



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



# Implementación de un transmisor de ISDB-T abierto bajo el paradigma de Radio Definida por Software

MEMORIA DE PROYECTO PRESENTADA A LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR

Javier Hernández, Santiago Castro

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS  
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO ELECTRICISTA.

## TUTOR

Dr. Federico La Rocca ..... Universidad de la República  
M.Sc. Pablo Flores Guridi ..... Universidad de la República

## TRIBUNAL

Dr. Alicia Fernández ..... Universidad de la República  
Dr. Víctor González-Barbone ..... Universidad de la República  
Dr. Rafael Sotelo ..... Universidad de la República

Montevideo  
jueves 20 septiembre, 2018

*Implementación de un transmisor de ISDB-T abierto bajo el paradigma de Radio  
Definida por Software*, Javier Hernández, Santiago Castro.

Esta tesis fue preparada en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X usando la clase iietesis (v1.1).  
Contiene un total de 43 páginas.  
Compilada el jueves 20 septiembre, 2018.  
<http://iie.fing.edu.uy/>

Sean los orientales tan ilustrados como valientes.

JOSÉ GERVASIO ARTIGAS

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Agradecimientos

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur non neque tempor nunc fringilla tincidunt a a tortor. Phasellus leo turpis, commodo aliquam vehicula a, auctor in magna. Nulla non venenatis neque. Sed sit amet turpis metus, vel accumsan ligula. Suspendisse malesuada lacus sed tellus mollis a posuere mi porttitor. Nunc venenatis ante sit amet metus euismod iaculis. Phasellus accumsan lacinia eros, nec tempor lacus malesuada a. Suspendisse leo justo, pulvinar vitae molestie sit amet, ullamcorper ut mauris. Proin sed est ipsum.

Nulla leo ligula, porttitor eu dapibus non, porta sit amet enim. Ut eros nibh, fringilla ultrices rhoncus ut, luctus ut nibh. Nam id urna ac ligula fermentum rutrum. Sed eu cursus lacus. Donec pretium fermentum augue, eu interdum ipsum faucibus a. Praesent feugiat elit ligula. Sed ac augue luctus ligula aliquet scelerisque commodo nec justo. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Vivamus eget sem ac sapien elementum suscipit. Ut odio tellus, accumsan sit amet condimentum vehicula, vestibulum quis dui. Quisque posuere semper massa quis cursus. Aliquam gravida tellus eget lorem congue dapibus. Duis id quam eu arcu porta commodo vel at nunc. Nulla in venenatis lorem. Donec congue vehicula bibendum.

Vestibulum pulvinar lorem a velit bibendum porttitor sagittis nisl tempus. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Fusce ut mi sit amet metus ultrices feugiat ut nec lorem. Nunc felis lorem, consectetur ut eleifend et, vestibulum id purus. Praesent nec augue quis neque sodales commodo nec ac urna. Sed a nibh ac odio sodales pulvinar. Pellentesque ut odio orci. Nam dictum hendrerit felis at ullamcorper. Integer eget sapien libero, in congue tortor. Nullam blandit vestibulum aliquet. Nullam vulputate sapien quis nisl molestie vulputate. Aliquam elementum eros quis ante ultrices ultricies. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Donec porttitor sodales aliquam. Ut sit amet risus justo. Integer eu iaculis orci.

Sed lectus tellus, porttitor in viverra sed, viverra nec nunc. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Fusce gravida eleifend nisi, sit amet pulvinar ligula gravida id. Vivamus est massa, viverra sit amet ornare non, consectetur sit amet elit. Nam sapien lectus, pharetra sit amet imperdiet ultrices, iaculis eget enim. Curabitur in felis et lectus malesuada pellentesque vestibulum ac dolor. Vivamus quis nulla tortor. Sed adipiscing fringilla leo, sit amet sodales felis volutpat id. Proin vitae arcu libero. Suspendisse sit amet est tellus. Aliquam sit amet metus ut arcu placerat feugiat. Nulla eget magna id odio

facilisis blandit. Nam porta ultricies est, sed bibendum mauris volutpat ac. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Maecenas vel lorem lorem. Donec et purus a tellus lacinia fringilla a non lectus.

