

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

<TÍTULO DEL TRABAJO FIN DE  
GRADO>

GRADO EN INGENIERÍA DE  
SISTEMAS ELECTRÓNICOS

JOSÉ MIGUEL GALEAS MERCHÁN, MÁLAGA, 2021



## <TÍTULO DEL TRABAJO FIN DE GRADO>

**Autor:** <Nombre del autor>

**Tutor:** <Nombre del tutor>

**Cotutor:** <Nombre del cotutor> (elimina esta línea si no hay cotutor)

**Departamento:** <Nombre de departamento>

**Titulación:** Grado en Ingeniería de <nombre de la titulación>

**Palabras clave:** Palabras clave (separadas por coma) que describen y caracterizan el tema del trabajo.

### Resumen

El resumen debe ser una breve descripción del contexto del proyecto, sus objetivos y los resultados obtenidos. Se recomienda que no exceda esta página.



## <TÍTULO DEL TFG EN INGLÉS>

**Author:** <Nombre del autor>

**Supervisor:** <Nombre del tutor>

**Co-supervisor:** <Nombre del cotutor> (elimina esta línea si no hay cotutor)

**Department:** <Department name>

**Degree:** Grado en Ingeniería de <nombre de la titulación>

**Keywords:** Keywords (separated by commas) describing and characterizing the topic of the work.

### **Abstract**

The abstract should briefly describe the project context, goals and obtained results. It should not exceed this page.



En caso de dedicatoria,  
se realiza con esta página.  
No es obligatoria, si bien es recomendable.

*El autor*





# Agradecimientos

Este apartado es opcional. En él se incluirían los agradecimientos personales y profesionales. Si no los hubiere, debe eliminarse esta página y la siguiente (para ello puedes comentar la línea 48 de A0.MiTFG.tex).



# Acrónimos

<b>ETSIT</b>	Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación
<b>PFC</b>	Proyecto Fin de Carrera
<b>TFG</b>	Trabajo Fin de Grado
<b>TFM</b>	Trabajo Fin de Máster
<b>UMA</b>	Universidad de Málaga



# Índice



# Índice

<b>Resumen</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>IX</b>
<b>Acrónimos</b>	<b>XI</b>
<b>Índice</b>	<b>XIII</b>
<b>I Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1 Introducción y visión general</b>	<b>3</b>
1.1 Problemática de los accidentes de tráfico . . . . .	3
1.2 Problemática de las ondas electromagnéticas . . . . .	3
1.3 Estado del arte . . . . .	4
1.4 Esquemas de señalización . . . . .	4
1.5 Estructura del documento . . . . .	4
1.6 Ámbito de aplicación . . . . .	4
1.7 Objetivo . . . . .	5
<b>II Desarrollo del proyecto</b>	<b>7</b>
<b>2 Tecnología empleada</b>	<b>9</b>

2.1	Plataforma hardware . . . . .	9
2.1.1	Red Pitaya . . . . .	10
2.2	Plataforma software . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Sistema de comunicación</b>	<b>11</b>
3.1	Estándar de los sistemas VLC . . . . .	11
3.2	Enlace de luz . . . . .	13
3.2.1	Transmisor . . . . .	13
3.2.2	Receptor . . . . .	14
3.3	Sistema de partida . . . . .	14
3.4	Mejoras respecto al sistema anterior . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Fundamentos teóricos</b>	<b>17</b>
4.1	Introducción a los esquemas de señalización . . . . .	17
4.2	Pulsos alternos . . . . .	18
4.3	Cancelación de pulsos . . . . .	21
4.4	4-PPM . . . . .	24
4.5	Comparativa 4-PPM frente a Inverse 4-PPM . . . . .	26
4.6	Sistemas de decisión . . . . .	27
4.6.1	Hard-decoding . . . . .	27
4.6.2	Soft-decoding . . . . .	29
4.6.3	Algoritmo de Viterbi . . . . .	31
4.6.4	Comparativa entre los sistemas de decisión . . . . .	33
4.7	Conclusiones . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Implementación</b>	<b>37</b>
5.1	Sistema general . . . . .	37
5.2	Transmisor . . . . .	37
5.3	Receptor . . . . .	37
5.4	Sistema de decisión . . . . .	38
<b>6</b>	<b>Pruebas</b>	<b>39</b>



---

<b>III Parte tercera.</b>	<b>41</b>
<b>Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>43</b>
<b>IV Apéndices</b>	<b>45</b>
<b>A Manual de uso</b>	<b>47</b>
A.1 Primera sección . . . . .	47
<b>Bibliografía</b>	<b>49</b>



# Índice de figuras

3.1	División en frecuencia para los tres tipos de capas PHY. Fuente [X]. . . .	12
4.1	Diagrama de Trellis de la codificación pulsos alternos. . . . .	19
4.2	Codificación con pulsos alternos. . . . .	20
4.3	Potencia espectral frente a frecuencia normalizada. . . . .	21
4.4	Diagrama de Trellis de la codificación cancelación de pulsos. . . . .	22
4.5	Codificación con cancelación de pulsos. . . . .	23
4.6	Potencia espectral frente a frecuencia normalizada. . . . .	24
4.7	Pareja de bits con su respectiva codificación. . . . .	25
4.8	Codificación 4-PPM. . . . .	25
4.9	Pareja de bits con su respectiva codificación. . . . .	27
4.10	Sistema <i>Hard-decoding</i> . . . . .	28
4.11	Sistema <i>Soft-decoding</i> . . . . .	30
4.12	Algoritmo de Viterbi. . . . .	32
4.13	Sistemas de decisión con pulsos alternos. . . . .	33
4.14	Sistemas de decisión con cancelación de pulsos. . . . .	34
4.15	Sistemas de decisión con 4-PPM. . . . .	35
4.16	Comparativa de los esquemas de codificación con su mejor sistema de deicisión. . . . .	36



# Índice de Tablas

3.1	Clasificación de dispositivos según el estándar IEEE 802.15.7. Fuente [6]	13
-----	---	----



# **Parte I**

## **Introducción**





# Capítulo 1

## Introducción y visión general

### Contenido

1.1	Problemática de los accidentes de tráfico . . . . .	3
1.2	Problemática de las ondas electromagnéticas . . . . .	3
1.3	Estado del arte . . . . .	4
1.4	Esquemas de señalización . . . . .	4
1.5	Estructura del documento . . . . .	4
1.6	Ámbito de aplicación . . . . .	4
1.7	Objetivo . . . . .	5

### 1.1. Problemática de los accidentes de tráfico

Poner lo que hice para la introducción en proyectos y sistemas. Hablar sobre la necesidad de la aplicación de VVLC para mejorar la seguridad vial.

### 1.2. Problemática de las ondas electromagnéticas

Poner lo que hice para la introducción en proyectos y sistemas. Sobre todo para contextualizar por qué es mas conveniente no usar esta comunicación.

### **1.3. Estado del arte**

Historia de las VLC y de las VVLC, comentar cuando y como surgió esta idea y hasta donde se ha desarrollado actualmente

También tener un apartado para hablar sobre los proyectos de VVLC que se han tomado de referencia para entender y desarrollar este proyecto. Introducción proyectos y sistemas.

### **1.4. Esquemas de señalización**

Un esquema de codificación estandariza la codificación de caracteres mediante la definición de un método único para representar los datos de tipo carácter.

La señal que se desea enviar no tiene por qué ser transmitida literalmente ya que las señales digitales tienen la posibilidad de ser codificadas para mejorar, por ejemplo, la detección de la misma en recepción y la probabilidad de corregir errores.

Por tanto, el enfoque de este proyecto es desarrollar distintos esquemas de codificación para conocer sus propiedades específicas y sus ventajas e inconvenientes en las comunicaciones por luz visible. Para implementar dichos esquemas se desarrollará tanto el codificador (módulo del transmisor) como el decodificador (módulo del receptor), además de distintos sistemas de decisión para hacer más robusta la transmisión y disminuir la probabilidad de errores.

### **1.5. Estructura del documento**

En esta sección, se explican los posteriores capítulos u otra información adicional que el proyecto contenga.

### **1.6. Ámbito de aplicación**

Desarrollar que el principal ámbito de aplicación del proyecto es en la comunicación vehicular pero que puede tener importancia en otras aplicaciones (cualquier tipo de comunicación)

## 1.7. Objetivo

El objetivo global de este proyecto es la realización de un sistema de comunicación por luz visible orientado a vehículos a través de una matriz de puertas lógicas programable (FPGA) que actúa de intermediaria entre el transmisor y el receptor, cumpliendo con el estándar IEE 802.15.7-218.

