK binario, los datos de entrada binarios desplazan la frecuencia media o la frecuencia de portadora. Por lo tanto, la salida de un modulador FSK es una función escalonada en el dominio de la frecuencia. Cuando la señal de entrada binaria cambia del nivel lógico "0" al nivel lógico "1" o del nivel lógico "1" al nivel lógico "0", entonces, la salida FSK cambia entre las dos frecuencias: la señal o la frecuencia lógica "1" y el rango o la frecuencia lógica "0". En FSK, cada vez que cambia el estado lógico de la señal de entrada binaria, hay un cambio en la frecuencia de salida. Por lo tanto, la tasa de cambio de salida es igual a la tasa de cambio de entrada.

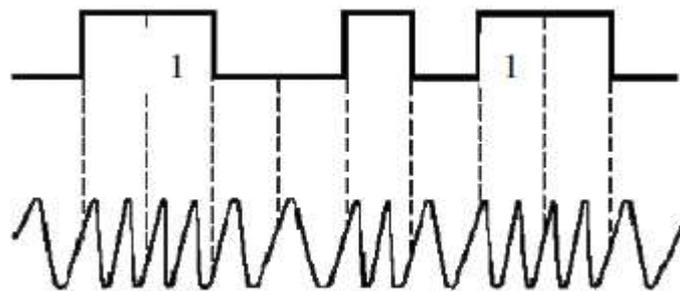


Figura 2. 15: Formas de ondas de la señal modulada por desplazamiento de frecuencia (FSK)

Fuente: (Tekin et al., 2006)

En la modulación digital, la tasa de cambio en la entrada del modulador se llama tasa de bits. La unidad de velocidad de transmisión de bits es bit por segundo (bps). La velocidad de cambio a la salida del modulador se llama baudios; la velocidad en baudios es igual a la duración de un elemento de la señal de salida. En FSK, los tipos de cambio de entrada y salida son iguales; por lo tanto, la velocidad de transmisión de bits y la velocidad de transmisión son iguales. Un transmisor FSK básico se muestra en la figura 2.16.

El circuito del transmisor más utilizado para demodular señales FSK es el bucle de fase bloqueada (*Phase-Locked Loop, PLL*) tal como se muestra en la figura 2.17. El PLL-FSK es un demodulador, cuando la entrada PLL cambia entre la señal de baliza y el rango de frecuencias, el voltaje de error

de CC en la salida del comparador de fase sigue al cambio de frecuencia. Como solo hay dos frecuencias de entrada (señal y rango), solo hay dos voltajes de falla de salida. Uno es el nivel lógico de 1; mientras que el otro representa un nivel lógico de "0". Por lo tanto, la salida es una representación de dos niveles (binario) de la entrada FSK.

En general, la frecuencia natural de PLL es igual a la frecuencia media del modulador FSK. Como resultado, los cambios en el voltaje de error de CC siguen los cambios en la frecuencia de entrada analógica y son simétricos alrededor de 0 V<sub>CC</sub>.

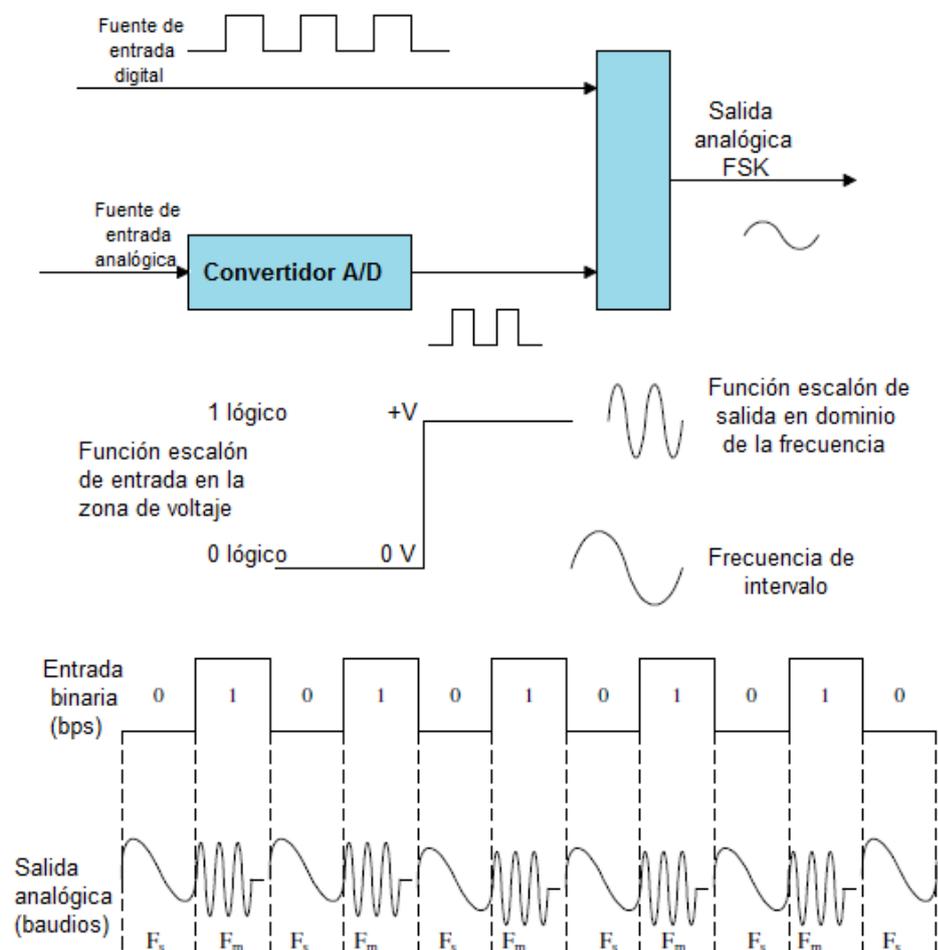


Figura 2. 16: Diagrama de bloques del transmisor FSK binario.

Fuente: (Tomasi, 2010)

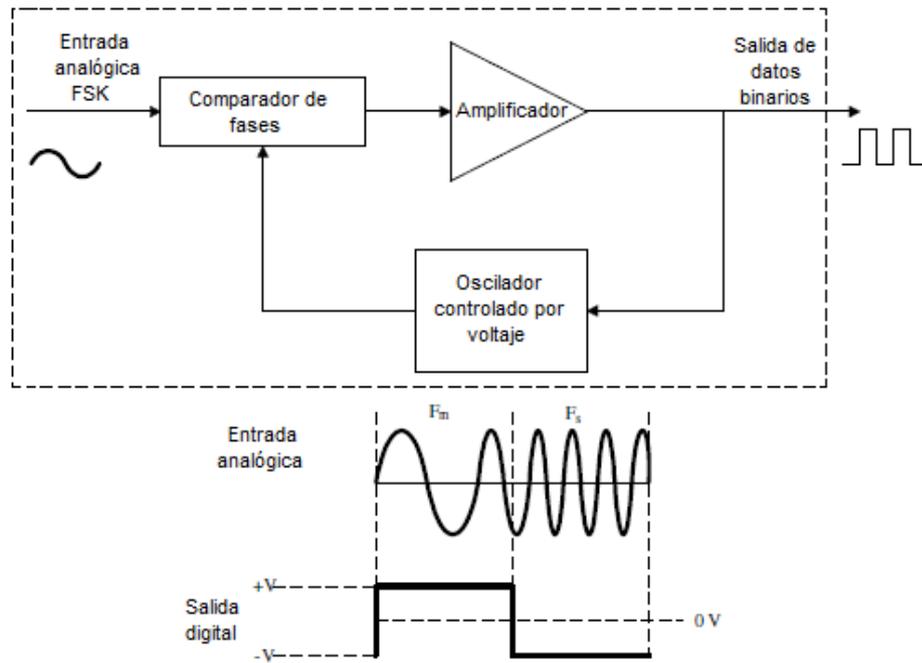


Figura 2. 17: Diagrama de bloques del demodulador FSK.  
Fuente: (Bensky & Safari, 2019)

### 2.4.3. Modulación por desplazamiento de fase (PSK).

La modulación por desplazamiento de fase (*Phase Shift Keying, PSK*) es otra forma de modulación digital con modulación de ángulo, y envolvente fija. PSK es similar a la modulación de fase clásica; la diferencia entre ellos es que en PSK, la señal de entrada es una señal digital binaria y es posible un número limitado de fases de salida. En resumen, PSK es la aplicación de señales de información binaria a la modulación de fase. En tales sistemas de comunicación digital, la fase de la portadora se desplaza  $180^\circ$  dependiendo del signo binario. A continuación, la figura 2.18 muestra un transmisor PSK con un modulador equilibrado.

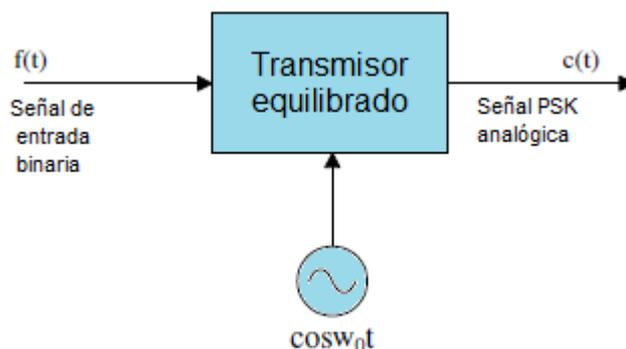


Figura 2. 18: Diagrama de bloques del transmisor PSK.  
Fuente: (Tomasi, 2010)

La salida del modulador de la marca PSK se puede expresar matemáticamente como,

$$C(t) = A \cos(\omega_0 t + Q_i) \rightarrow Q_i = 0^\circ \text{ o } 180^\circ$$

$$C(t) = A_n \cos(\omega_0 t) \rightarrow A_n = \pm A$$

La demodulación se puede realizar simultáneamente con un demodulador implementado en un receptor PSK (véase la figura 2.19).

$$C(t) = A_i \cos(\omega_0 t + Q)$$

Aquí se utiliza un circuito para generar el  $\cos(\omega_0 t + Q)$  de la demodulación simultánea. En el demodulador síncrono, la portadora local de sincronización se obtiene a partir de la señal entrante. En el demodulador síncrono; si  $\cos(\omega_0 t + Q)$  se multiplica por un signo entrante y se pasa por una frecuencia de pasa bajo.

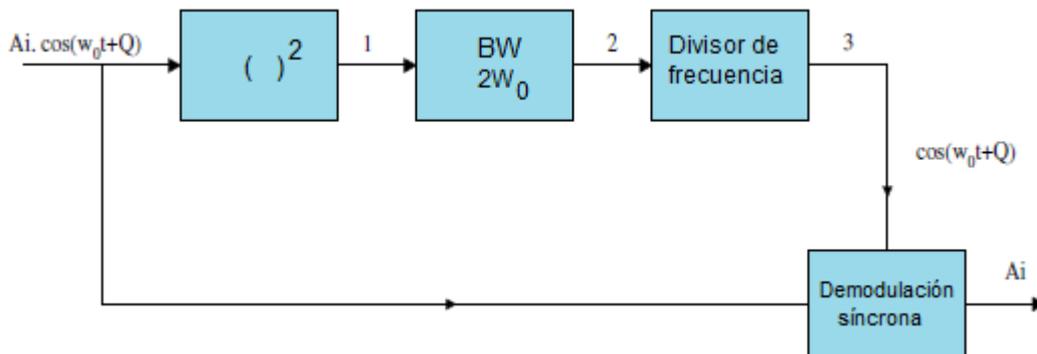


Figura 2. 19: Diagrama de bloques del demodulador PSK.

Fuente: (Tomasi, 2010)

#### 2.4.4. Modulación por desplazamiento de fase binario (BPSK).

En la modulación de desplazamiento de fase binario (*Binary Phase Shift Keying, BPSK*), son posibles dos fases de salida para una sola frecuencia de portadora. Una fase de salida de nivel lógico "1"; y el otro representa el nivel lógico "0". Cuando la señal de entrada digital cambia, la fase de la portadora de salida cambia entre dos ángulos diferentes de  $180^\circ$ .

La figura 2.20 muestra un diagrama de bloques simplificado de un modulador BPSK.