Sed pretium porttitor fermentum. Vivamus semper lobortis dictum. In interdum, libero id iaculis laoreet, sapien diam tristique lorem, sit amet aliquam sapien sem ac tortor. Phasellus tincidunt tempor condimentum. Aenean luctus, erat non fermentum rhoncus, quam odio gravida massa, sed scelerisque tellus elit ut massa. Suspendisse vel posuere ipsum. Vestibulum dolor leo, ornare quis faucibus non, consequat ut purus. Maecenas at massa turpis, vitae pretium metus. Mauris mollis dolor turpis, semper dignissim tellus. Sed vel ligula eu turpis accumsan vehicula id in nisl. Pellentesque sit amet mi lorem. Suspendisse potenti. Proin bibendum luctus accumsan. Mauris urna elit, lacinia sit amet adipiscing feugiat, vestibulum sed mauris.

*A Fulano y Mengano.*

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.



# Resumen

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur non neque tempor nunc fringilla tincidunt a a tortor. Phasellus leo turpis, commodo aliquam vehicula a, auctor in magna. Nulla non venenatis neque. Sed sit amet turpis metus, vel accumsan ligula. Suspendisse malesuada lacus sed tellus mollis a posuere mi porttitor. Nunc venenatis ante sit amet metus euismod iaculis. Phasellus accumsan lacinia eros, nec tempor lacus malesuada a. Suspendisse leo justo, pulvinar vitae molestie sit amet, ullamcorper ut mauris. Proin sed est ipsum.

Nulla leo ligula, porttitor eu dapibus non, porta sit amet enim. Ut eros nibh, fringilla ultrices rhoncus ut, luctus ut nibh. Nam id urna ac ligula fermentum rutrum. Sed eu cursus lacus. Donec pretium fermentum augue, eu interdum ipsum faucibus a. Praesent feugiat elit ligula. Sed ac augue luctus ligula aliquet scelerisque commodo nec justo. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Vivamus eget sem ac sapien elementum suscipit. Ut odio tellus, accumsan sit amet condimentum vehicula, vestibulum quis dui. Quisque posuere semper massa quis cursus. Aliquam gravida tellus eget lorem congue dapibus. Duis id quam eu arcu porta commodo vel at nunc. Nulla in venenatis lorem. Donec congue vehicula bibendum.

Vestibulum pulvinar lorem a velit bibendum porttitor sagittis nisl tempus. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Fusce ut mi sit amet metus ultrices feugiat ut nec lorem. Nunc felis lorem, consectetur ut eleifend et, vestibulum id purus. Praesent nec augue quis neque sodales commodo nec ac urna. Sed a nibh ac odio sodales pulvinar. Pellentesque ut odio orci. Nam dictum hendrerit felis at ullamcorper. Integer eget sapien libero, in congue tortor. Nullam blandit vestibulum aliquet. Nullam vulputate sapien quis nisl molestie vulputate. Aliquam elementum eros quis ante ultrices ultricies. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Donec porttitor sodales aliquam. Ut sit amet risus justo. Integer eu iaculis orci.

Sed lectus tellus, porttitor in viverra sed, viverra nec nunc. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Fusce gravida eleifend nisi, sit amet pulvinar ligula gravida id. Vivamus est massa, viverra sit amet ornare non, consectetur sit amet elit. Nam sapien lectus, pharetra sit amet imperdiet ultrices, iaculis eget enim. Curabitur in felis et lectus malesuada pellentesque vestibulum ac dolor. Vivamus quis nulla tortor. Sed adipiscing fringilla leo, sit amet sodales felis volutpat id. Proin vitae arcu libero. Suspendisse sit amet est tellus. Aliquam sit amet metus ut arcu placerat feugiat. Nulla eget magna id odio

facilisis blandit. Nam porta ultricies est, sed bibendum mauris volutpat ac. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Maecenas vel lorem lorem. Donec et purus a tellus lacinia fringilla a non lectus.

Sed pretium porttitor fermentum. Vivamus semper lobortis dictum. In interdum, libero id iaculis laoreet, sapien diam tristique lorem, sit amet aliquam sapien sem ac tortor. Phasellus tincidunt tempor condimentum. Aenean luctus, erat non fermentum rhoncus, quam odio gravida massa, sed scelerisque tellus elit ut massa. Suspendisse vel posuere ipsum. Vestibulum dolor leo, ornare quis faucibus non, consequat ut purus. Maecenas at massa turpis, vitae pretium metus. Mauris mollis dolor turpis, semper dignissim tellus. Sed vel ligula eu turpis accumsan vehicula id in nisl. Pellentesque sit amet mi lorem. Suspendisse potenti. Proin bibendum luctus accumsan. Mauris urna elit, lacinia sit amet adipiscing feugiat, vestibulum sed mauris.