Este objetivo se desarrollará implementando varias técnicas de transmisión y recepción siendo estas la implementación de diferentes esquemas de codificación de la señal, desarrollando el codificador y el decodificador, y la implementación de distintos sistemas de decisión para interpretar la señal recibida antes de decodificarla. Además, el sistema deberá tener robustez ante posibles efectos adversos provocados por las condiciones meteorológicas y un rango de alcance lo suficientemente alto para cubrir una distancia considerable entre coches.



# **Parte II**

## **Desarrollo del proyecto**



# Capítulo 2

## Tecnología empleada

En este apartado se van a explicar las plataformas o elementos, tanto hardware como software, sobre los que se ha desarrollado este proyecto.

### Contenido

<b>2.1</b>	<b>Plataforma hardware</b>	<b>9</b>
2.1.1	Red Pitaya	10
<b>2.2</b>	<b>Plataforma software</b>	<b>10</b>

### 2.1. Plataforma hardware

El sistema hardware empleado va a ser un dispositivo FPGA. Una matriz de puertas lógicas programables (FPGA) se define como un dispositivo electrónico programable que contiene bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad puede ser configurada en el momento, mediante un lenguaje de descripción especializado. La lógica programable puede reproducir desde funciones tan sencillas como las llevadas a cabo por una puerta lógica o un sistema combinacional hasta complejos sistemas en un chip.

### **2.1.1. Red Pitaya**

## **2.2. Plataforma software**

Hablar sobre la plataforma sobre la que se ha programado la fpga (vivado) comentando sus características y sus principales funciones y en que aplicaciones es recomendable su uso. Hablar sobre que el programa en c que es el que ejecuta las transmisiones y recepciones y es el encargado de poner en funcionamiento el enlace además de comprobar los paquetes, etc.



# Capítulo 3

## Sistema de comunicación

### Contenido

<b>3.1 Estándar de los sistemas VLC</b>	<b>11</b>
<b>3.2 Enlace de luz</b>	<b>13</b>
3.2.1 Transmisor	13
3.2.2 Receptor	14
<b>3.3 Sistema de partida</b>	<b>14</b>
<b>3.4 Mejoras respecto al sistema anterior</b>	<b>14</b>

### 3.1. Estándar de los sistemas VLC

La entidad que realiza el estándar es IEEE 802 que realizó el primer estándar oficial de comunicación por luz visible en 2011 [802.15.7-2011]. Este estándar fue revisado en 2018 y se publicó una segunda versión que es 802.15.7-2018 *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 15.7: Short-Range Optical Wireless*.

En las comunicaciones ópticas inalámbricas (OWC) los datos se transmiten a través de fuentes ópticas, como diodos emisores (LED). Se fusiona la iluminación y las comunicaciones de datos en aplicaciones como farolas, letreros, señales de tráfico, vehículos etc. Este estándar define el uso de las comunicaciones ópticas inalámbricas. Algunas de las características que se encuentran en el estándar son las siguientes:

- Topologías como estrella, P2P (punto a punto) y broadcast (difusión amplia).
- Tamaño de dirección (16 o 64 bits).
- Acceso aleatorio programado o ranurado con transmisión para evitar colisiones.
- Protocolo para transmisiones fiables.
- Indicación de la calidad de longitud de onda.
- Soporte de atenuación.
- Soporte de visibilidad.
- Soporte de estabilización de color.

En esta versión se definen una capa física (PHY) y una subcapa de acceso de control al medio (MAC) para comunicaciones ópticas inalámbricas de corto alcance en medios ópticamente transparentes que utilizan longitudes de onda de 1000 nm a 190 nm. Es capaz de tener velocidad de datos suficiente para admitir tanto servicios de vídeo como de audio, así como también considera la movilidad del enlace óptico, su compatibilidad con las infraestructuras, los problemas debido al ruido y la interferencia con fuentes como la luz natural.

Dependiendo de la aplicación y de la tasa de datos el estándar permite tres tipos de capas PHY. PHY I está prevista para aplicaciones exteriores con baja velocidad de datos (entre 11.67 kb/s y 267 kb/s). Las capas PHY II y PHY III se proponen para aplicaciones de interior con velocidad de datos moderada (entre 1.25 Mb/s y 96 Mb/s). Esta diferencia se ilustra en la figura 3.1

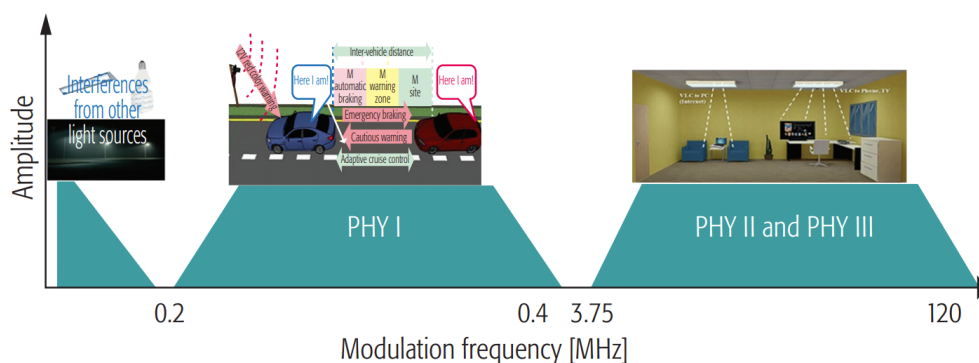


Figura 3.1: División en frecuencia para los tres tipos de capas PHY. Fuente [X].

Además, el estándar especifica tres clases de dispositivos VLC cuyas características concretas se muestran en la tabla 1.1. En dicha tabla se puede comprobar como la fuente de luz necesaria para la emisión y recepción es débil para móvil, pero debe ser intensa para infraestructuras y vehículos. Además, las infraestructuras no incluyen movilidad física mientras que tanto móviles como vehículos sí. Una característica muy importante es el rango de alcance, este rango es corto para móvil y largo para vehículos mientras que para infraestructuras puede ser corto o largo. Por último, se especifica la tasa de datos (número de bits por unidad de tiempo) que es alta para móvil, baja para los vehículos y alta o baja para las infraestructuras.

	Infraestructura	Móvil	Vehículo
<b>Fuente de luz</b>	Intensa	Débil	Intensa
<b>Movilidad física</b>	No	Sí	Sí
<b>Rango</b>	Corto/Largo	Corto	Largo
<b>Tasa de datos</b>	Alta/Baja	Alta	Baja

Tabla 3.1: Clasificación de dispositivos según el estándar IEEE 802.15.7. Fuente [6]

Este estándar proporciona una visión global y común para las comunicaciones ópticas inalámbricas de corto alcance. Además, asegura inmunidad a interferencias electromagnéticas y a sistemas radiofrecuencia.

## 3.2. Enlace de luz

Para probar el proyecto y verificar el funcionamiento real del mismo se parte de un enlace de luz formado por un transmisor y un receptor. A continuación se van a describir brevemente para tener una idea de su funcionamiento e importancia ya que han sido heredados y no han sido desarrollados en este proyecto.

### 3.2.1. Transmisor

El funcionamiento del transmisor se puede desglosar en tres etapas:

- Adaptación de nivel: se encarga de convertir los niveles lógicos de la señal de entrada ('1' codificado como 1 V y '0' codificado como -1 V) en niveles de tensión útiles para el modulador.
- Ajuste de corriente: su función es excitar a los dispositivos LED con la corriente reconfigurada.

- **Habilitación de baja frecuencia:** Por debajo de 100 KHz, el nivel de tensión alto que se entrega al modulador desciende abruptamente y el ciclo de trabajo de la señal se ve dañado por lo que esta etapa consiste en eliminar dicha restricción.

Este dispositivo ha sido incorporado a un faro de coche para que la simulación de la transmisión sea más realista como se ve en la figura x.

### **3.2.2. Receptor**

El funcionamiento del receptor se puede desglosar en tres etapas:

- **Fotodetector:** se encarga de transformar la luz pulsada emitida por el transmisor en corriente.
- **Amplificador de transimpedancia:** realiza la tarea de convertir la corriente del fotodetector en tensión.
- **Amplificador no inversor:** amplifica la señal para dar más sensibilidad al receptor.

## **3.3. Sistema de partida**

Hay que mencionar que este trabajo coge el testigo de otro trabajo desarrollado por un compañero. Dicho trabajo consiste, a grandes rasgos, en el desarrollo del filtro adaptado para mejorar la comunicación por luz visible.

## **3.4. Mejoras respecto al sistema anterior**

Tras analizar el proyecto del que se partía se concluyó que una manera de mejorar el sistema de comunicación y seguir el camino de investigar los sistemas de comunicación por luz visible era desarrollar e implementar varios esquemas de señalización y varios sistemas de decisión de la señal para analizar sus diferentes comportamientos y cuantificar las mejoras. Estas mejoras, principalmente, están centradas en proporcionar mayor robustez al sistema para poder interpretar y decodificar la señal de la mejor manera posible cuando se trabaje en condiciones adversas como pueden ser situaciones en las que la señal se mezcle con

mucho ruido o simplemente cuando se transmita información a mucha distancia y la fuerza de la señal disminuya.