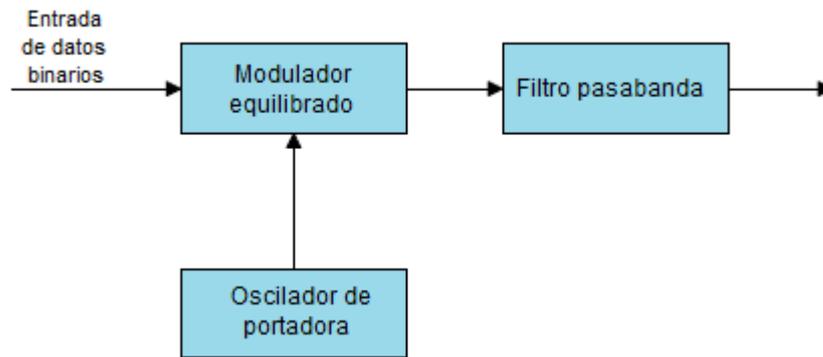


Figura 2. 20: Diagrama de bloques del demodulador BPSK.  
Fuente: (Tomasi, 2010)

#### 2.4.5. Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK)

La modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (*Quadrature Phase Shift Keying, QPSK*) es una forma de modulación digital de envolvente fija. QPSK es una técnica de codificación M-ary donde M es 4 y también se la puede expresar como 4PSK. Son posibles cuatro fases de salida para una sola frecuencia portadora en QPSK. Como hay cuatro fases de salida diferentes, debe haber cuatro estados de entrada diferentes. Dado que la entrada numérica del modulador QPSK es una señal binaria, se requiere más de un bit de entrada para producir cuatro estados de entrada diferentes. Con 2 bits, hay cuatro casos posibles: 00, 01, 10 y 11.

Por lo tanto, en QPSK, los datos de entrada binarios se combinan en grupos de 2 bits llamados dibits. Cada código dibit genera una de las cuatro fases de salida posibles. Por lo tanto, por cada dibit de 2 bits que ingresa al modulador, se produce un único cambio de salida. Por lo tanto, la tasa de cambio en la salida (baudios) es la mitad de la tasa de transmisión de bits de entrada.

La figura 2.21 muestra el diagrama de bloques de un modulador QPSK. Se envían dos bits (un dibit) al separador de bits. Después de la entrada en serie de los dos bits en el divisor, estos bits también llegan paralelos a la salida. Un bit se enruta al canal I y el otro bit al canal Q. El bit I modula una portadora en la misma fase que el modulador de referencia. El bit Q modula

una portadora que está en una fase diferente de  $90^\circ$  de la portadora de referencia o en ángulo recto con respecto a ella.

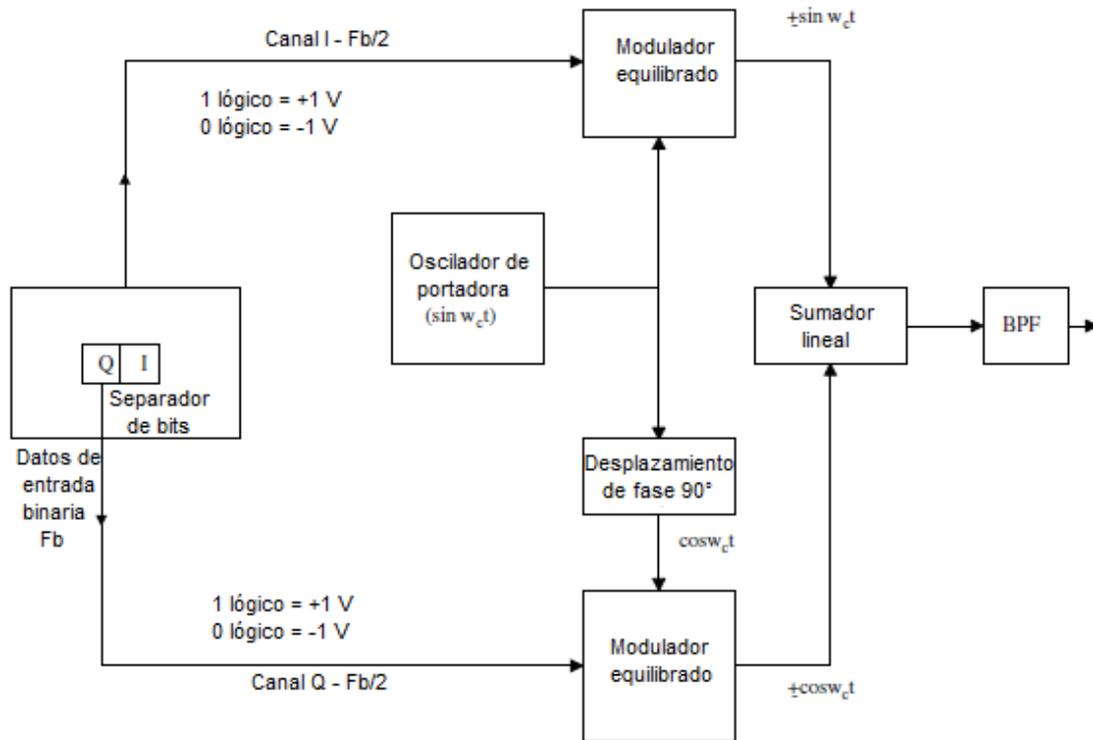


Figura 2. 21: Diagrama de bloques del modulador QPSK.

Fuente: (Tomasi, 2010)

Después de que un dicit se divide en los canales I y Q, se puede ver que la operación del modulador QPSK es la misma que la del modulador BPSK. Básicamente, un modulador QPSK es dos moduladores BPSK conectados en paralelo.

El diagrama de bloques de un receptor QPSK se muestra en la Figura 2.22. El divisor de potencia dirige la señal de entrada QPSK a los detectores de multiplicación I y Q y la portadora al circuito de recuperación. El circuito de reciclaje de la portadora regenera la marca del oscilador de la portadora de envío inicial. La frecuencia y la fase de la portadora recuperada deben ser coherentes con el envío de la portadora de referencia. La señal QPSK se demodula en los detectores de multiplicación I y Q; los detectores generan los bits de datos I y Q iniciales. Las salidas de los detectores de multiplicación se introducen en el circuito de combinación de bits y se convierten de los canales de datos paralelos I y Q en un único flujo de datos de salida binaria.

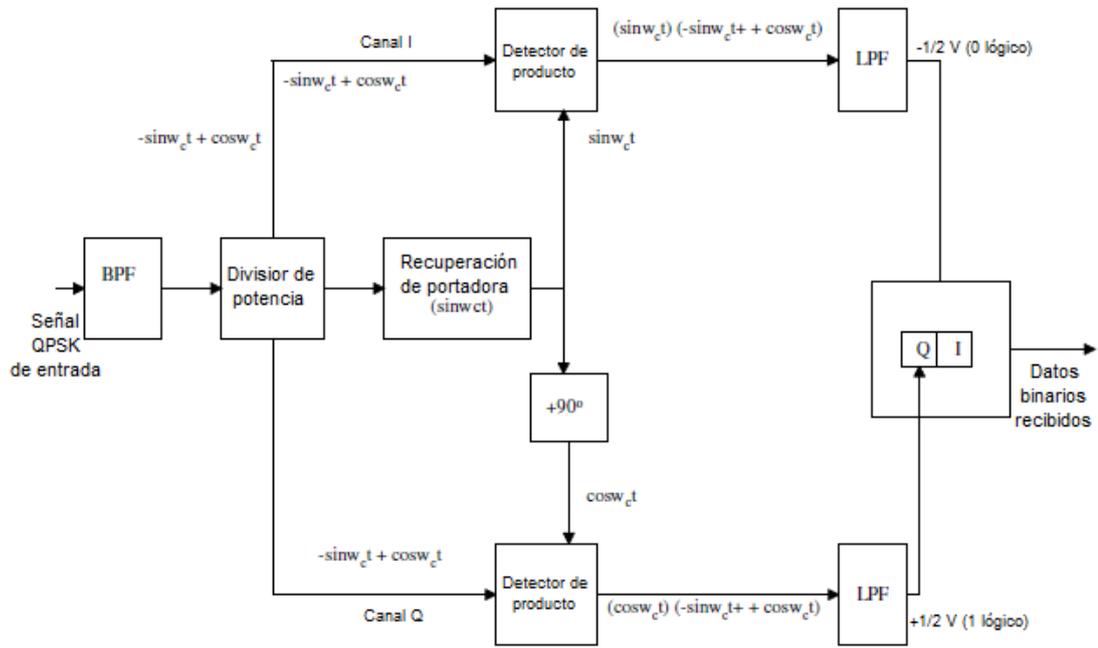


Figura 2. 22: Diagrama de bloques del demodulador ASK.  
 Fuente: (Tomasi, 2010)

La señal QPSK entrante (00, 01, 10, 11) puede ser cualquiera de las cuatro posibles fases de salida.

## **CAPÍTULO 3: Desarrollo y Resultados obtenidos**

### **3.1. Eliminación de características utilizando transformada de Wavelet.**

La eliminación de las propiedades de la señal se requiere antes de que pueda clasificar el reconocimiento automático de modulación. Para lo cual, la transformación Wavelet se utiliza para extraer las propiedades de la señal.

#### **3.1.1. Reconocimiento de patrones.**

Patrón, es el nombre dado a la información observable o medible sobre las entidades de interés. Estos patrones en el mundo real son a menudo la descripción cuantitativa de los datos de interés. El reconocimiento de patrones es la configuración lingüística que las personas derivan de las formas formales de todo tipo de sonidos, imágenes y patrones similares. De hecho, el reconocimiento de patrones implica actividades en una amplia gama de ciencias, ingeniería y vida cotidiana. El reconocimiento de patrones también se puede ver en la vida de las personas: el reconocimiento de patrones se utiliza en muchas actividades con límites difusos, como la percepción del cambio de aire, la identificación de miles de flores, plantas, especies animales, leer libros y reconocer rostros y voces.

El reconocimiento de patrones humanos es el aprendizaje basado en la experiencia pasada. Por lo tanto, las personas tienen la capacidad de evaluar los eventos de reconocimiento de patrones en la práctica a la luz de su experiencia. No es posible definir las reglas utilizadas para reconocer un sonido en particular. Aunque las personas hacen la mayoría de estas cosas bastante bien, requieren que las máquinas lo hagan de manera económica, mejor, más rápido y automáticamente. El reconocimiento de patrones es una disciplina de ingeniería multidimensional para implementar tales máquinas inteligentes y aprendibles.

El reconocimiento de patrones es la identificación o clasificación de muestras de señales complejas u objetos con algunas características o caracteres comunes que pueden asociarse entre sí. En este contexto, los objetivos más importantes del reconocimiento de patrones son; para dar cierta

forma a clases de patrones desconocidos e identificar el patrón que pertenece a una clase conocida.

La aplicación de técnicas de reconocimiento de patrones está abierta a muchos campos de ingeniería, medicina, militares y científicos. Algunos de estos son; reconocimiento de voz, clasificación de objetivos por radar y control biomédico. Estas aplicaciones, conocidas como reconocimiento de patrones, también se conocen como aprendizaje automático, clasificación de patrones, análisis de discriminación y estimación de calidad. El concepto de reconocimiento de patrones consta de tres partes importantes, tal como se muestra en la figura 3.1:

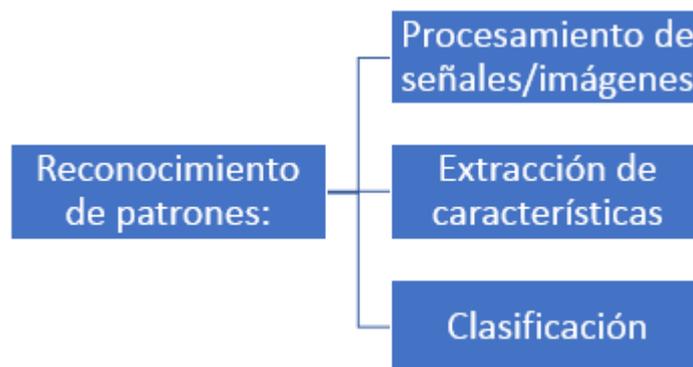


Figura 3. 1: Estructura conceptual de reconocimiento de patrones.  
Elaborado por: Autor

A continuación, se describen los procesos del reconocimiento de patrones:

- 1) **Procesamiento de señales/imágenes:** esta es la etapa de preprocesamiento. Es la parte donde se filtra la señal o la imagen, se procesa mediante diversas técnicas de conversión y visualización, separadas o modeladas.
- 2) **Extracción de características:** esta es la etapa en la que el tamaño de los datos de la señal e imagen se reduce y las propiedades clave descriptivas se determinan y se someten a la normalización al mismo tiempo. Desempeña el papel más efectivo en el rendimiento del sistema.
- 3) **Clasificación:** etapa de decisión descriptiva en la que el conjunto de características extraídas se reduce y se formula.