# Prefacio

Algo que decir antes de empezar con el contenido?

El autor

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Tabla de contenidos

<b>Agradecimientos</b>	<b>III</b>
<b>Resumen</b>	<b>VII</b>
<b>Prefacio</b>	<b>IX</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Fundamento Teórico</b>	<b>5</b>
2.1. Modelado del canal . . . . .	5
2.1.1. Canales Continuos . . . . .	5
2.1.2. Canales Discretos . . . . .	5
2.1.3. Las no idealidades del Canal . . . . .	5
2.2. Estrategias para mitigar los efectos del canal . . . . .	5
2.2.1. Códigos de detección y corrección de errores . . . . .	5
2.2.2. Códigos Cíclicos . . . . .	6
2.2.3. Códigos BCH . . . . .	8
2.2.4. Códigos de Reed-Solomon . . . . .	8
2.2.5. Entrelazamiento de datos . . . . .	8
2.3. Modulación OFDM . . . . .	8
2.4. MPEG y sus Estandares . . . . .	9
2.4.1. MPEG 2 Transport Stream . . . . .	10
2.4.2. Tablas PAT . . . . .	10
2.4.3. Tablas PMT . . . . .	10
<b>3. El Sistema de Televisión Digital Terrestre ISDB-T</b>	<b>11</b>
3.1. BTS como fuente de datos . . . . .	11
3.2. Robustecimiento frente a las no idealidades del canal . . . . .	11
3.3. Las portadoras y la modulación . . . . .	11
3.4. Formación de los frames OFDM . . . . .	11
3.5. La puesta en el aire de la señal . . . . .	11
<b>4. Radio definida por Software</b>	<b>13</b>
4.1. GNU Radio . . . . .	13
4.2. Hardware . . . . .	13
4.2.1. Alcance del transmisor . . . . .	13

## Tabla de contenidos

4.2.2. Antenas de laboratorio . . . . .	13
4.3. gr-isdbt . . . . .	13
<b>5. Un transmisor ISDBT implementado en GNU Radio</b>	<b>15</b>
5.1. Generalidades del Transmisor . . . . .	15
5.2. El flujo de datos en GNU Radio . . . . .	15
5.3. Obtencion de los TSP por capa . . . . .	15
5.4. Codificaciones de Canal . . . . .	15
5.5. La modulacion . . . . .	15
5.6. El uso de los entrelazamientos . . . . .	15
5.7. Formacion de cuadros OFDM . . . . .	15
5.7.1. Las portadoras piloto . . . . .	15
5.7.2. Las portadoras activas . . . . .	15
5.8. El prefijo ciclico . . . . .	15
5.9. La transmision desde USRP . . . . .	15
<b>6. Evaluacion del sistema</b>	<b>17</b>
6.1. Pruebas sobre gr-isdbt . . . . .	17
6.2. Pruebas sobre televisores comerciales . . . . .	17
<b>7. Conclusiones y trabajo a futuro</b>	<b>19</b>
<b>A. Algo que agregar</b>	<b>21</b>
<b>Referencias</b>	<b>23</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>24</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>26</b>

# Capítulo 1

## Introducción

En Mayo de 2001, la ARIB (Association of Radio Industries and Businesses) [1] presentó la primera versión de su standard para la transmisión de televisión digital. Coloquialmente denominada "Norma Japonesa de Televisión Digital", académicamente ISDB-T, por sus siglas en ingles provenientes de *Integrated Services Digital Broadcasting, Terrestrial*, la norma sintetiza un conjunto de requerimientos técnicos para la utilización eficiente del espectro radioeléctrico para la transmisión de datos multimedia, con la colaboración y el aval de todos los actores de la industria.

Esta norma basa muchos de sus conceptos en la norma DVB-T, publicada por primera vez en el año 1997 por la organización europea DVB (Digital Video Broadcasting). La posterioridad de ISDB-T con respecto a esta, permitió que se robustecieran algunos de los aspectos mas criticados de la norma europea, resultando en un standard mas robusto para la transmisión.

Actualmente, existen en el mundo cuatro grandes estandares comerciales. Además de ISDB-T y DVB-T, están la norma china DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcast) y la norma norteamericana de la ATSC (Advanced Television Systems Comitee). La elección de que norma adoptar por parte de los gobiernos nacionales, radica exclusivamente en decisiones políticas, que escapan a los objetivos de este documento.