En los siguientes apartados se van a desarrollar tanto su fundamento teórico como su implementación en una FPGA de los dos métodos implementados.



# Capítulo 4

## Fundamentos teóricos

### Contenido

4.1	Introducción a los esquemas de señalización . . . . .	17
4.2	Pulsos alternos . . . . .	18
4.3	Cancelación de pulsos . . . . .	21
4.4	4-PPM . . . . .	24
4.5	Comparativa 4-PPM frente a Inverse 4-PPM . . . . .	26
4.6	Sistemas de decisión . . . . .	27
4.6.1	Hard-decoding . . . . .	27
4.6.2	Soft-decoding . . . . .	29
4.6.3	Algoritmo de Viterbi . . . . .	31
4.6.4	Comparativa entre los sistemas de decisión . . . . .	33
4.7	Conclusiones . . . . .	34

### 4.1. Introducción a los esquemas de señalización

En el ámbito de la comunicación existen múltiples esquemas de codificación digital con diferentes propiedades como probabilidad de bit, ciclo de trabajo, ancho de banda, etc. A la hora de estudiar un esquema de codificación para hacer su elección hay que tener en cuenta tres aspectos fundamentales, que son:

- Flickering: se define como el cambio de la luz provocado por la conmutación entre encendido y apagado (1 y 0) en intervalos muy cortos. Estos

parpadeos, si se producen a una velocidad perceptible por el ojo humano, pueden llegar a ser molestos y causar dolor.

- Rendimiento óptico.
- La capacidad para controlar la atenuación o el dimming, provocado por la variación de la intensidad de la luz, en esquemas de codificación con ancho de pulso de la señal variable.

El estándar de comunicaciones por luz visible IEEE 802.15.7 usa como esquema de señalización la codificación Manchester. Continuando con el estudio de los esquemas de señalización, a continuación, se van a desarrollar otras opciones de esquemas de codificación con características diferentes para estudiar su eficacia e impacto en las comunicaciones por luz visible. Los esquemas a desarrollar son codificación por pulsos alternos, cancelación de pulsos y 4-ppm. También se hará una comparativa de 4-ppm frente a Inverse 4-ppm para comparar sus prestaciones y el efecto de transmitir mayor cantidad de “unos” que de “ceros”.

Es importante destacar que en un primer momento también se planteó el desarrollo de codificación 4-PWM pero se descartó su implementación debido a su escasa capacidad para controlar el dimming. Esto provocaba que la intensidad de la luz fluctuara mucho a lo largo de una transmisión siendo perceptible y molesto para el ojo humano.

## 4.2. Pulsos alternos

El primer esquema de codificación desarrollado es pulsos alternos. Este esquema se puede considerar como una versión de la codificación Manchester pero añadiendo tiempos de silencio. Estos tiempos de silencio añadidos en la transmisión se emplean para diseñar formatos OOK con memoria mediante el uso de la alternancia de posición de pulsos. Lo que proporciona una mejora notable en el rendimiento y una configuración del espectro favorable. Este formato de pulsos alternos tiene un ciclo de trabajo bajo, lo que provoca que esta codificación sea ventajosa en términos de modulación de intensidad y detección directa. En este esquema, utilizamos los tiempos de silencio y los pulsos alternos para modificar las estadísticas de la secuencia de amplitud con respecto a las estadísticas de la secuencia de mensajes.

De esta manera, el bit de información '0' siempre se codifica con la ausencia de pulso '00', mientras que el bit '1' se representa con un pulso que va variando



su posición con cada transmisión del '1'. Gracias a aplicar este esquema, se reduce el número de pulsos transmitidos en otros esquemas de señalización como Manchester o Miller.

La figura 4.1 representa el diagrama de Trellis de este esquema de codificación tal y como se ha descrito anteriormente. Este modelo consiste en dos estados, imprescindibles para la alternancia de pulsos. Lo más destacable del diagrama es que siempre que se codifica un '0' nos mantenemos en el mismo estado y siempre que se codifica un '1' cambiamos de estado para realizar la alternancia de pulsos. Será en el momento de cambio de estado cuando codifiquemos el pulso correspondiente que dependerá del estado al que se transicione.

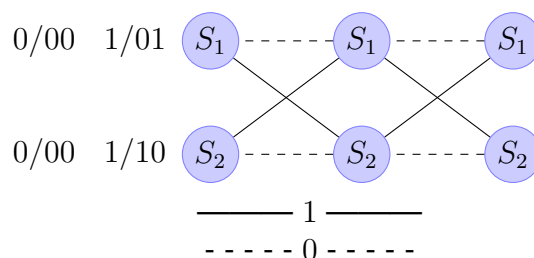


Figura 4.1: Diagrama de Trellis de la codificación pulsos alternos.

El esquema de señalización resultante se muestra en la figura 4.2.

En dicha figura se observa perfectamente el funcionamiento de este esquema de señalización. En la parte superior de la figura se encuentra la trama pseudo-aleatoria y abajo su codificación en la que se muestra como los pulsos alternan en cada codificación de '1' y que siempre que se codifica un '0' hay ausencia de pulsos. Además, la señal codificada se encuentra entre -1V y 1V lo que implica que ya está preparada para ser transmitida por el canal de luz. La señal codificada trabaja a el doble de frecuencia que la señal de entrada ya que hay transiciones rápidas cuando se transmite un pulso al igual que ocurre con la codificación Manchester que especifica el estándar.

Además, también se observa que el ciclo de trabajo es bajo cuya ventaja, como se ha comentado anteriormente, es que proporciona mayor intensidad de iluminación cuando se transmite un pulso. Sin embargo, también tiene una desventaja que va ligada al flickering. Al transmitir mayor cantidad de '0' que de '1' el transmisor se encuentra más tiempo apagado por lo que el parpadeo es más notable para el ojo humano que en otras codificaciones como Manchester o Miller por lo que se necesitará una frecuencia de transmisión mayor para este esque-

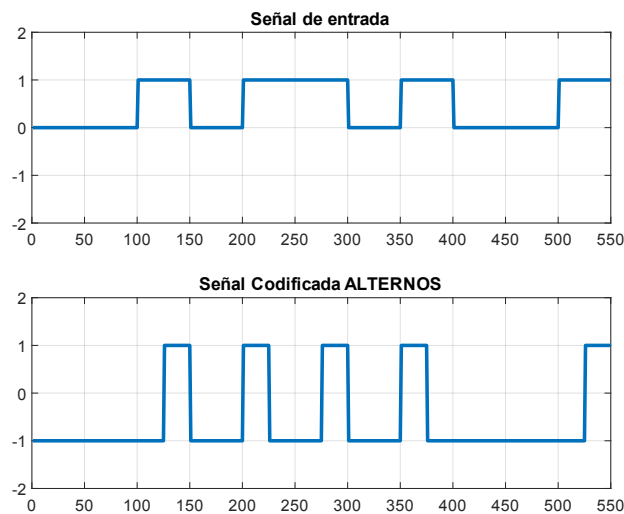


Figura 4.2: Codificación con pulsos alternos.

ma de señalización para que el flickering no sea perceptible por el ojo humano y llegue a ser molesto.

Este esquema al tener mayor número de '0' que de '1' se convierte en un esquema no equiprobable, es decir, en un esquema que no tiene la misma probabilidad de transmitir '0' que '1'. Es importante realizar los cálculos correspondientes para conocer la probabilidad exacta de cada bit para conocer el ciclo de trabajo y el efecto que provoca en el receptor óptico la no equiprobabilidad.

Se han estudiado sus prestaciones para tener una idea de cómo funciona este esquema. El funcionamiento depende del sistema de decisión que se aplique (estos sistemas se explican en el apartado 4.6) pero es bueno tener una visión de su tasa de error de bit. La figura x muestra la tasa de error de bit (BER) en función de la relación señal a ruido (SNR) de este esquema de señalización aplicando *soft-decoding* como sistema de decisión.

Seguidamente, podemos calcular la densidad de potencia espectral (PSD) de la codificación propuesta aplicando la siguiente fórmula.