### 3.1.2. Formulación del problema de reconocimiento de patrones.

El propósito formal del problema de reconocimiento de patrones es la observación de la cantidad de  $M$  de  $\{x_i\}_{i=1}^M$ , donde  $x \in X \subset \mathfrak{R}^M$  para definir observaciones o medidas dividiendo  $y \in Y = \{w^{(1)}, w^{(2)}, \dots, w^{(k)}\}$  en varias clases. La salida de clase representa cada clase  $w^{(k)}$  en el espacio de decisión. El operador  $D$  muestra un clasificador, que se muestra como un mapa en la figura 3.2, que permite que el espacio de entrada se divida en secciones separadas asignando una etiqueta de clase a cada separación, o un asignador de etiqueta a cada clase dividiendo el espacio de entrada en secciones no intersectantes ( $D: x \gg y$ ).

Existen varios obstáculos para clasificar los espacios de señal, como el gran tamaño del patrón de señal y el ruido. Para deshacerse de estos problemas, la característica se extrae del signo. Por lo tanto, el espacio de propiedad resultante se define como  $F \subset \mathfrak{R}^M$  entre el espacio de señal de entrada y el espacio de decisión de salida ( $N \leq M$ ). Un sustractor de propiedad se define como  $f: X \rightarrow F$  y el clasificador se da como  $g: F \rightarrow Y$ . Por lo tanto, el proceso de clasificación se puede mostrar como  $d = g \circ f$ .

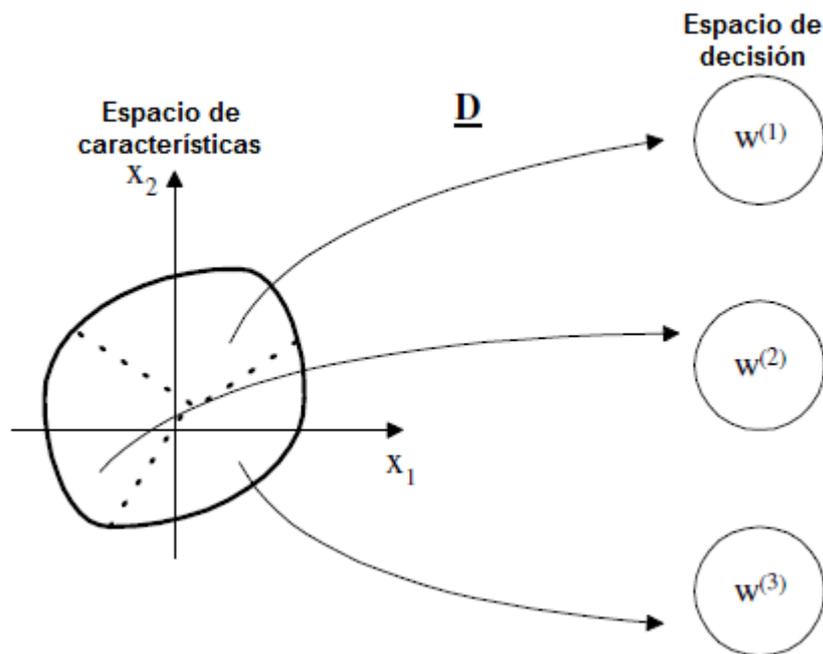


Figura 3. 2: Vista general del diseño del reconocimiento de patrones.

Elaborado por: Autor

Con el fin de obtener la capacidad de aprender el sistema de reconocimiento de patrones, generalmente se utiliza un conjunto de entrenamiento  $\mathfrak{Z}$  que consiste en pares de entrenamiento  $(x, y)$  que contienen la señal de entrada  $P$  y etiquetas de clase de salida. Para lo cual  $\mathfrak{Z}$  es,

$$\mathfrak{Z} = \{(x^{(1)}, y^{(1)}), (x^{(2)}, y^{(2)}), \dots, (x^{(P)}, y^{(P)})\}$$

Donde (i) en el conjunto de entrenamiento i. patrón: muestra el par de clases

### 3.1.3. Sistemas de reconocimiento de patrones.

Los sistemas de reconocimiento de patrones son fundamentales para muchas aplicaciones en la identificación de datos observados o medidos. En la figura 3.3, se proporciona el sistema de reconocimiento de patrones comúnmente utilizado. Los sensores miden ciertos procesos físicos, que pueden ser una de las muchas condiciones naturales posibles en un momento dado.

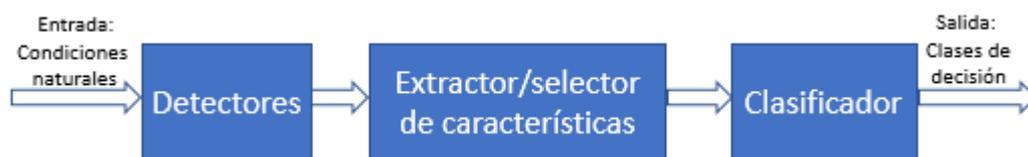


Figura 3. 3: Vista del componente de la capa de red – módulo compuesto.  
Elaborado por: Autor

Una de las tareas más importantes de este diagrama de bloques es extraer menos características del espacio de entrada que consiste en todas las mediciones obtenidas. Finalmente, el rol del clasificador es categorizar los patrones de acuerdo con sus propiedades y guardarlo en las clases apropiadas. Los sistemas de reconocimiento de patrones existentes se dividen en tres grupos, que son:

#### 1. Reconocimiento de patrones estadísticos:

En el método de reconocimiento de patrones estadísticos, los algoritmos de clasificación se basan en análisis estadísticos. Los patrones de la misma clase tienen características similares definidas estadísticamente. En este método, las mediciones características que se caracterizan como característica se restan de las muestras de patrones de entrada.

Cada patrón se identifica por un vector de propiedad. En general, se enfatizan los métodos de decisión y clasificación que componen el clasificador. El diseño del clasificador se basa en la combinación de información de patrones procesables, como mediciones y probabilidades. Por lo tanto, la clasificación es una estructura estadística basada en la estimación de las funciones de densidad de probabilidad del espacio de datos de entrada. El reconocimiento de patrones estadísticos se basa en la teoría de la decisión bayesiana.

## **2. Reconocimiento de patrones estructurales:**

En el enfoque de reconocimiento de patrones estructurales (geométrico, secuencia de reglas), un patrón dado se reduce de la estructura formal a la definición característica básica. A menudo, la información extraída de los patrones no son solo los valores numéricos del conjunto de propiedades. La interconexión o interrelación de propiedades tiene información estructural importante que facilita la identificación y clasificación.

En otras palabras, tiene lugar la sintaxis formal descriptiva obtenida del estado no procesado del patrón o la gramática derivada de su síntesis. Por ejemplo, el número de esquinas del patrón, los ángulos de los bordes, etc. En general, en el método estructural, los sub-patrones más simples formulan descripciones jerárquicas de patrones complejos. En el método estructural, cada patrón se trata como una composición de sus componentes.

En el método de reconocimiento de patrones estructurales, la relación entre las diversas unidades es de gran importancia y está indicada por algunas notaciones formales utilizadas en el reconocimiento real. Por ejemplo, el reconocimiento de una tabla en la pantalla se puede realizar sobre la base de la definición estructural, como, por ejemplo, colocar una superficie rectangular horizontal apoyada en patas de igual longitud desde las esquinas". En este método, utiliza características generales como longitud circunferencial, área, centro de gravedad, momento de

inercia y transformada de Fourier. El modelo autorregresivo, el enfoque poligonal y los códigos de cadena son ejemplos del método de reconocimiento de patrones estructurales.

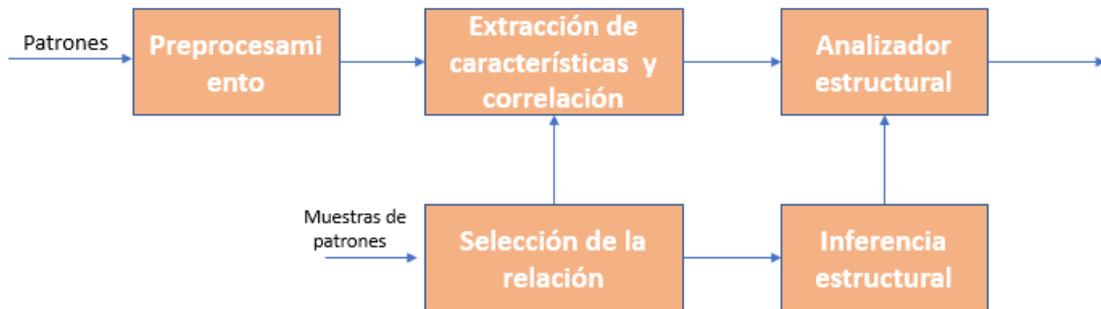


Figura 3. 4: Sistema de reconocimiento de patrones estructurales.  
Elaborado por: Autor

### 3. Reconocimiento inteligente de patrones:

Los enfoques de reconocimiento inteligente de patrones se basan en el aprendizaje y producen resultados de la experiencia pasada en la toma de decisiones. Hoy en día, los algoritmos de reconocimiento de patrones de aprendizaje se desarrollan centrados en redes neuronales artificiales y los estudios se concentran en esta dirección. Los enfoques de Redes Neuronales Artificiales (*Artificial Neural Network, ANN*) pueden expresarse como un determinante frente al enfoque estadístico. Porque los algoritmos de aprendizaje no utilizan nada sobre las propiedades estadísticas de las clases de patrones. Sin embargo, los enfoques de reconocimiento de patrones estadísticos y ANN son muy similares en forma y propósito, e incluso se encuentran en las opiniones expresadas como una extensión del reconocimiento de patrones estadísticos tradicionales de ANN.

No existe una distinción clara entre las redes neuronales estadísticas, estructurales y artificiales y los enfoques de reconocimiento de patrones. Los límites entre ellos son borrosos. Estos enfoques comparten características y objetivos comunes. Según el enfoque estadístico, la estructura del patrón puede no tener sentido en la solución de un problema de reconocimiento de patrón dado. La estructura solo se puede proyectar seleccionando la propiedad adecuada.

En el reconocimiento estadístico de patrones; la dificultad para expresar el conocimiento estructural se manifiesta en el reconocimiento de patrones estructurales y aprende las reglas estructurales. Sin embargo, el enfoque de red neuronal artificial se deriva de enfoques estadísticos y estructurales. Obviamente, cuando la información estructural sobre el patrón es valiosa, es mejor elegir el enfoque de reconocimiento del patrón estructural. Si la información estructural no tiene valor y no es adecuada para el propósito, es mejor elegir el método estadístico. Las redes neuronales artificiales se pueden considerar como una técnica que proporciona técnicas alternativas al enfoque estadístico y estructural y brinda calidad de reconocimiento inteligente al agregar dimensión de aprendizaje al reconocimiento de patrones.

### 3.2. Componentes del sistema de reconocimiento de patrones

El sistema de reconocimiento de patrones consta de dos partes: aprendizaje y reconocimiento. El sistema de reconocimiento de patrones se muestra en la figura 3.5. Los elementos más importantes del sistema son; la extracción de características, la creación de bases de datos y los componentes de clasificación (emparejamiento o coincidencia). Los sensores y los elementos de extracción de características en las fases de entrenamiento y reconocimiento pueden variar.

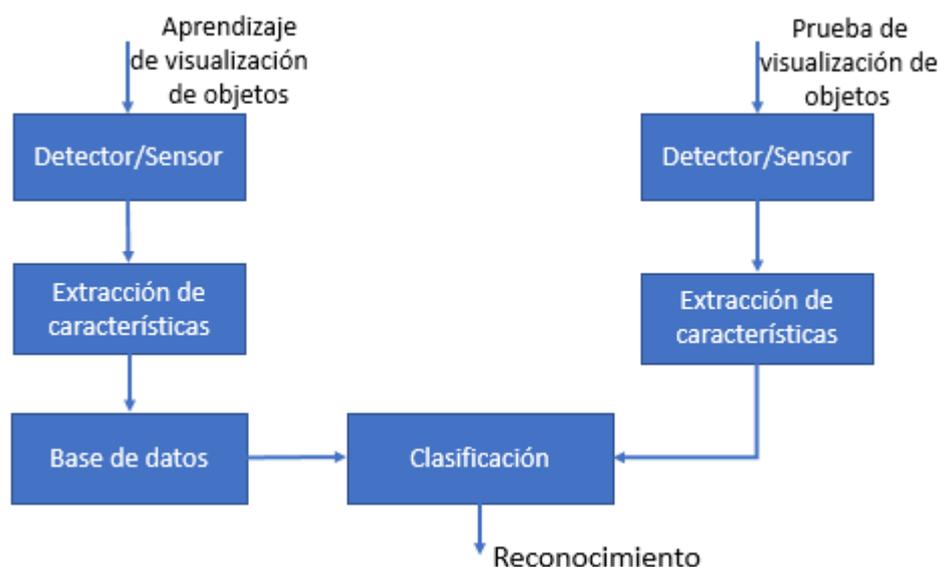


Figura 3. 5: Componentes del sistema de reconocimiento de patrones.  
Elaborado por: Autor

### **3.2.1. Preprocesamiento.**

Por medio de sensores, el patrón que se recibe digitalmente en la computadora se somete a una serie de procesos de preprocesamiento para simplificarlo. Por ejemplo, si el patrón recibido es una imagen de objeto; respectivamente, la imagen se pasa a través de etapas como umbralización, eliminación de bordes.