En Uruguay, al igual que en gran parte de Latinoamérica, se adopto en 2011 una versión de ISDB-T denominada ISDB-T International, la cual es a grandes rasgos idéntica a la primera, salvo por algunos cambios menores como el cambio en la codificación de fuente (pasa del standard MPEG-2 a MPEG-4) y la elección de otro standard de interactividad (se cambia de BML a Ginga)

Luego de la adopción del standard, se fijo para el año 2015 como fecha limite para el denominado "apagón analógico", fecha en la cual se dejaría de transmitir televisión por vías analógicas, pasando exclusivamente a medios digitales, liberando los espectros asignados para los canales de TV abierta para otros fines.

Durante la implementación del marco legal de la nueva norma de televisión digital, se entregaron 22 licencias para transmisión de contenidos bajo la norma ISDB-T International (En mas, ISDB-T por simplicidad). Al día de hoy, tres años después de la fecha limite para el apagón, solo algunos de los actores del rubro están





completo a todo lo que sucede dentro del mismo, en cualquier punto de la cadena de transmisión.

Además, genera la posibilidad de recrear una planta de transmisión de televisión a muy bajo costo, permitiendo su reproducción tanto en el hogar por entusiastas, en el aula por docentes o en la industria, por técnicos, lo cual puede colaborar con el mejoramiento de la calidad del servicio actual. A su vez, puede servir incluso como ejemplo para algunos de los cursos de la Facultad, generalmente catalogados por el estudiantado como muy teóricos y con poco alcance práctico.

Implementar un transmisor de televisión digital, no es una tarea sencilla. El primer problema a enfrentar es el acceso a la información técnica. Existe poca documentación generada en el país, para cumplir con las condiciones técnicas de un sistema complejo y que, además, ya lleva 7 años de vigencia como oficial. La norma presentada por la ARIB deja varias zonas grises, asume por conocidos conceptos clave, y no se explora más de lo necesario en cuestiones de fondo.

También existen fuertes limitaciones económicas para hacerse con software o hardware comercial que resuelvan incluso algunas de las funcionalidades más básicas que exige la norma.

Esta tesis intenta suplir esa carencia, en principio complementando el trabajo iniciado por el grupo ARTES con el receptor *gr-isdbt*. Se desarrolló a lo largo de este proyecto, un transmisor de televisión digital que cumple con las condiciones establecidas en la norma, y cuyas señales son decodificables por los televisores comerciales homologados por el LATU.

Contar con el trabajo presentado en *gr-isdbt* fue de una ayuda mayúscula, ya que basarse en el paradigma de código abierto ayudó a comprender, sintetizar y testear los conceptos teóricos vertidos en la norma, lo que fue fundamental para la comprensión de las funcionalidades que sería necesario implementar para poder transmitir.

Para este grupo de trabajo, es importante destacar lo valioso de la existencia de proyectos de código abierto, incontables veces encontramos en la comunidad puntos de vista, ideas y hasta algoritmos para resolver los problemas encontrados en el camino. Es por eso que esperamos poder contribuir con ella, poniendo a disposición de cualquier persona el transmisor *gr-isdbt-tx*, para que continúen con el trabajo de aprendizaje y la optimización del mismo por técnicos y estudiantes, seguramente con un mejor panorama del rubro, que el que tuvimos al implementar este proyecto.

Esperamos también, mediante el desarrollo de este documento, poder contribuir con la comunidad nacional de técnicos que trabajan en el rubro, y que no cuentan con documentación técnica generada por y para la norma nacional, con los problemas y las particularidades que la transmisión tiene en nuestro país y no tener que abstraer de trabajos de terceros, que resolvieron problemas similares en contextos diferentes. Entendemos que en este proyecto, los conceptos desarrollados por la norma se sintetizan en ordenes básicos al procesador, y al ser de código abierto y gratuito, se democratiza el acceso a una información a la que hoy por hoy solo se accede por medio de hardware y software propietario con licencias de costos elevados.