La densidad de potencia espectral obtenida a través de los cálculos anteriores se muestra en la figura 4.3

En definitiva, se ha propuesto una nueva técnica de codificación basada en la alternancia de pulsos y en la ausencia de los mismos para modificar las estadísticas de la secuencia de amplitud con respecto a las estadísticas de la secuencia de mensajes llevando a una mejora notable para el formato OOK con un rendi-

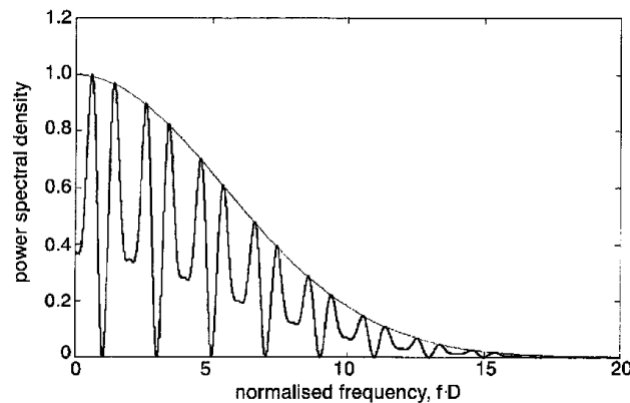


Figura 4.3: Potencia espectral frente a frecuencia normalizada.

miento óptimo.

### 4.3. Cancelación de pulsos

Tras el desarrollo de la codificación por pulsos alternos y de haber visto mejora en términos de BER, la ventaja proporcionada por modificar las estadísticas de la secuencia no se explotan completamente ya que la técnica de señalización no presenta ninguna mejora respecto a la relación de potencia óptica de pico a promedio (PAOPR), y por lo tanto aún se pueden conseguir mejores resultados. Siguiendo esta línea, para mejorar el pico de potencia óptica se trata de disminuir el número de pulsos, centrándose en evitar la aparición de más de un pulso de manera consecutiva.

De esta manera, el bit de información '1' se codifica con la ausencia de pulso '00' o con un pulso con su posición modificada, '01'. Mientras que el bit '0' se representa con ausencia de pulso '00' o con presencia de pulso sin modificar su posición '10'. Gracias a aplicar esto, se disminuyen los números de pulsos de una manera bastante notable.

La figura 4.4 representa el diagrama de Trellis de este esquema de codificación tal y como se ha descrito anteriormente. Este modelo consiste en tres estados, donde cada estado es imprescindible para saber como codificar el dato. Lo más importante del trellis es que el primer '1' que se codifica después de un '0' siempre se codifica como ausencia de pulso ('00') y que siempre que el bit de dato es un '0' se transiciona al estado S1 para volver a empezar y codificar el primer '1' como ausencia de pulso. También se observa que después de codificar el primer '1' es cuando se produce el pulso con su posición modificada si se co-

difica otro '1' o el pulso con su posición sin modificar si se codifica un '0'. Hay que destacar que el estado  $S_3$  funciona exactamente igual que el estado  $S_1$  pero, sin embargo, es necesario por la naturaleza de los diagramas de Trellis o de Markov, ya que no es apropiado que se transicione al mismo estado independientemente del bit que se codifique.

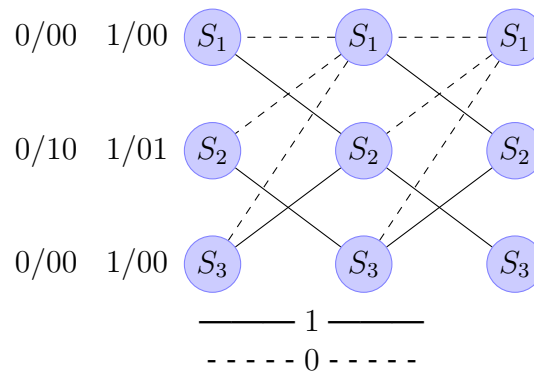


Figura 4.4: Diagrama de Trellis de la codificación cancelación de pulsos.

El esquema de señalización resultante se muestra en la figura 4.5, donde se puede observar una mejora del 50 % en PAOPR. Ya que este formato asegura un período mínimo de tiempo sin transiciones consecutivas.

Además, en dicha figura, se puede apreciar el funcionamiento de este esquema de señalización ya que se comprueba que predomina la ausencia de pulsos. En la parte superior de la figura se encuentra la trama pseudoaleatoria y abajo su codificación. También se observa como la entrada es una señal digital (0 y 1) y como la codificada se encuentra entre  $[-1, 1]$  que es el rango de transmisión por el canal de luz.

En este esquema de codificación, la señal codificada tiene el doble de frecuencia de trabajo ya que, al igual que otros esquemas como pulsos alternos o Manchester, hay transiciones rápidas entre '0' y '1'.

En la figura también se observa que el ciclo de trabajo de esta codificación es bajo porque hay pocos pulsos. Esto provoca dos efectos.

- Flickering: al transmitir mayor número de '0' que de '1' la fuente transmisora se encuentra más tiempo apagada que encendida. Esto implica que, a la misma frecuencia de transmisión que otros esquemas de codificación, el flickering en cancelación de pulsos sea mayor ya que es uno de los esquemas que mayor diferencia de probabilidad de bits presenta.

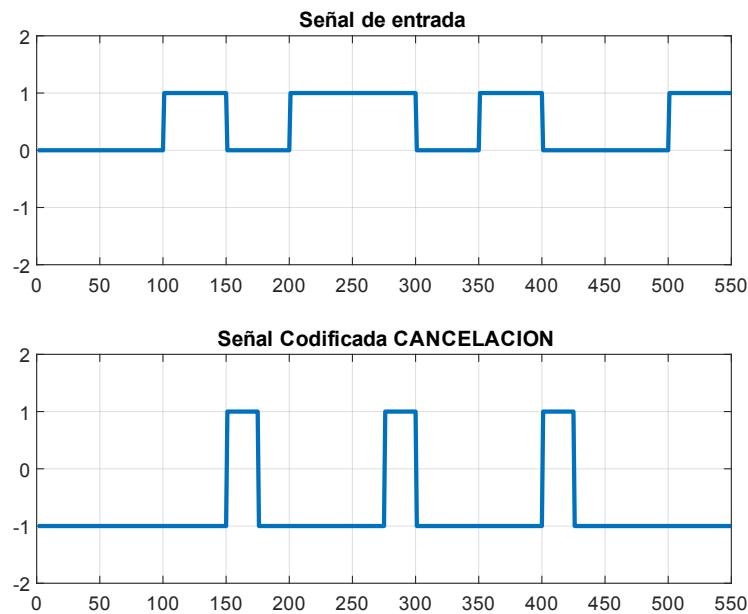


Figura 4.5: Codificación con cancelación de pulsos.

- **Potencia óptica:** la ventaja de transmitir pocos pulsos es que estos se pueden transmitir con mayor potencia ya que el transmisor está la mayor parte del tiempo sin transmitir.

Como se ha explicado anteriormente, este esquema prioriza la ausencia de pulsos por lo que también es un esquema no equiprobable (no tiene la misma probabilidad de '0' que de '1'), aunque en mayor medida que en pulsos alternos ya que en este hay mayor presencia de '0'. Para saber cuales son sus probabilidades exactas hay que realizar los cálculos correspondientes. Este cálculo es imprescindible para, además de conocer el ciclo de trabajo, conocer el efecto que produce en el receptor de luz.

Al igual que para pulsos alternos, se han estudiado sus prestaciones en función de varios sistemas de decisión. Estos sistemas se explicarán en el apartado 4.6 pero es oportuno tener una referencia de su tasa de error de bit para tener una idea inicial de sus prestaciones. Para ello, la figura x muestra la tasa de error de bit de este esquema para una trama pseudoaleatoria aplicando *soft-decoding* como sistema de decisión.

A continuación, podemos calcular la densidad de potencia espectral (PSD) de la codificación propuesta aplicando la siguiente fórmula.

Por consiguiente, la densidad de potencia espectral obtenida a través de los cálculos anteriores se muestra en la figura 4.6.

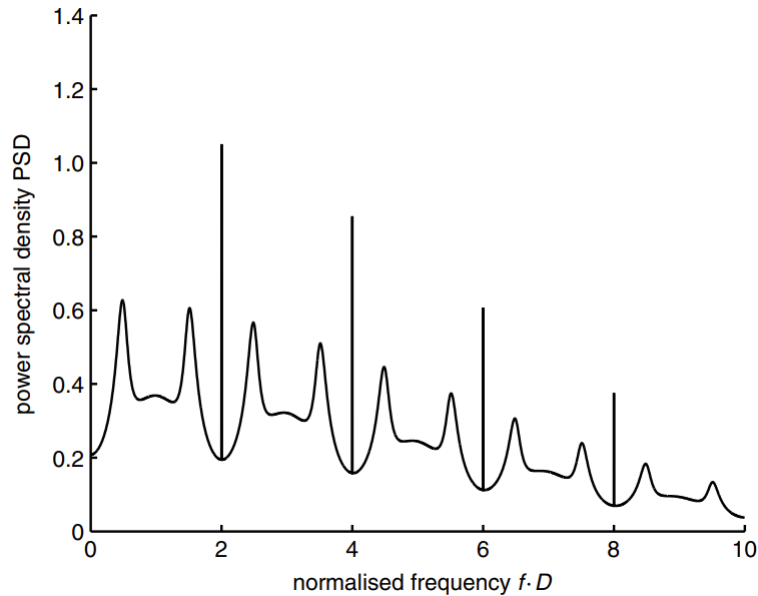


Figura 4.6: Potencia espectral frente a frecuencia normalizada.