### **3.2.2. Extracción de características.**

La extracción de características es la parte más importante del reconocimiento de patrones y, en cierto sentido, juega un papel clave en el rendimiento del sistema de reconocimiento de patrones. Para distinguir entre clases de patrones, las propiedades del patrón deben eliminarse. Hoy en día, hay varios tipos de clasificadores de patrones que dan resultados muy exitosos, y los estudios se han centrado en la extracción de características que afecta directamente el éxito del clasificador. Principales razones para la extracción de características:

1. Es necesario para el aprendizaje del clasificador con errores menores y para la realización de la etapa de decisión en poco tiempo.
2. Para encontrar características en series de tiempo no fijas, la extracción de características es esencial. Por lo tanto, se aumentará la fiabilidad de la etapa de decisión.
3. Una extracción de características que asegurará que el sistema de clasificación de patrones no se vea afectado por intervenciones no controladas dentro o fuera del sistema será efectivo para formar una estructura estable. Dichas propiedades estables son importantes para la capacidad de generalización y separación del clasificador.

El principal problema para determinar las propiedades del patrón es seleccionar las mejores características del patrón dado. Cuando se determinan las características de los patrones de baliza, la representación del dominio de tiempo y frecuencia generalmente está en primer plano para la extracción de características. Por lo tanto, se puede extraer información descriptiva de la propiedad de la estructura del patrón complejo, incluidos los cambios de frecuencia transitorios y dependientes del tiempo. Estas

características caracterizan la información local de la baliza en regiones de tiempo y frecuencia.

Cuando se extraen las propiedades de los patrones de objeto, las propiedades difieren según la base de datos y el área de aplicación utilizada. Las características clave incluyen bordes, esquinas, líneas rectas y curvas, agujeros y curvaturas de bordes. Las definiciones de patrón de objeto se obtienen combinando una o más de estas propiedades.

En aplicaciones industriales, los límites de patrones de objetos y las mediciones derivadas de estos límites a menudo se usan como propiedades. Estas características se pueden dividir en tres grupos: general, local y relacional. Ejemplos de características generales son el entorno, el centro de masa, la distancia de los puntos fronterizos al centro de masa, la gravedad, el área, el momento de inercia. Las partes precisas, las partes circulares con curvatura constante son ejemplos de características locales. Ejemplos de propiedades relacionadas son parámetros tales como las distancias y ángulos de las partes inferiores del patrón de objeto. Los siguientes métodos se utilizan para extraer propiedades:

1. **Modelos autorregresivos:** la esencia de este modelo se basa en el uso de la distancia central en la representación unidimensional del límite del objeto. En el primer paso del algoritmo, se calcula el punto central. En el siguiente paso, cada punto que forma el borde del objeto tiene una distancia euclidiana del centro.
2. **Aproximación poligonal:** en este modelo, se calculan los puntos críticos del objeto. El píxel límite superior más a la izquierda del objeto y el píxel límite inferior a la derecha se toman como puntos críticos iniciales. Se dibuja una línea recta entre estos dos puntos. Luego se determinan las líneas rectas perpendiculares a esta línea recta. Se determinan los puntos en los que estos se cruzan con los píxeles del borde. Se calculan la línea recta y la longitud de las partes verticales derechas entre estos puntos. Los puntos por encima de un cierto valor umbral se identifican como puntos críticos. La simbolización unidimensional de estos puntos produce el vector de características.

3. **Códigos de cadena:** después de que la imagen digital ha sido bordeada, solo queda el contorno del objeto. En el siguiente paso, la información del borde del objeto debe estar codificada. Hay dos tipos de codificación en cadena, cuatro y ocho, disponibles para códigos de cadena para el proceso de codificación. La ventaja más importante del código de cadena octal sobre el código de cadena cuadrática es que permite la codificación de líneas de borde horizontales y verticales, así como líneas de borde cruzado. Después de determinar la dirección en la que los bordes del objeto continúan con los códigos de cadena, este vector de características se puede crear aplicando varias operaciones a un tamaño más pequeño y a un vector más general para todos los objetos.

### **3.3. Transformada Wavelet**

Las wavelets son funciones matemáticas que dividen los datos en diferentes componentes de frecuencia y luego trabajan en componentes que tienen una resolución que coincide con sus propias escalas. En otras palabras, la transformación wavelet es una herramienta que separa funciones, operadores o datos en componentes de diferentes frecuencias y nos permite trabajar en cada componente por separado.

La teoría wavelet tiene muchas raíces en diferentes campos. Pero la transformación continua de wavelets fue desarrollada por primera vez en el campo de la geofísica por Morlet (1982), Grossmann y Morlet (1984) y Goupillaud, Grossmann y Morlet (1984). Sus bases fueron fortalecidas por Chui (1992) y Meyer (1993). La interpretación discreta de la transformación fue desarrollada por Mallat (1989) y Daubechies (1992). La transformación de paquetes Wavelet es una versión generalizada de la transformación wavelet discreta y ha sido propuesta por Coifman y Wickerhauser (1992).

La transformada de Wavelet se utiliza en muchos campos tales como, el procesamiento de señales, la extracción de características, el reconocimiento de voz, la compresión de imágenes y la visión por computadora. En la figura 3.6, se dan algunas de las wavelets más utilizadas.

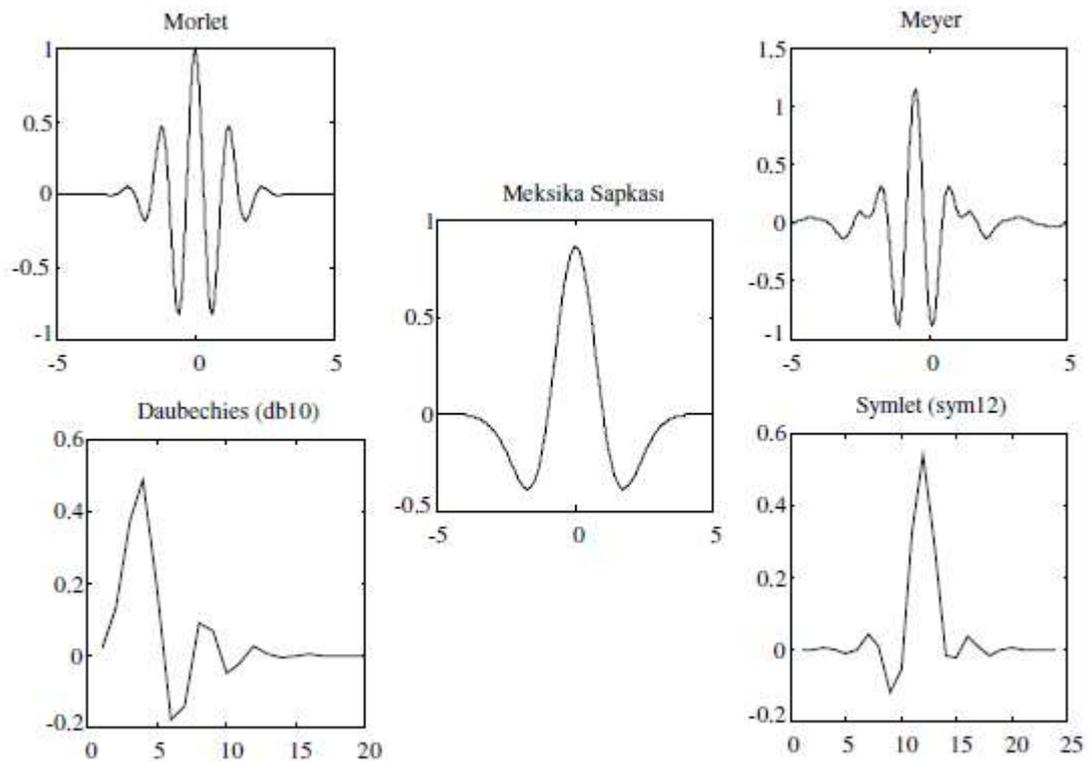


Figura 3. 6: Ejemplos de wavelets comúnmente utilizados.  
Elaborado por: Autor

Con la transformada wavelet, se obtienen dos signos: aproximados y detallados. Aproximado (A) consiste en componentes de alta escala y baja frecuencia de la señal. Los detalles (D) son los componentes de baja escala - alta frecuencia de la señal. El diagrama de bloques más sencillo de la transformada wavelet se muestra en la figura 3.7.

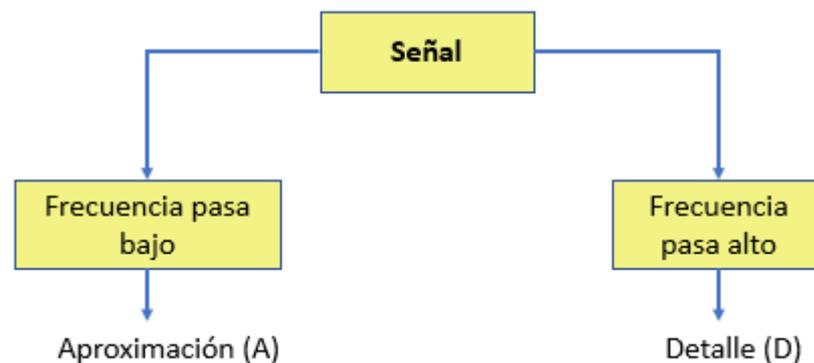


Figura 3. 7: Diagrama de bloques de la transformada Wavelet.  
Elaborado por: Autor

El nivel deseado de separación se realiza mediante la transformada wavelet. La distinción continúa a partir del detalle y los coeficientes

aproximados obtenidos en la descomposición multinivel con el coeficiente aproximado y, como resultado, se obtienen nuevamente los signos A y D. La distinción se puede hacer hasta el nivel  $n$  y esto se llama "árbol de descomposición Wavelet". La transformada wavelet de 3 niveles se muestra en la figura 3.8. Por ejemplo, si  $n=3$ , significa que es una transformada wavelet de tres pasos, que resulta en un total de 6 señales, 3 A, 3 D. La separación utilizando la transformación wavelet produce los detalles más pequeños.

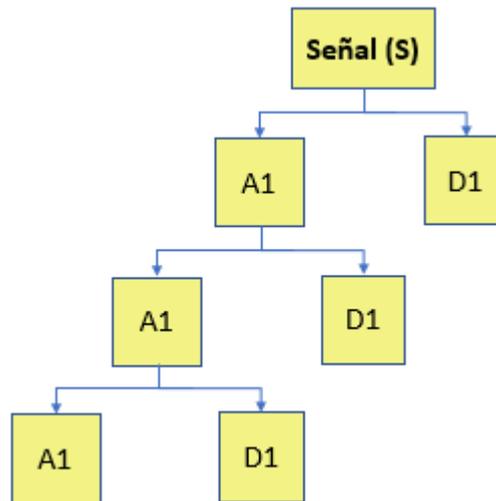


Figura 3. 8: Diagrama de bloques de estructura de la transformada Wavelet con nivel  $n=3$ .

Elaborado por: Autor

### 3.4. Desarrollo del reconocimiento de modulación digital basado en redes neuronales.

El presente trabajo, utiliza el método basado en redes neuronales wavelets artificiales genéticas (RNWAG) para el reconocimiento de modulación digital. El propósito del uso de RNWAG es seleccionar el tipo de wavelet más apropiado y el mejor valor de parámetro de entropía normal  $P$  mediante algoritmo genético y clasificar estas propiedades efectivas con el clasificador de redes neuronales artificiales (RNA), obteniendo así las propiedades óptimas de reconocimiento de modulación y la modulación más efectiva. Además, en la etapa de extracción de características de RNWAG, se utiliza la transformada wavelet para separar funciones, operadores o datos en componentes de diferente frecuencia y nos permite trabajar en cada componente por separado.

### 3.5. Generación de señales de modulación digital.

Para obtener señales de modulación digital se agregó ruido gaussiano blanco aditivo (*Additive White Gaussian Noise, AWGN*) con un rango de S/N de 0–60 dB. Al agregar ruido, se crean 10 señales de cada tipo de modulación. Se obtuvieron 15 señales de cada tipo de modulación y se obtuvieron 60 señales. Estas señales se usan para aprendizaje y pruebas de RNA.

#### 3.5.1. Generación de señales 8-ASK.

A continuación, se muestra en la figura 3.9 la generación de la señal de la modulación 8-ASK con una frecuencia de portadora ( $F_c$ ) de 10 Hz, una frecuencia de muestreo ( $F_s$ ) de 25 Hz. Esta señal se obtuvo agregando ruido.

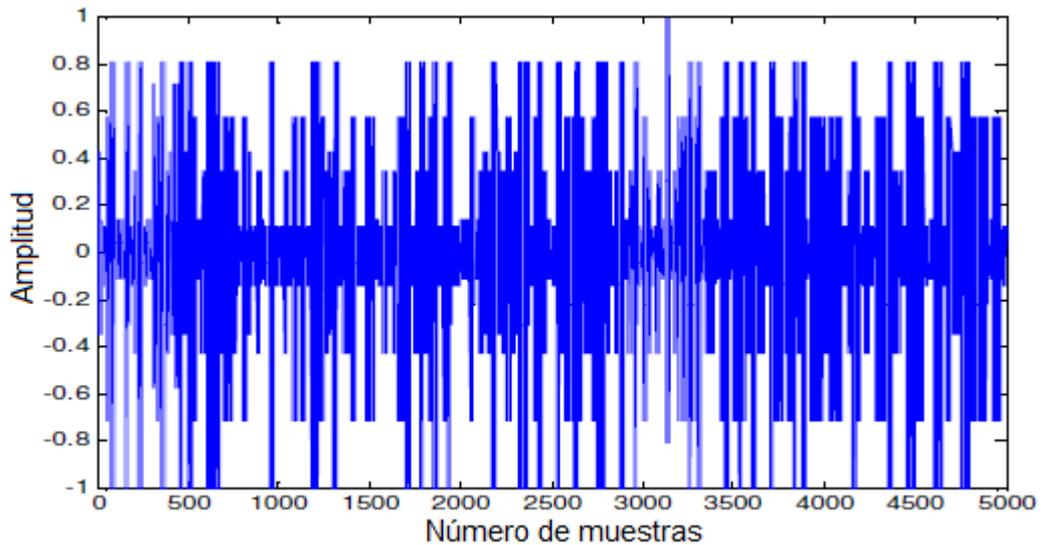


Figura 3. 9: Ejemplo de una señal modulada para  $M=8$  (8-ASK) con  $F_c= 10$  Hz.  
Elaborado por: Autor

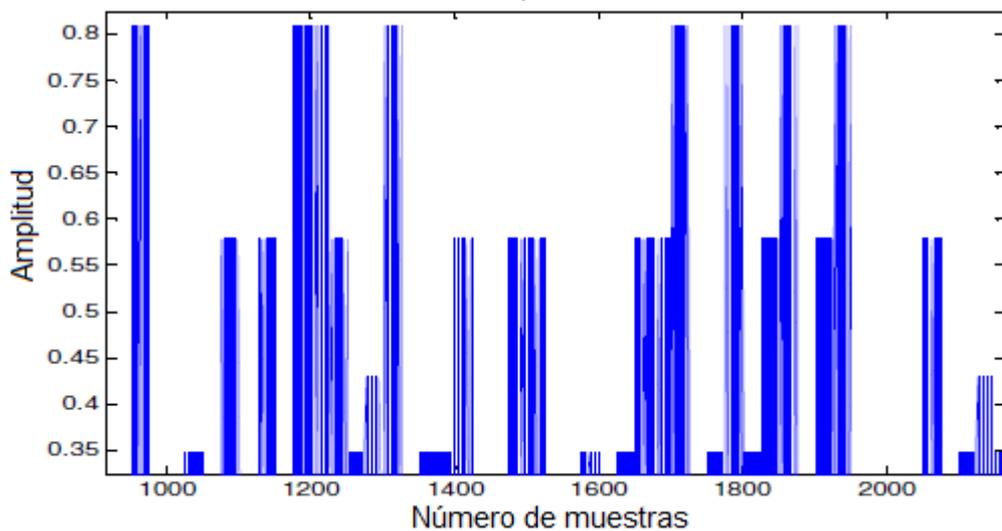


Figura 3. 10: Ejemplo ampliado de una señal modulada 8-ASK con  $F_c= 10$  Hz.  
Elaborado por: Autor

### 3.5.2. Generación de señales 8-FSK.

A continuación, se muestra en la figura 3.11 la generación de la señal de la modulación 8-FSK con una frecuencia de portadora ( $F_c$ ) de 10 Hz, una frecuencia de muestreo ( $F_s$ ) de 25 Hz. Esta señal se cambió a 30 señales moduladas con relación a la sección 3.5.1.

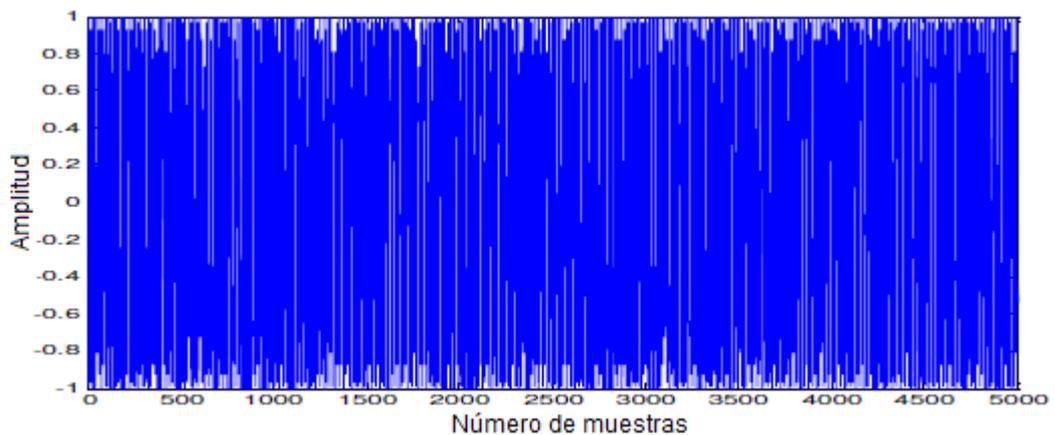


Figura 3. 11: Ejemplo de una señal modulada para  $M=8$  (8-FSK) con  $F_c= 10$  Hz.  
Elaborado por: Autor

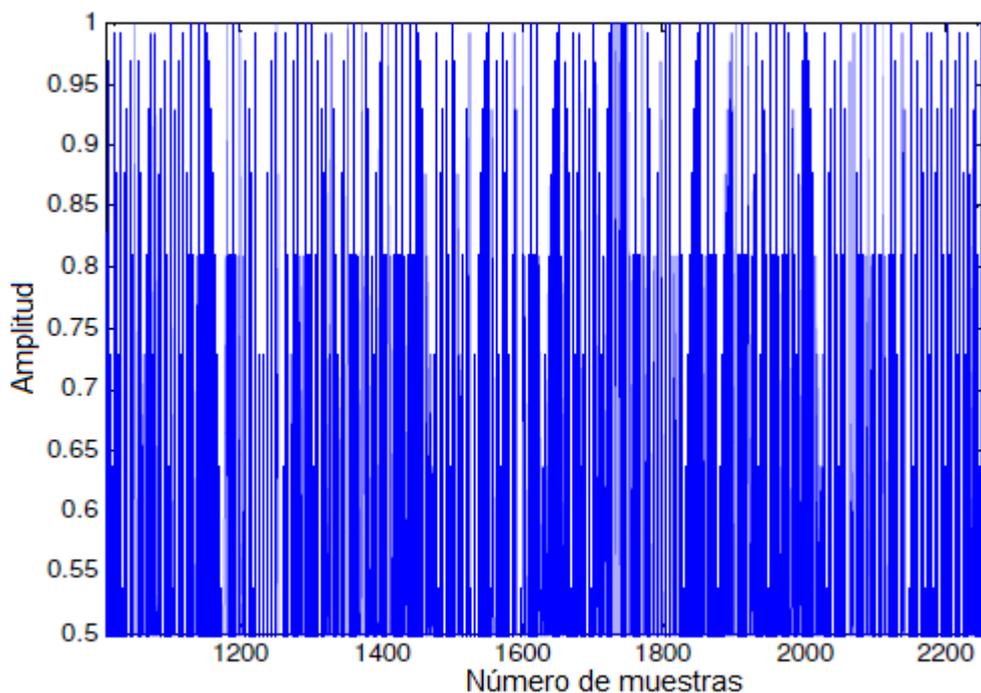


Figura 3. 12: Ejemplo ampliado de una señal modulada 8-FSK con  $F_c= 10$  Hz.  
Elaborado por: Autor

### 3.5.3. Generación de señales 8-PSK.

A continuación, se muestra en la figura 3.13 la generación de 30 señales de la modulación 8-PSK con una frecuencia de portadora ( $F_c$ ) de 10 Hz, una

frecuencia de muestreo ( $F_s$ ) de 25 Hz. Esta señal se cambió a 10 señales moduladas creadas con ruido.

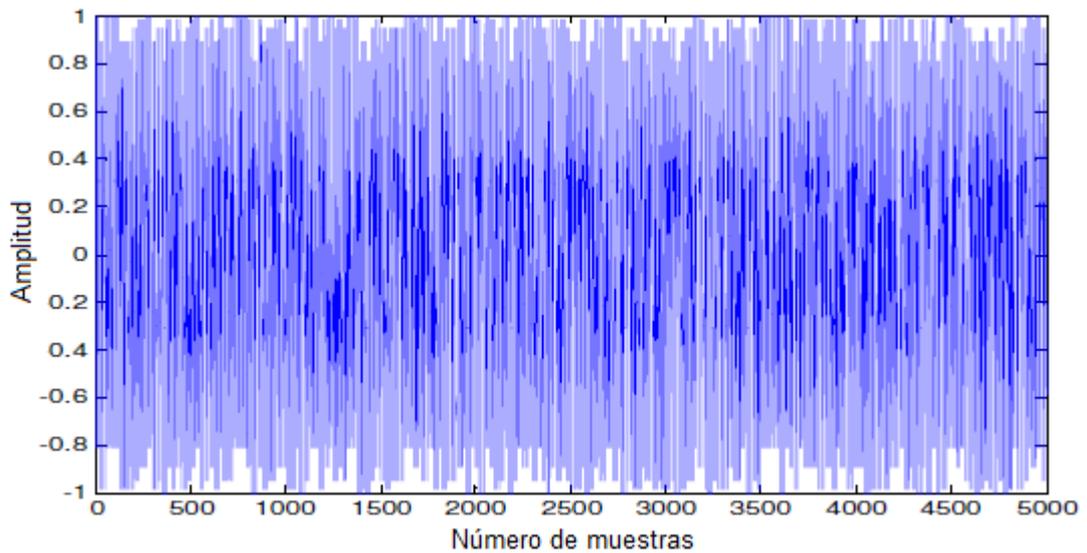


Figura 3. 13: Ejemplo de una señal modulada para  $M=8$  (8-PSK) con  $F_c=10$  Hz.  
Elaborado por: Autor

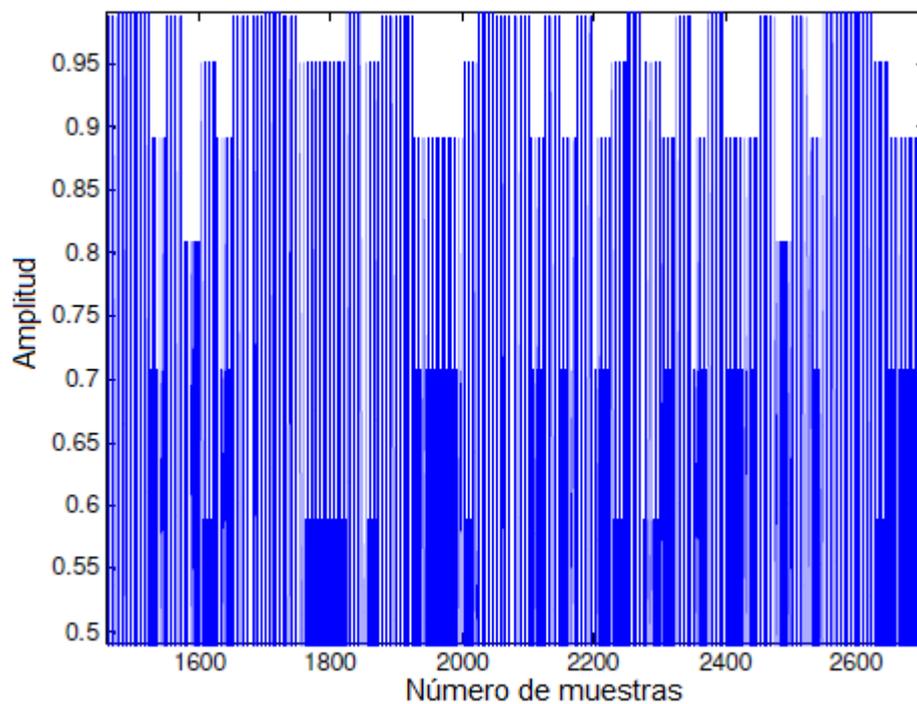


Figura 3. 14: Ejemplo ampliado de una señal modulada 8-PSK con  $F_c=10$  Hz.  
Elaborado por: Autor

#### 3.5.4. Generación de señales 8-QASK.

A continuación, se muestra en la figura 3.15 la generación de la señal de la modulación 8-QASK con una frecuencia de portadora ( $F_c$ ) de 10 Hz, una frecuencia de muestreo ( $F_s$ ) de 25 Hz. Esta señal se obtuvo agregando ruido.