En conclusión, este esquema de codificación propuesto basado en la ausencia de pulsos mejora notablemente la codificación de la señal. El aumento de los tiempos de silencio se utilizan para modificar las estadísticas de la secuencia de amplitud con respecto a las estadísticas de la secuencia de mensajes, lo que permite el aumento de la PAOPR, que es una característica favorable en enlaces ópticos. De esta manera se obtiene una buena compensación entre rendimiento y complejidad requerida.

#### 4.4. 4-PPM

Este esquema de señalización proviene de la modulación por posición de pulso (PPM). La modulación por posición de pulso es un modo de codificación en el que  $M$  bits son codificados para transmitir un pulso de duración  $T_C = T/2^M$  en una de las  $2^M$  posiciones posibles en un intervalo de tiempo de  $T$  segundos, que es la duración del símbolo. Este esquema se repite cada  $T$  segundos, por lo tanto, la tasa de transmisión es  $M/T$  bits por segundo. La atenuación de la luz se lleva a cabo mediante la reducción de la potencia transmitida de acuerdo con el porcentaje requerido de atenuación. Uno de los esquemas sugeridos es

el esquema 4-PPM y es el que se desarrolla en este trabajo. Gracias a estos esquemas, como la potencia media es constante, se evitan las variaciones en la intensidad, pero para ello se necesita una buena sincronización.

En el esquema 4-PPM propuesto se codifica cada pareja de bits por la posición de pulso en cuatro posiciones posibles como se aprecia en la figura 4.7.

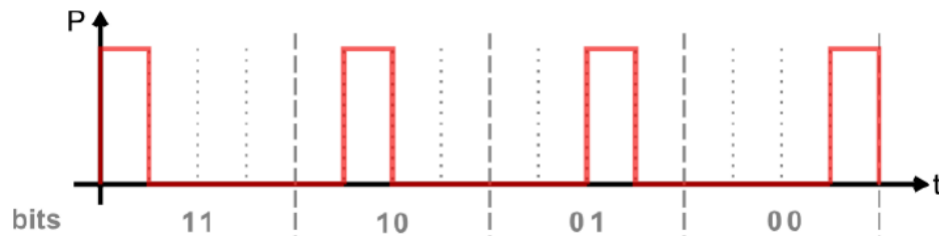


Figura 4.7: Pareja de bits con su respectiva codificación.

El esquema de señalización resultante se muestra en la figura 4.8

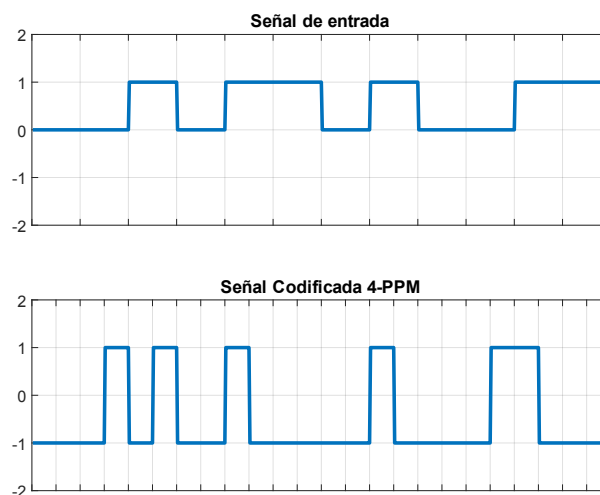


Figura 4.8: Codificación 4-PPM.

En dicha figura se verifica el funcionamiento de este esquema. En la parte superior de la figura se encuentra la señal de entrada, en la que cada línea vertical separa a los bits de entrada, y abajo su codificación, en la que cada línea vertical separa a los bits de salida. Cada pareja de bits se codifica con un cuarteto por lo que este esquema sigue en la línea de que se codifica al doble de frecuencia de la señal de entrada.

También se observa una de las características más representativas de 4-PPM que es su ciclo de trabajo. Viendo la naturaleza de la codificación es trivial averiguar que el ciclo de trabajo es del 25 % ya que se transmiten un '1' y tres '0'. Esto implica que también sea un esquema no equiprobable pero a diferencia de los esquemas anteriores ya conocemos las probabilidades de '0' y '1' sin necesidad de realizar cálculos. Por lo tanto, debido al efecto del condensador del receptor óptico que simetriza la señal entre  $[-1, 1V]$  incluyendo la componente de continua, la señal, teóricamente, se encuentra en el rango  $[-0.5, 1.5V]$ . Sin embargo, el receptor satura en 1V. Esta naturaleza presenta la ventaja de que proporciona mayor intensidad de iluminación cuando se transmite el pulso y la desventaja del flickering.

Se han estudiado las prestaciones para tener una idea de cómo funciona este esquema. El funcionamiento depende del sistema de decisión que se aplique. La figura x muestra la tasa de error de bit (BER) en función de la relación señal a ruido (SNR) aplicando *soft-decoding* como sistema de decisión y los resultados son muy buenos.

A continuación, se van a realizar los cálculos correspondientes para obtener la densidad de potencia espectral (PSD) de la codificación propuesta.

En resumen, este esquema de codificación propuesto, aunque es el más complejo de implementar debido a la dificultad de sincronización, es el más recomendable por su compatibilidad con el método *soft-decoding*, tal y como se desarrollará en el apartado 4.6.2, lo que implica una gran robustez y la posibilidad de recuperar la señal en situaciones muy adversas.

## 4.5. Comparativa 4-PPM frente a Inverse 4-PPM

Otra posibilidad planteada era la implementación de la modulación por posición de pulsos inversa (Inverse PPM). Como su propio nombre indica este esquema es el inverso del PPM desarrollado en la sección anterior, es decir, en vez de codificar con un pulso de duración  $T_C = T/2^M$  se codifica con un hueco.

Por lo tanto, en el esquema Inverse 4-PPM se codificaría cada pareja de bits por la posición de hueco en cuatro posiciones posibles como se aprecia en la figura 4.9.

La principal ventaja de esta modulación es que consigue una mejora en la iluminación ya que se invierte el estado alto y bajo de los pulsos por lo que alumbra más tiempo.

Sin embargo, debido a su similitud con 4-PPM y que solo presenta esta venta-



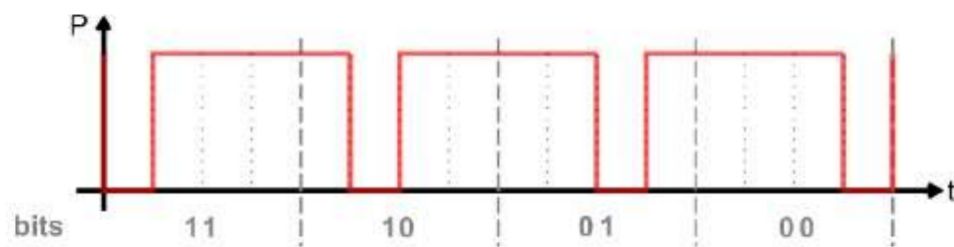


Figura 4.9: Pareja de bits con su respectiva codificación.

ja y tiene la desventaja de que presenta mayor consumo y menor potencia óptica se ha decidido implementar 4-PPM.

## 4.6. Sistemas de decisión

Hoy en día, una tarea desafiante en la corrección de errores es decodificar las palabras de código que se han recibido a través de canales ruidosos. Si no hay errores, es decir, las palabras de código encuentran una coincidencia exacta, entonces es fácil decodificar los datos. Sin embargo, si no se encuentra una coincidencia, se adoptan diversos mecanismos de decodificación más complejos. Por este motivo, en este apartado, se van a describir los diferentes sistemas de decisión para interpretar la señal recibida de la mejor manera posible que se han implementado. Para ello, se van a desarrollar sus características más representativas así como sus ventajas e inconvenientes.

### 4.6.1. Hard-decoding

El primer sistema de decisión desarrollado es *hard-decoding*. Este sistema es el más sencillo de todos y por ello suele ser el que se aplica en la mayoría de sistemas de comunicación sencillos que no necesitan de alta robustez frente al ruido.