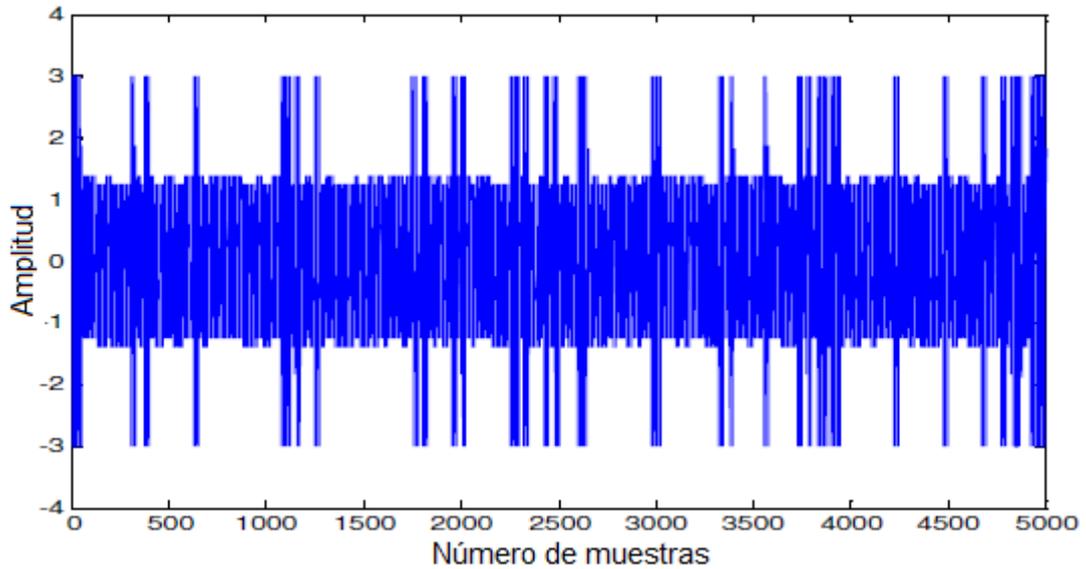


Figura 3. 15: Ejemplo de una señal modulada para  $M=8$  (8-QASK) con  $F_c= 10$  Hz.  
Elaborado por: Autor

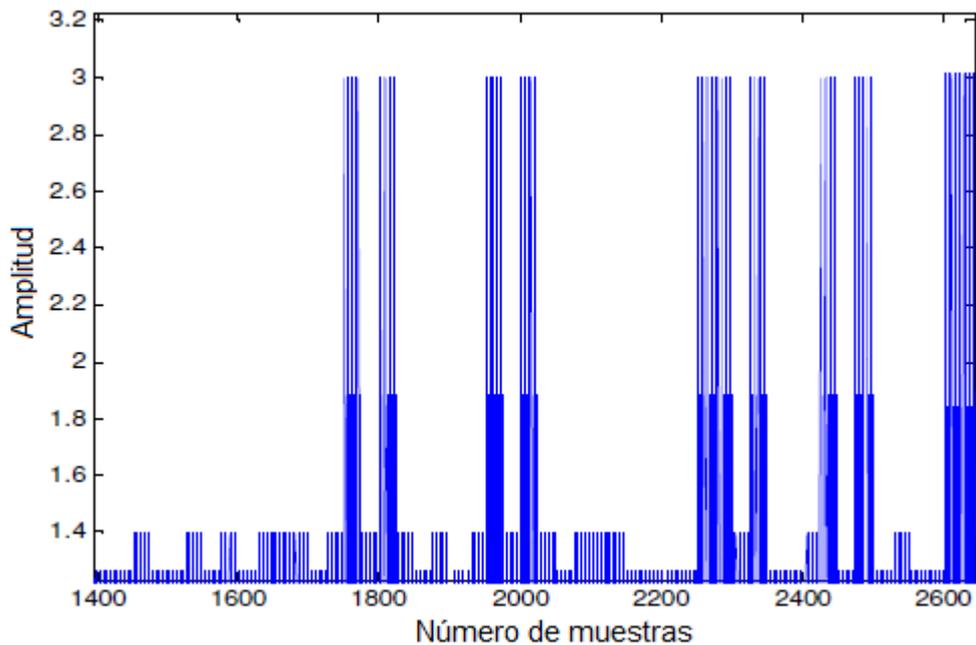


Figura 3. 16: Ejemplo ampliado de una señal modulada 8-QASK con  $F_c= 10$  Hz.  
Elaborado por: Autor

### 3.6. Extracción de características.

En este trabajo, el algoritmo genético y la transformada wavelet discreta se utilizan para la extracción de características en la modulación digital. Se utilizó el algoritmo genético para seleccionar el tipo de wavelet más apropiado y el mejor valor de parámetro de entropía  $P$  de la norma que se utilizará en la transformada wavelet.

### 3.6.1. Algoritmo Genético

En este estudio, los procesos realizados dentro del algoritmo genético se enumeran a continuación:

- 1. Establecimiento de la población inicial:** el primer paso del algoritmo genético es determinar el número de individuos que se utilizarán en la población. En este estudio, 20 individuos fueron seleccionados al azar para la población inicial. Dado que se utilizan 16 tipos de familias wavelet, el parámetro P utilizado en la entropía de la norma se muestra en 4 bits para cada individuo de la población y el valor de precisión para el parámetro P es 1/16. Los datos obtenidos del parámetro P fueron: 1.7320, 1.7990, 1.6660, 1.3320, 1.1990, 1.9320, 1.2660, 1.0660, 1.8650, 1.1330, 1.9980, 1.0000, 1.3990, 1.5330 y 1.4650.
- 2. Mecanismo de inferencia de características:** cuando se considera un individuo aleatorio, se calculan los valores de entropía normal, entropía de Shannon, entropía de energía logarítmica, entropía excedente y entropía umbral representada por el individuo. Los valores de entropía obtenidos aquí se utilizan como propiedades en el vector de propiedad.
- 3. Mecanismo de clasificación:** en el mecanismo de clasificación, el vector de características obtenido en el mecanismo de extracción de características se da a las entradas de un clasificador de RNA de alimentación multicapa y se realiza el proceso de clasificación de estas propiedades.
- 4. Operador de cruce:** 6 de 10 buenos individuos obtenidos se cruzan al azar. La relación cruzada utilizada es del 60%.
- 5. Operador de mutación:** en esta aplicación, el método de inversión de bits se utiliza como operador de mutación. Al aplicar la inversión de bits a un bit aleatorio de los 4 individuos restantes, se obtuvieron 4 individuos nuevos.

El siguiente es un diagrama de bloques del método óptimo de extracción de características basado en entropía desarrollado en la figura 3.17.

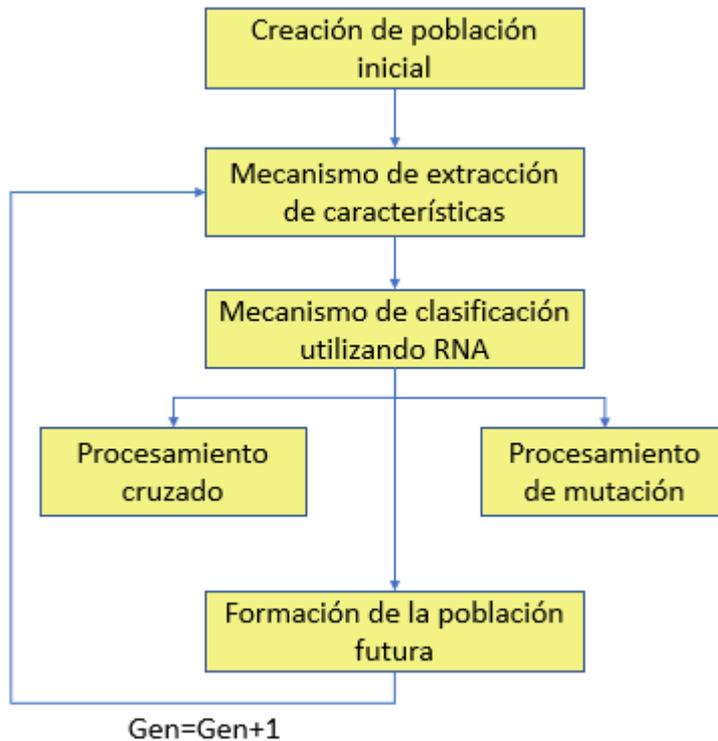


Figura 3. 17: Comparativa del tráfico generado en cada isla para diferentes enfoques de multidifusión.  
Elaborado por: Autor

### 3.6.2. Transformada Wavelet

En este estudio, la transformada wavelet discreta se utiliza junto con un algoritmo genético para eliminar la característica en las señales de modulación digital. Cada una de las señales moduladas obtenidas se derivaron a través de la transformada wavelet y se eliminaron sus propiedades. La figura 3.18 muestra la estructura de 7 niveles para separaciones wavelet de señales de modulación digital, tales como, ASK, FSK, PSK, y QASK. Con la transformada wavelet, se han obtenido los detalles más finos de las señales que no aparecen en otros métodos de reconocimiento de modulación.

La descomposición wavelet se aplica a las señales de modulación digital utilizando los filtros de descomposición de wavelet db2, db4, db5, db10, sym2, sym3, sym5, sym8, bior1.3, bior2.2, bior3.5, bior6.8, coif1, coif2, coif3, coif5. Así, se obtuvo el coeficiente cA de aproximación 7. Los valores de entropía estándar de cada uno de estos coeficientes wavelet se calcularon y normalizaron en 1/200.

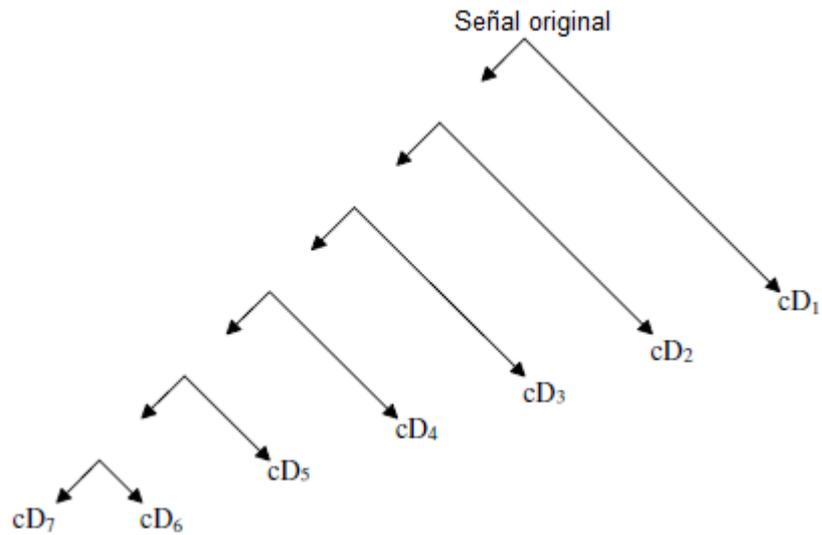


Figura 3. 18: Comparación del tráfico que cruza la red troncal para diferentes enfoques de multidifusión.  
Elaborado por: Autor

Las figuras 3.19, 3.20, 3.21 y 3.22 muestran las señales de muestra del coeficiente de conversión wavelet obtenidas aplicando la transformada wavelet de las modulaciones digitales ASK, PSK, FSK y QASK, respectivamente.

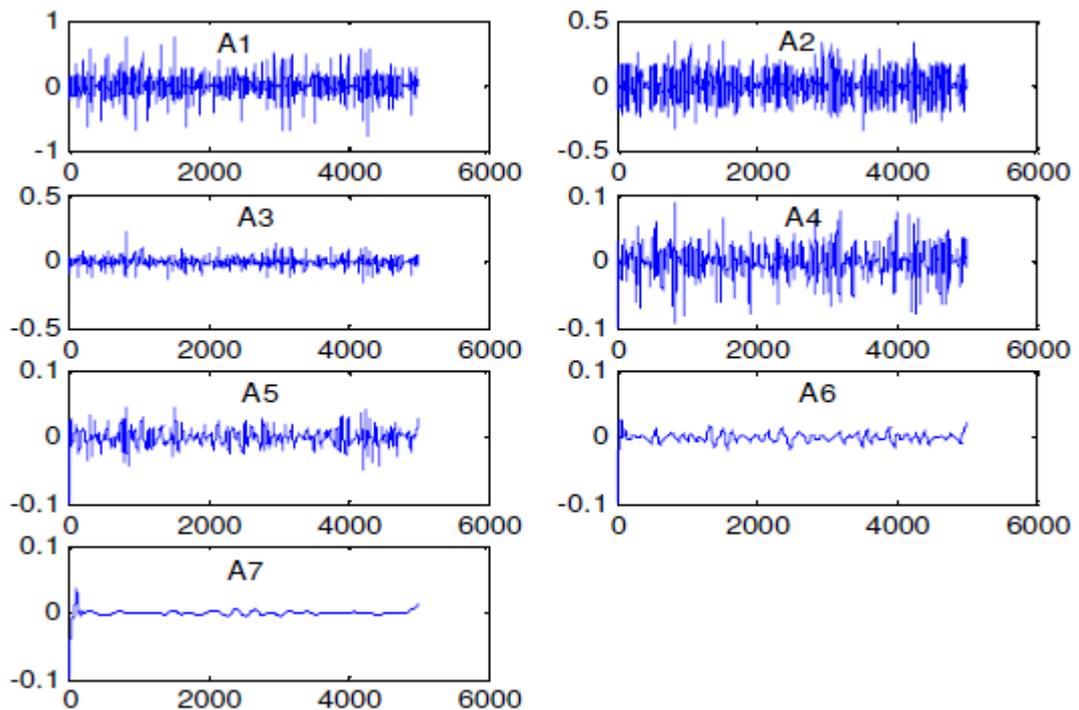


Figura 3. 19: Gráficas de las señales digitales 8-ASK utilizando wavelet.  
Elaborado por: Autor

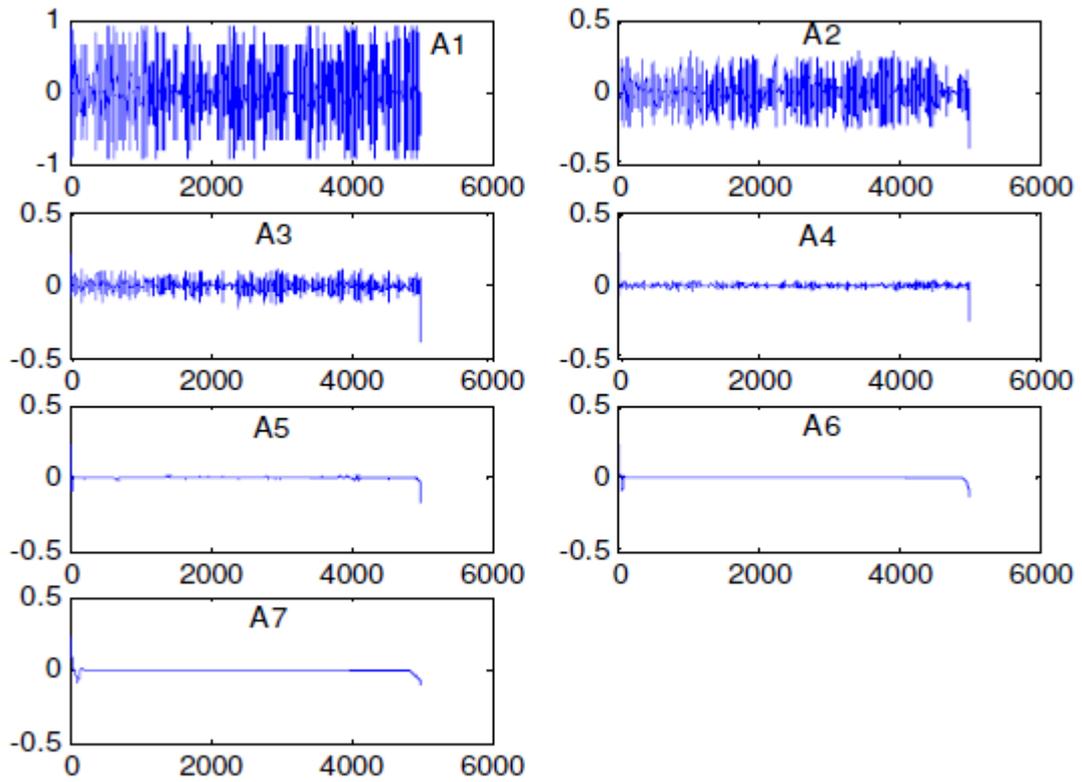


Figura 3. 20: Gráficas de las señales digitales 8-FSK utilizando wavelet.  
Elaborado por: Autor

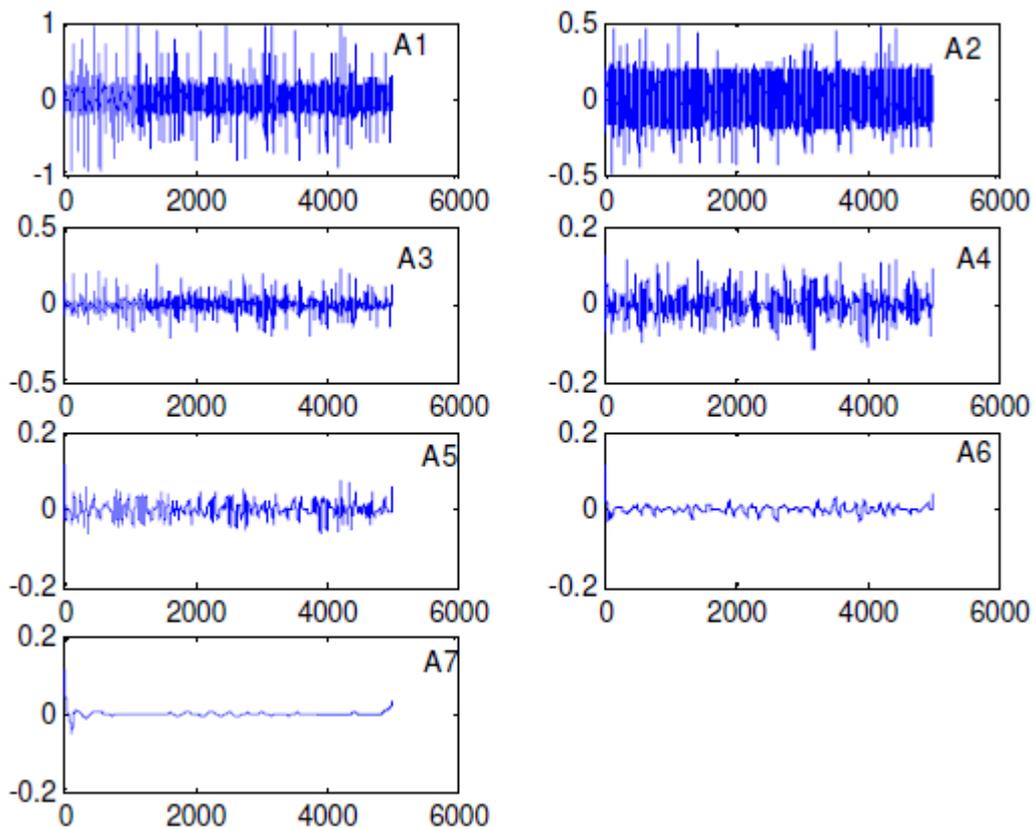


Figura 3. 21: Gráficas de las señales digitales 8-PSK utilizando wavelet.  
Elaborado por: Autor

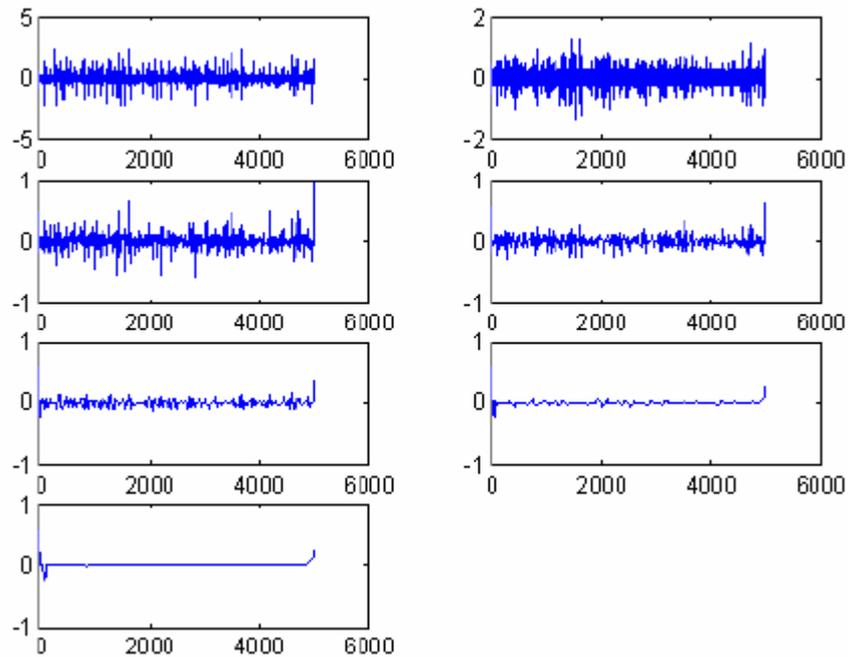


Figura 3. 22: Gráficas de las señales digitales 8-QASK utilizando wavelet.  
Elaborado por: Autor

Las señales obtenidas como resultado de la transformada wavelet fueron sometidos a un proceso de entropía. La entropía es una medida de irregularidad en la señal. Este método se utiliza para extraer las propiedades de las señales de las modulaciones digitales de origen desconocido. La entropía se aplica en muchas áreas, pero se utiliza principalmente en el procesamiento de señales. Existen muchos criterios para la entropía. Estas son entropía de Shannon, entropía de norma, entropía de energía de registro y entropía de umbral.

La entropía estándar se utilizó como entropía en el estudio de reconocimiento de modulación numérica utilizando el método basado en redes neuronales wavelets artificiales genéticas (RNWAG). Los valores de entropía se normalizaron con  $N = 200$  divisiones. Por lo tanto, se encontraron un total de 7 valores de entropía normalizados para cada una de las 60 señales. Al mismo tiempo, cada uno de estos valores de entropía se denomina entropía wavelet.

Al final del proceso de entropía, se extrajo el vector de características de las señales. Este vector tiene un tamaño de  $15 \times 7$  para cada tipo de

modulación. Como la transformada wavelet se toma en 7 niveles, se calculan los valores de entropía estándar de cada una de las señales y se extraen 7 propiedades para cada signo. La matriz total 60X7 se utilizó en la etapa de entrenamiento, y la matriz 60X7 se utilizó en la etapa de prueba.

Como la transformada wavelet se toma en 7 niveles, se han creado 7 señales (A) y se han calculado los valores de entropía de la norma de cada una de estas señales y se han extraído propiedades para cada señal. La matriz 4 (tipos de modulación) x 15 (número de muestras utilizadas para cada tipo de modulación) x 7 (número de características de cada señal de modulación) se utilizó durante la fase de entrenamiento.