Para su desarrollo es imprescindible fijar un umbral ya que este método compara los valores de los pulsos recibidos con el valor del umbral fijado. El valor del umbral se determina en la mitad del pulso. Por lo que si el valor del dato es mayor que el valor del umbral se interpreta como un '1' y, de lo contrario, se interpreta como un '0'. La decodificación se realiza siempre igual independientemente de lo cerca que se encuentre el valor del dato del umbral.

Es por este motivo que este sistema de decisión es muy poco robusto frente a

picos de ruido y frente a la inclusión de componente de continua que pueda modificar y mover la amplitud de la señal, provocando que el umbral no se encuentre en la mitad que se preveía.

A continuación, se muestra la figura 4.10 que compara el funcionamiento de los tres esquemas de codificación desarrollados con el método *hard-decoding*.

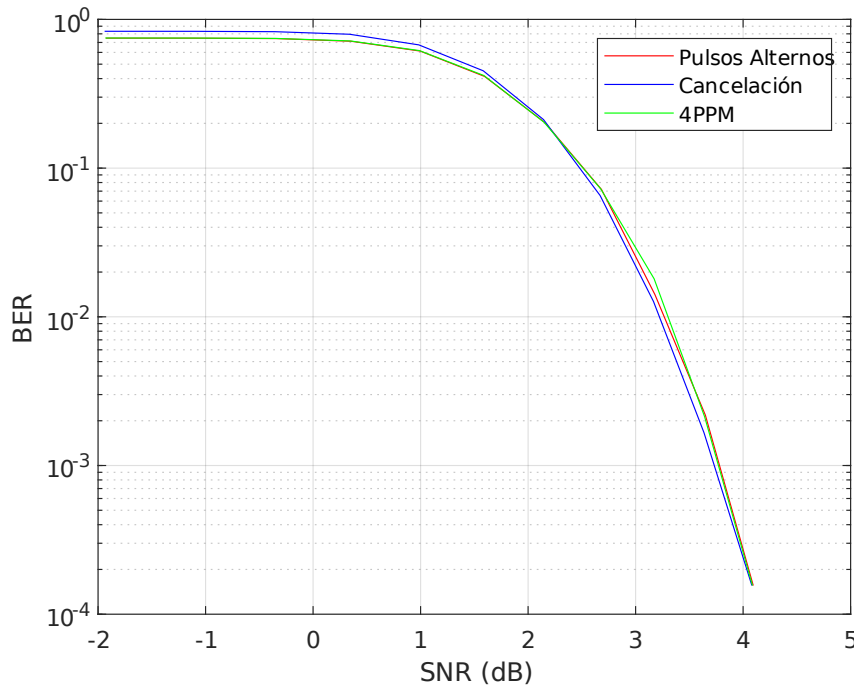


Figura 4.10: Sistema *Hard-decoding*.

En la figura se puede comprobar como, con este sistema, los tres esquemas de señalización funcionan esencialmente igual y que, con relaciones señal a ruido bajas (o negativas), la tasa de error de bit es alta y no sería aceptable para cualquier sistema de comunicación por lo que este sistema sólo es apto para comunicaciones directas y cercanas en las que la señal se reciba prácticamente perfecta con muy poco ruido.

Tal y como se ha explicado en este apartado, el sistema *hard-decoding* es un sistema sencillo y rápido de implementar, sin embargo, no es óptimo ni útil para afrontar comunicaciones con un poco de ruido. Por esto, este sistema no se aplica prácticamente nunca por lo que se desarrolla otra técnica de decisión como *soft-decoding* que mejora notablemente las prestaciones.

### 4.6.2. Soft-decoding

Tras el desarrollo de *hard-decoding* y de haber visto que sus prestaciones no son buenas se ha implementado el sistema de decisión *soft-decoding*. Este sistema es más complejo que el anterior y por ende, sus prestaciones son mejores y es el que se aplica en la mayoría de sistemas de comunicaciones para asegurar una correcta recepción de la señal en la mayoría de situaciones y entornos.

El sistema *soft-decoding* opera con un rango de valores, en nuestro caso con parejas de bits para ver a que opción se parece más la pareja recibida. Este sistema trabaja con los valores en crudo de la señal para tener mejores estimaciones de la señal de entrada real.

Este sistema se basa en el cálculo de la distancia euclídea para saber a cuál de las opciones, que se predefinen en el sistema de comunicaciones, se parece más la señal recibida. La distancia euclídea es la distancia 'ordinaria' entre dos puntos, la cual se deduce a partir del teorema de Pitágoras. En este caso, al usar parejas de bits, es equivalente a calcular la distancia euclídea entre dos puntos en un espacio bidimensional, aunque es simple ampliarla cuando se usen mayor número de bits como opciones tal y como se explicará en el apartado *Algoritmo de Viterbi*. Para el cálculo se aplica la siguiente fórmula:

$$d_E(P_1, P_2) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Siendo  $P_1$  el punto de la tensión recibida y  $P_2$  el punto de la tensión ideal o esperada. Por ejemplo, para pulsos alternos, este cálculo se realizaría para las tres posibilidades de tensión esperada en voltios (-1,-1), (-1,1) y (1,-1) con la tensión recibida por el enlace. Una vez se ha hecho el cálculo para todas las opciones la opción elegida será la que tenga una distancia menor con la recibida.

En la aplicación de este método en nuestros sistemas de señalización hay que destacar varios aspectos. El primero de ellos es que tanto para pulsos alternos como para cancelación de pulsos la opción de '11' no está contemplada por lo que ambas solo tienen tres opciones de parejas de bits. Esto ya mejora respecto al funcionamiento de *hard-decoding* ya que por umbral se podría dar esta pareja y sería un error el 100 % de las veces mientras que aplicando *soft-decoding* puede ser corregido calculando a cual de las tres opciones que si tienen posibilidad se parece más.

El siguiente es que para 4-ppm se tendría que ampliar la fórmula ya que se trabaja con 4 bits. Sin embargo, esta codificación tiene la característica de que las distancias entre las cuatro opciones posibles son tan lejanas que, hablando en términos geométricos, representan las diagonales de un tesseracto (análogo del cubo en cuatro dimensiones). Esto implica que dichas distancias euclídeas

sean máximas y se pueda aplicar el método de comparación de bits.

Para implementarlo hay que buscar el bit más grande dentro del cuarteto recibido y para ello se comparan los cuatro bits en crudo. El bit mayor se interpreta como '1' y los otros tres como '0'. Este método es especialmente eficaz frente a inclusiones de componentes de continua que provoquen que la señal recibida aumente sus valores.

Seguidamente se muestra la figura 4.11, que compara el funcionamiento de los tres esquemas de codificación desarrollados con el método *soft-decoding*.

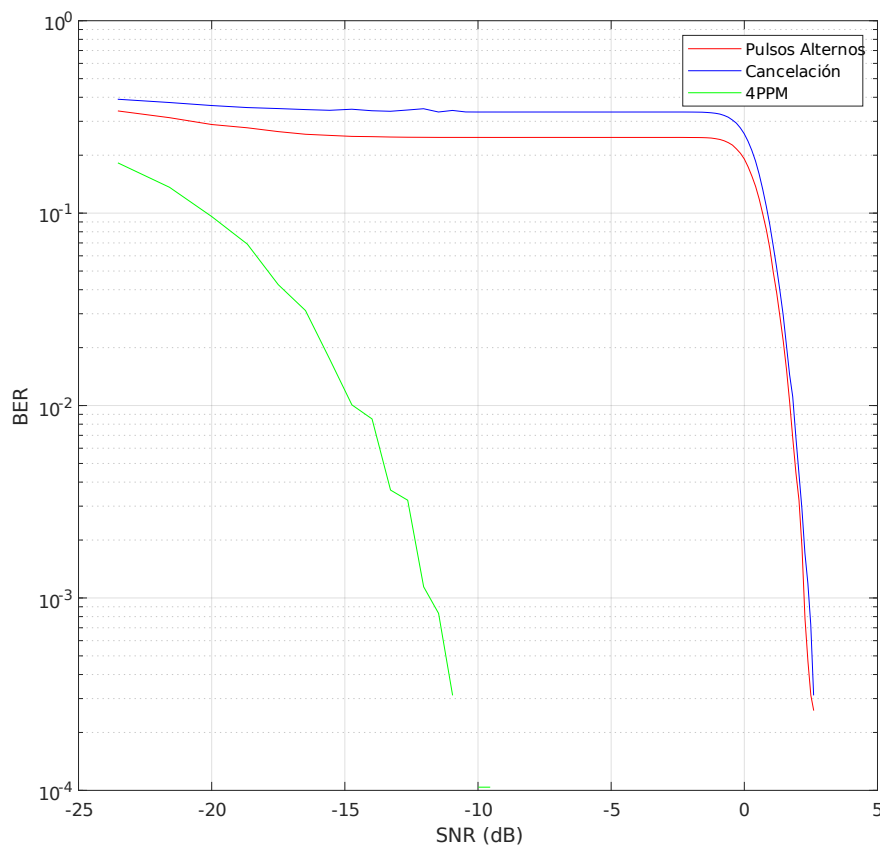


Figura 4.11: Sistema *Soft-decoding*.