### 3.7. Clasificación

En este estudio, se utiliza redes neuronales artificiales para la clasificación de características de las señales de modulaciones digitales. Este mecanismo se implementó para la clasificación de señales mediante el uso de las características obtenidas del mecanismo de extracción de características. Los parámetros de entrenamiento y la estructura de la RNA utilizada en este estudio se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1: Estructura de RNA y parámetros de entrenamiento.

<b>Estructuras</b>	<b>Valores</b>
Nº de capas	3
Nº de neuronas de las capas	Entradas: 7 Latencia: 15 Salida: 1
Parámetros de aprendizaje reglas de aprendizaje	Propagación
Constante de impulso	0.95
Error de trama total	0.00001

Elaborado por: Autor

Estos fueron seleccionados para un rendimiento óptimo mediante varios experimentos diferentes, a saber, el número de neuronas de capa oculta, los valores de impulso y las tasas de aprendizaje, y los tipos de funciones de

activación. La figura 3.23 muestra el logro de aprendizaje de la RNA utilizado con las características obtenidas por este método. Se hizo que, el número de capas ocultas, el tamaño de la capa oculta, el valor del impulso constante, la velocidad de aprendizaje y el tipo de activación se seleccionaron para un rendimiento óptimo después de varios experimentos diferentes.

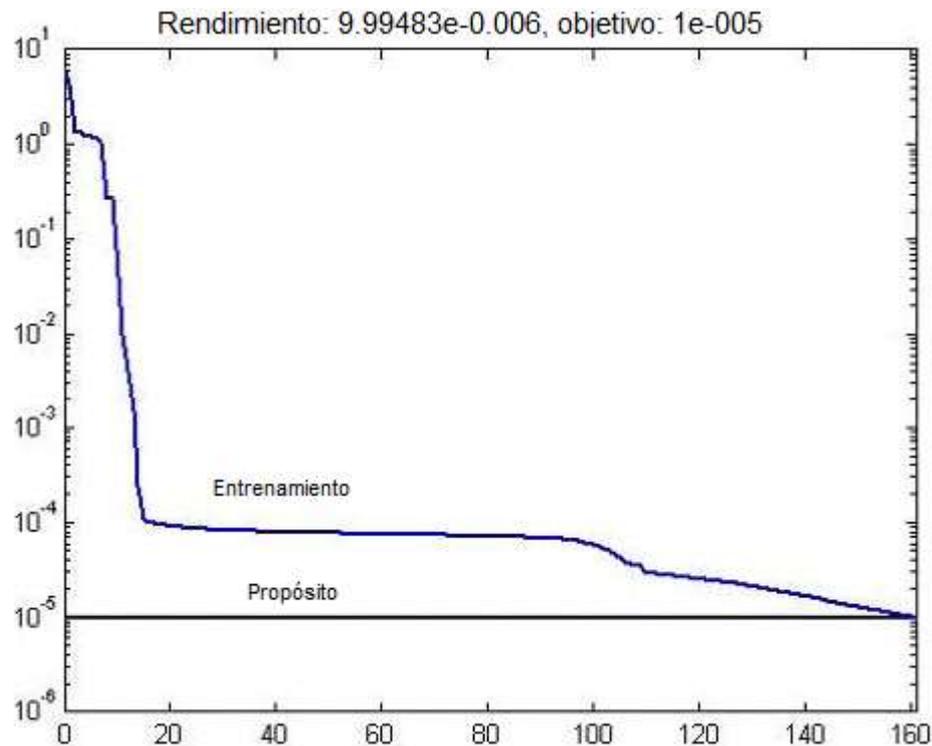


Figura 3. 23: Gráfica del logro de aprendizaje de la RNA.  
Elaborado por: Autor

En el aprendizaje de la RNA, se utilizaron 60 señales de modulaciones digitales. Los tipos de modulación son 8-ASK = 1, 8-FSK = 2, 8-PSK = 3 y 8-QASK = 4. Los pasos de este estudio son:

- El vector de características 7X60 obtenido del mecanismo de extracción de características se proporciona a la entrada del clasificador de la RNA. El área de decisión en la salida del clasificador de la RNA consta de 4 modulaciones digitales.
- El error cuadrático medio (*Mean Square Error, MSE*) se obtiene al final del entrenamiento del clasificador de la RNA.
- El valor de error objetivo (*Target Error Value, TEV*) del clasificador de error de la RNA es menos deseable para TEV o individual igual a MSE. Si esto se nota, la función de rendimiento o desempeño físico de este individuo será muy alta. Esta comparación de MSE-TEV se ha utilizado

para algoritmos genéticos, como la función de rendimiento físico de los individuos de la población.

### 3.8. Discusión de los resultados experimentales.

Se evaluaron experimentalmente 4 señales diferente en las que se incluyen las modulaciones digitales 8-ASK, 8-PSK, 8-FSK y 8-QASK. Se tomaron 15 muestras de cada señal y se utilizaron 60 señales en el experimento. Estas señales se utilizan durante la fase de prueba y entrenamiento. Se obtuvo una tasa de éxito del 100% de estas señales utilizadas en la fase de prueba.

Cada una de estas señales se utiliza como señal de ruido con un ancho de ruido blanco diferente. (Relación señal/ruido (SNR) = 0-60 dB). Para 60 señales se utilizó el mecanismo de extracción y clasificación de RNWAG. Estas señales también fueron utilizadas para evaluar el rendimiento de la RNWAG. En estos experimentos, se obtuvo una clasificación precisa del 95% de entrenamiento de RNWAG entre 4 clasificadores de señales digitales diferentes. La confiabilidad y validez del enfoque propuesto para la extracción óptima de características de las señales moduladas digitales es muy alta. El valor del parámetro P obtenido utilizando algoritmos genéticos, el valor del parámetro de la familia wavelet y el valor de error y el clasificador de rendimiento del algoritmo RNWAG se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3. 2: Valores óptimos obtenidos mediante el uso del algoritmo y rendimiento de clasificación RNWAG.

Obtención del parámetro P óptimo		Valor de error	Clasificación de rendimiento (RNWAG)
1.732	coif5	0.000010	98%
1.799	coif1	0.000010	97%
1.000	db5	0.000008	95%
1.667	sym5	0.000010	98%
1.399	db2	0.000009	96%

1.266	db10	0.000010	93%
1.998	bior2.2	0.000009	95%
1.865	db4	0.000009	96%
1.465	sym8	0.000010	98%
1.998	coif3	0.000006	98%
1.533	sym2	0.000009	95%
1.535	bior1.3	0.000009	96%
1.666	db10	0.000009	94%

Elaborado por: Autor

## Conclusiones

Aquí se destacan las respuestas a los objetivos específicos y las contribuciones del trabajo de titulación.

- Se describe el uso de la transformada wavelet para la identificación de modulación de señales digitales. La transformada wavelet puede extraer efectivamente las características transitorias en una señal de comunicación digital, produciendo patrones distintos para una identificación simple.
- El objetivo principal del presente trabajo fue realizar una aplicación inteligente de reconocimiento de modulaciones digitales que permita el reconocimiento automático de las técnicas de modulación digital comúnmente utilizadas en entornos de telecomunicaciones, ya sea aplicaciones militares y/o civiles.
- Las aplicaciones de reconocimiento de modulación digital que utilizan la estructura RNWGA se han realizado utilizando diferentes tipos de señales de modulación digital. Los resultados obtenidos de estas aplicaciones muestran un adecuado rendimiento del reconocimiento de señales moduladas digitalmente mediante la RNWGA. Estos resultados muestran que RNWGA es un método adecuado para definir señales de modulación digital.

## Recomendaciones

- En este estudio, se utiliza un número limitado de señales moduladas digitalmente. En estudios posteriores en este campo, el rendimiento de RNWGA pueden probarse utilizando una base de datos más amplia utilizando inteligencia artificial en redes de telecomunicaciones.
- También, se podría desarrollar la clasificación de modulación basada en transformación Wavelet para comunicación 5G y UAV en canal de desvanecimiento de múltiples rutas

## Bibliografías

- Bensky, A., & Safari, an O. M. C. (2019). *Short-range Wireless Communication, 3rd Edition*.  
<https://login.proxy.bib.uottawa.ca/login?url=https://learning.oreilly.com/library/view/-/9780128154069/?ar&orpq&email=^u>
- Choi, K., & Liu, H. (Eds.). (2016). Amplitude Modulation. En *Problem-Based Learning in Communication Systems Using Matlab and Simulink* (pp. 90–100). John Wiley & Sons, Inc.  
<https://doi.org/10.1002/9781119060239.ch9>
- Gott. (2019). ASK Modulator. En *Your solution to education training system:* (p. 21).
- Jeong, J. H., & Jeong, J.-M. (2012). Binary amplitude shift keying based signal processing for brillouin optical correlation domain analysis. *Journal of the Korean Physical Society*, 61(12), 1975–1980.  
<https://doi.org/10.3938/jkps.61.1975>
- Morales P., E. R., & Robalino B., J. L. (2013). *Laboratorio virtual para la aplicación de modulación y demodulación analógica utilizando la plataforma LabView para los Laboratorios de la Carrera de Electrónica y Comunicaciones de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial* [Trabajo de Grado, Universidad Técnica de Ambato].  
<https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/5848>
- Tekin, A., Yuce, M. R., Shabani, J., & Wentai Liu. (2006). A low-power FSK modulator/demodulator for an MICS band transceiver. *2006 IEEE Radio and Wireless Symposium*, 159–162.  
<https://doi.org/10.1109/RWS.2006.1615119>

Tomasi, W. (2010). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson Educación.

Valero Jiménez, D. (2015). *Diseño y simulación de módem multitono discreto (DMT)* [Trabajo Fin de Grado, Universidad de Castilla - La Mancha]. <https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/6933>

Wilson, S. K., Wilson, S., & Biglieri, E. (2016). *Academic Press Library in Mobile and Wireless Communications*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07210-1>

Xiao, X., Chen, M., & Li, X. (2011). *Design and implementation of ASK heterodyne asynchronous demodulation receiver*. 81951D. <https://doi.org/10.1117/12.900827>



Presidencia  
de la República  
del Ecuador



Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes



## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Alvarado Pihuave Xavier Alonso** con C.C: # 092510659-3 autor del trabajo de titulación: Implementación de un sistema de clasificación inteligente mediante la transformación Wavelets utilizados en modulaciones digitales, previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 6 de marzo del 2020

f. \_\_\_\_\_

Nombre: **Alvarado Pihuave, Xavier Alonso**

C.C: 092510659-3



## REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

### FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Implementación de un sistema de clasificación inteligente mediante la transformación Wavelets utilizados en modulaciones digitales.		
<b>AUTOR(ES)</b>	Alvarado Pihuave, Xavier Alonso		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	M. Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio; M. Sc. Zamora Cedeño, Néstor Armando / M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Sistema de Posgrado		
<b>PROGRAMA:</b>	Maestría en Telecomunicaciones		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Magister en Telecomunicaciones		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	6 de marzo del 2020	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	52
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Teoría de la Comunicación, Sistemas de Comunicaciones		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Comunicaciones, Modulación, Digitales, Transformada, Wavelet, Frecuencia, Fase, Amplitud		
<b>RESUMEN/ABSTRACT:</b>	<p>El presente documento presenta el tema de titulación denominado “Implementación de un sistema de clasificación inteligente mediante la transformación Wavelets utilizados en modulaciones digitales” y en este se muestra los conocimientos adquiridos en la formación de máster. El proyecto tuvo complicaciones al inicio debido al desconocimiento de como emplear el método de la transformada Wavelet en MatLab, así como también, del reconocimiento de patrones sobre los esquemas de modulaciones digitales. Estos esquemas de modulación fueron abordados sin inconvenientes, pero se tenía que realizar el reconocimiento de patrones, así como también la extracción de características utilizando redes neuronales. Posteriormente se realiza la generación de las modulaciones por desplazamiento de amplitud (ASK), frecuencia (FSK) y fase (PSK). Las modulaciones analizadas para la clasificación inteligente fueron 8-ASK, 8-FSK, 8-PSK y 8-QASK, estas se extraen las características mediante algoritmos genéticos y transformada wavelet. Finalmente, se realiza la discusión de los resultados experimentales obtenidos.</p>		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> 0982248687	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:xavier.alvarado@outlook.com">xavier.alvarado@outlook.com</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):</b>	<b>Nombre:</b> Manuel Romero Paz		
	<b>Teléfono:</b> 0994606932		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:mromeropaz@yahoo.com">mromeropaz@yahoo.com</a>		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			