En la figura se comprueba que pulsos alternos y cancelación de pulsos tienen un funcionamiento parecido al contar con las mismas opciones y, lo más importante, que el funcionamiento de 4-ppm es mejor. Esto se debe, como se ha explicado anteriormente, a que las distancias entre los puntos son las diagona-

les. Por lo tanto, este método incrementa el potencial del uso de *soft-decoding* y su funcionamiento es muy óptimo.

Finalmente, se concluye que, mientras que *hard-decoding* opera con un solo bit de información, *soft-decoding* puede tomar un rango de valores de entrada. Esta información adicional es fundamental para tener mejores estimaciones de los datos originales.

En la línea de aumentar el rango de valores de entrada se trabaja con juntar *soft-decoding* con el Algoritmo de Viterbi.

### 4.6.3. Algoritmo de Viterbi

El algoritmo de Viterbi es un algoritmo de programación dinámica que permite hallar la secuencia más probable (el llamado camino de Viterbi) que produce una secuencia observada, especialmente en el contexto de fuentes de información de Márkov.

En el trabajo se aplica el algoritmo de Viterbi en función del pasado, es decir, otorgándole memoria al sistema. Esto se usa para ampliar el rango de valores posibles, pero sobre todo, para que el número de opciones descartadas sea relevante en relación a las opciones totales.

Este sistema de decisión no es independiente, es decir, cuando se le otorga dicha memoria al sistema y se descartan las opciones no probables hay que elegir entre las opciones que sí son posibles. Esta elección se realiza con el método *soft-decoding* ampliando la fórmula bidimensional a el número de puntos que nos proporcione la memoria. Por lo tanto, se puede pensar que cuantos más pasados se tengan más robusto será el sistema. Sin embargo, mirar al pasado requiere de mucha complejidad y de retardos de tiempo a la hora de calcular la distancia euclídea con tantos puntos. Por ello, hay que encontrar una solución de compromiso para que la mejora sea significativa y la complejidad no sea excesiva. En este trabajo vamos a quedarnos con un pasado, es decir, con cuatro bits.

En la aplicación de este método en nuestros sistemas de señalización hay bastantes diferencias. Lo más importante es que no es útil aplicar este algoritmo para el esquema 4-PPM porque mirar el cuarteto anterior no tiene ningún impacto en el cuarteto actual ya que esta codificación no presenta restricciones entre la transmisión de cuartetos.

En el esquema pulsos alternos la aplicación del algoritmo de Viterbi si tiene sentido, sin embargo, al mirar un pasado sólo se descartan dos opciones de las nueve posibles que tendría este esquema si no se usara Viterbi. Por esto, la mejora en cuanto a robustez que se presenta no es muy significativa respecto

al método *soft-decoding* sin Viterbi del apartado anterior. La única restricción que presenta este esquema es que los pulsos deben ir alternando su posición. Por lo tanto, las opciones descartadas son las dos que no presentan dicha la alternancia de pulsos ('0101' y '1010')

Para el esquema cancelación de pulsos usar el algoritmo de Viterbi es más eficaz que en el caso anterior. Esto es debido a que, en este caso, se descartan cuatro opciones de las nueve posibles por lo que la tiene un gran impacto en cuanto a la mejora de robustez frente al ruido. En este esquema la restricción que se presenta es que no puede haber más de un pulso seguido ya que entre pulsos tiene que haber silencio. Por lo tanto, las opciones descartadas son '0101', '0110', '1001' y '1010'.

En la figura 4.12 se muestra el funcionamiento de pulsos alternos y de cancelación de pulsos con este método de decisión.

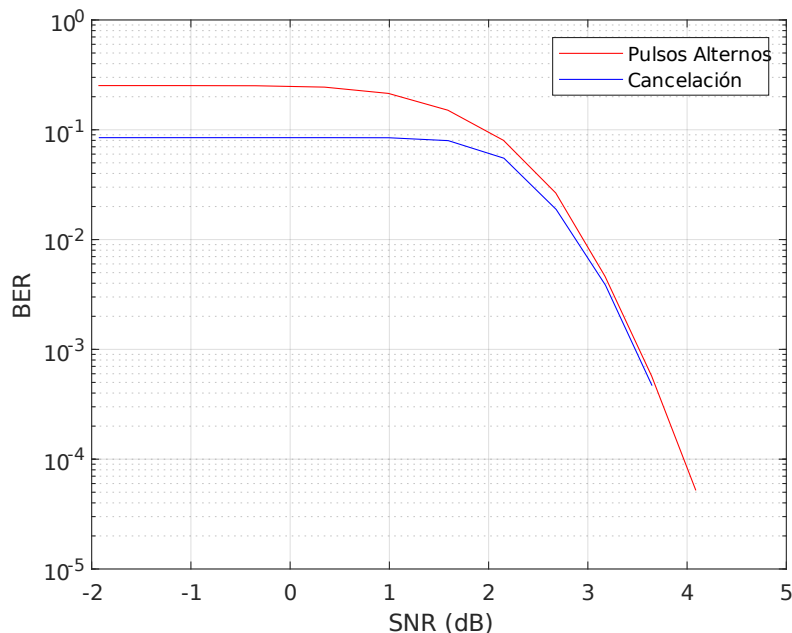


Figura 4.12: Algoritmo de Viterbi.

Al analizar la gráfica se contempla que ambos esquemas mejoran respecto a la aplicación de *soft-decoding* sin Viterbi. Aunque tal y como se desarrollo anteriormente, el uso de este algoritmo tiene más efecto en el esquema cancelación de pulsos llegando a cambiar las tornas en cuanto a cuál de los dos es más robusto frente al ruido.

#### 4.6.4. Comparativa entre los sistemas de decisión

A continuación, se va a comparar la tasa de error de bit (BER) de los distintos esquemas de decisión, para cada esquema de codificación, en función de la relación señal a ruido (SNR), que varía con la distancia (disminuyendo la amplitud de la señal), para verificar la mejora que se produce entre cada sistema de decisión.

La figura 4.13 muestra una comparativa de los esquemas bajo la codificación de pulsos alternos.

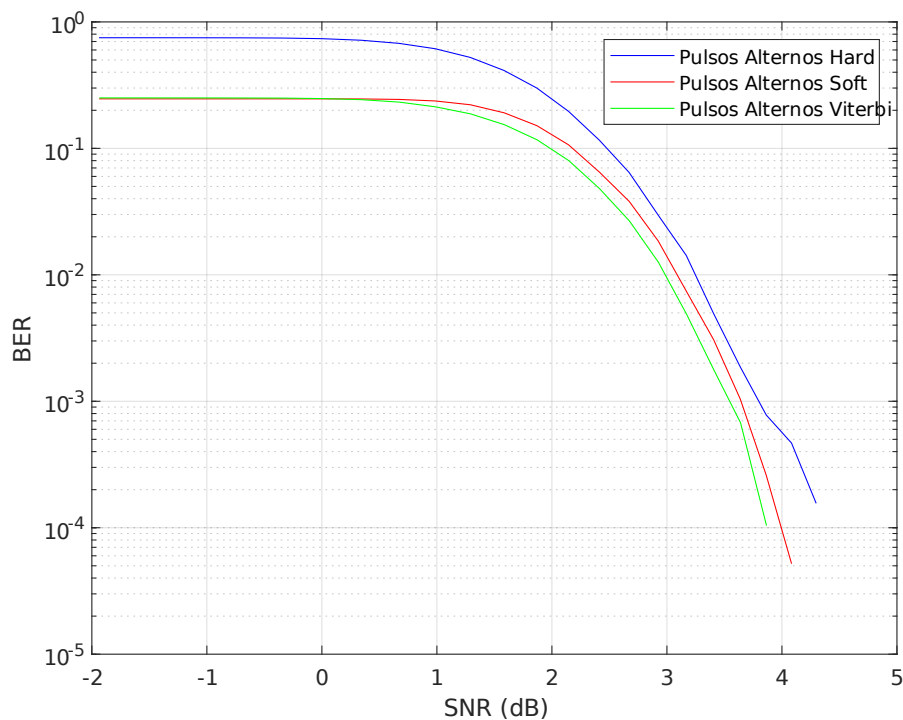


Figura 4.13: Sistemas de decisión con pulsos alternos.

Se observa que para pulsos alternos, la principal mejora se nota con la aplicación de soft-decoding o Viterbi. El funcionamiento de Viterbi es levemente mejor porque aplicando Viterbi con un pasado solo se descartan dos opciones de nueve posibles por lo que no sale a relucir su máximo potencial.

La figura 4.14 muestra una comparativa de los esquemas bajo la codificación de cancelación de pulsos.

Se comprueba que para cancelación de pulsos la aplicación del algoritmo de Viterbi es muy importante ya que, como se comentó en el apartado anterior, se

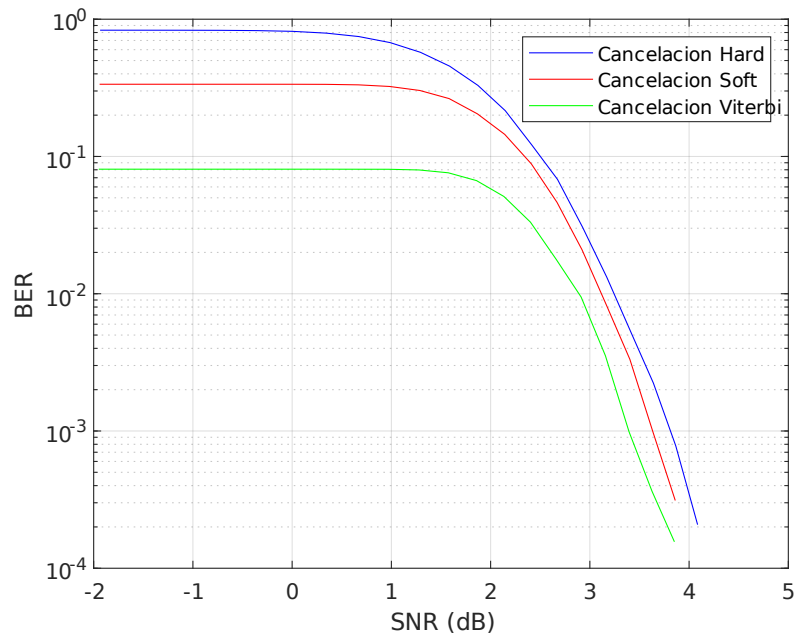


Figura 4.14: Sistemas de decisión con cancelación de pulsos.

descartan más opciones al mirar un pasado, concretamente se descartan cuatro de nueve opciones.

La figura 4.15 muestra una comparativa de los esquemas bajo la codificación 4-PPM.

Se verifica que para 4ppm el uso de soft-decoding implica una gran mejora debido a la posibilidad de buscar el bit mayor ya que solo se recibe un '1' por cuarteto de bits.

## 4.7. Conclusiones

Finalmente, para concluir este apartado se muestra una gráfica comparativa de los tres esquemas de señalización con el sistema de decisión que mejores prestaciones ofrece a cada uno de ellos.

Por tanto el mejor esquema de codificación en cuanto a robustez es 4-PPM con soft-decoding.

[TERMINAR DE CERRAR EL CAPÍTULO]



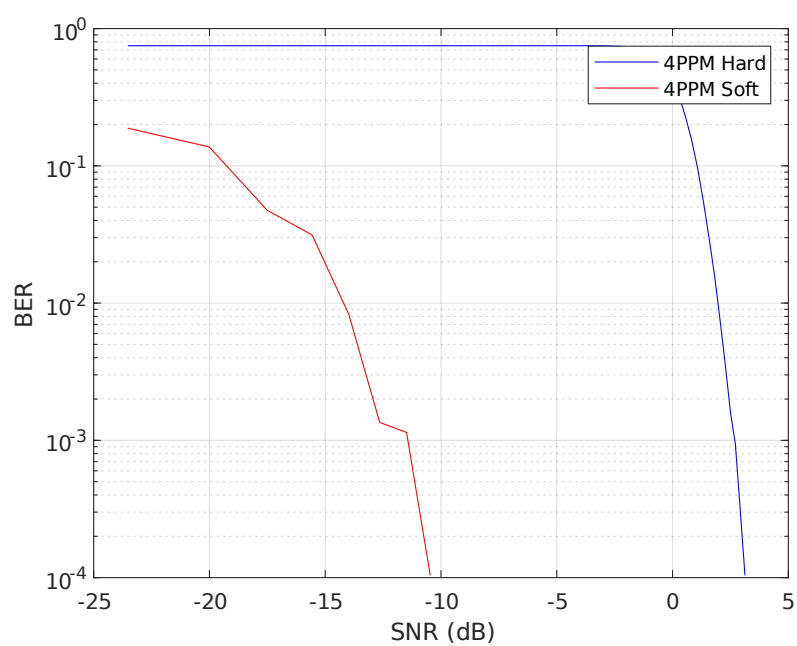


Figura 4.15: Sistemas de decisión con 4-PPM.

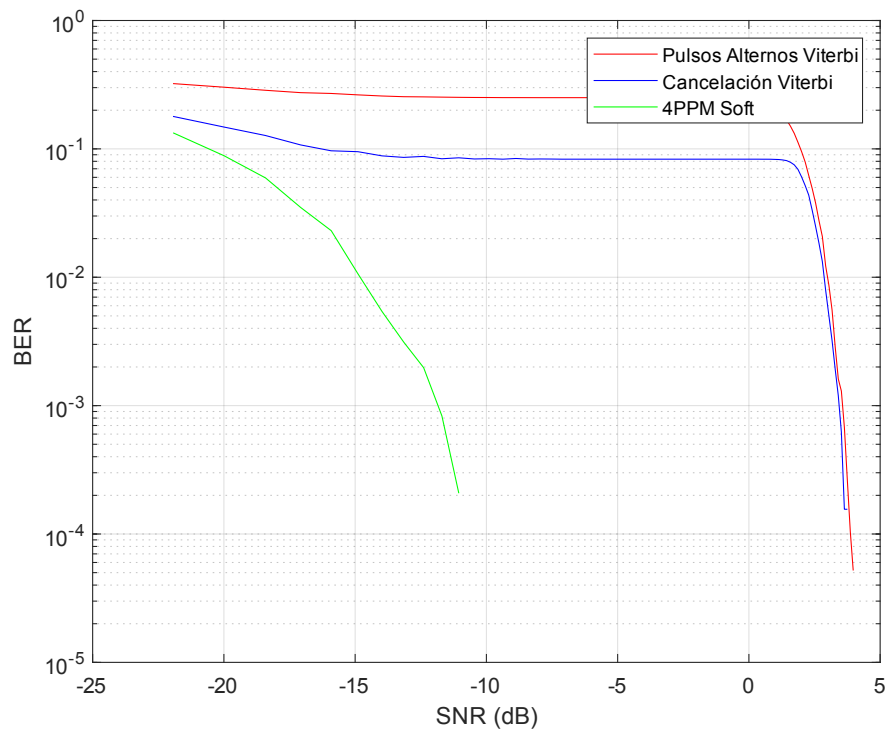


Figura 4.16: Comparativa de los esquemas de codificación con su mejor sistema de decisión.

# Capítulo 5

## Implementación

### Contenido

5.1 Sistema general . . . . .	37
5.2 Transmisor . . . . .	37
5.3 Receptor . . . . .	37
5.4 Sistema de decisión . . . . .	38

### 5.1. Sistema general

Comentar como se relacionan los bloques entre sí y el orden de los mismos para luego entrar en profundidad en los bloques que se han desarrollado.

### 5.2. Transmisor

-Selector del esquema de codificación (sincronismo manchester y trama en la codificación elegida) -Diagramas de Markov para implementar la codificación

### 5.3. Receptor

-Recepción del dato serie -Agrupar los datos en parejas o cuartetos -Decodificar con máquinas de estados o identificación del bit mayor.

## 5.4. Sistema de decisión

(hard-soft decoding, algoritmo de viterbi) -Hard-decoding (umbral en la mitad) -Soft-decoding (cómo se implementa el cálculo de la distancia euclídea) - Algoritmo de Viterbi (que efecto tiene y cómo se implementa la mirada al pasado para descartar opciones que tienen probabilidad 0)

## **Capítulo 6**

### **Pruebas**



## **Parte III**

### **Parte tercera.**





# Conclusiones y líneas futuras

Después de todo el desarrollo del proyecto, es pertinente hacer una valoración final del mismo, respecto a los resultados obtenidos, las expectativas o el resultado de la experiencia acumulada.

Esta sección es indispensable y en ella se ha de reflejar, lo más claramente posible, las aportaciones del trabajo con unas conclusiones finales.

Además, considerando también el estado de la técnica, se deben indicar las posibles líneas futuras de trabajo, proponer otros puntos de vista o cualquier otra sugerencia como postámbulo del presente trabajo, para ser considerada por el lector o el tribunal evaluador.



# **Parte IV**

## **Apéndices**



# Apéndice A

## Manual de uso

Contenido	
A.1 Primera sección . . . . .	47

### A.1. Primera sección



# **Bibliografía**