## Capítulo 1. Introducción

Para esta documentación, que acompaña el código presentado para el transmisor, definimos seis capítulos en los que se explica el desarrollo del mismo. En el capítulo 2 presentamos algunos de los conceptos fundamentales de telecomunicaciones sobre los que se construye la norma. El capítulo 3 realiza un breve pasaje por los puntos clave del sistema transmisor ISDB-T, los cuales son necesarios para comprender algunos de los bloques que conforman el sistema. Para profundizar mas en los mencionados conceptos, invitamos al lector a revisar la tesis de maestría de Pablo Flores, que pueden encontrar en [6]. El capítulo 4 se detiene particularmente en el concepto de radio definida por software y presenta en detalle una implementación del mismo, en particular aquel sobre el cual se desarrolló el transmisor, que es GNURadio. Luego en el capítulo 5 analizamos punto por punto el código generado para implementar el transmisor, explicando en cada paso los conceptos del capítulo 2 y 3 que se necesita aplicar en cada bloque, y como se extrapolaron a C++, lenguaje en el que se escribió cada uno de los bloques de procesamiento. Mas adelante, en el capítulo 6 mostramos el desempeño del transmisor como un todo, realizando las evaluaciones practicas del mismo en función de los objetivos de este proyecto y se comentan los resultados obtenidos. Para terminar, en el capítulo 7, presentamos las conclusiones del proyecto en particular y planteamos algunos desafíos que seria interesante afrontar en un futuro.

# Capítulo 2

## Fundamento Teórico

La sección de canal van a dar pie a los time interleavers y esas cosas, no? O sea, hablar de fading tanto en frecuencia y tiempo y cómo contrarrestarlo? Yo pondría la parte de DFT, FFT y convolución circular dentro de OFDM. En FFT van a hablar del algoritmo? Me parece medio al santo botón. En la parte de códigos les faltó hablar de convolucionales.

### 2.1. Modelado del canal

#### 2.1.1. Canales Continuos

#### 2.1.2. Canales Discretos

#### 2.1.3. Las no idealidades del Canal

No idealidades del canal inalámbrico móvil.

### 2.2. Estrategias para mitigar los efectos del canal

#### 2.2.1. Códigos de detección y corrección de errores

La comunicación entre emisor y receptor puede modelarse mediante el proceso de la Figura 2.1. La situación es la siguiente, una fuente emisora envía mensajes  $m$  (palabras fuente) al receptor a través de un canal de comunicación. El mensaje debe ser traducido a algún mensaje que el canal esté capacitado para enviar, estos mensajes se conocen como palabras código.

Al otro lado del canal llega un mensaje codificado  $c'$ , el cual seguramente sea erróneo, pues en todo proceso real de comunicación existe ruido e imperfecciones en los canales. El mensaje es decodificado en una palabra  $m'$ , y generalmente  $m' \neq m$ .

Se desea que el receptor sea capaz de darse cuenta si el mensaje  $m'$  es realmente lo que se transmitió del otro lado, y más aún, poder corregirlo.

## Capítulo 2. Fundamento Teórico

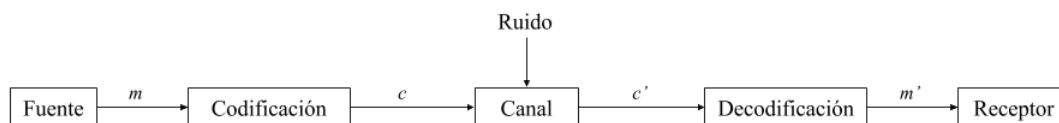


Figura 2.1: Esquema básico de codificación de canal.

La Teoría de Códigos es un campo de la matemática aplicada que busca resolver los problemas de las etapas de codificación-decodificación y corrección, y que presenta su propia complejidad.

La transmisión inalámbrica de una señal la expone a diversas fuentes de ruido, con lo cual los tipos de errores generados pueden ser muy variados. Por ejemplo los errores en ráfaga, en los que un conjunto de bits consecutivos se ven alterados, son muy comunes en las comunicaciones inalámbricas. También podría suceder que el canal radioeléctrico presente distorsión en algunas portadoras en particular.

El estándar ISDB-T hace uso de distintas técnicas modernas para la protección de los datos en transmisión. De hecho para proteger los datos en los ejemplos mencionados el estándar utiliza la *dispersión de energía* y el *entrelazamiento frecuencial*. Para la comprensión del estándar y el desarrollo de *gr-isdbt-tx*, es importante conocer el funcionamiento de estas técnicas. Profundizar en estos temas escapa los objetivos de este trabajo, por lo cual los detalles técnicos se pueden encontrar en las bibliografías mencionadas.

Para asegurarse que el receptor pueda llevar a cabo satisfactoriamente la demodulación y decodificación en una transmisión jerárquica, en la cual se utilizan múltiples parámetros de transmisión, se utiliza una señal denominada Transmission and Multiplexing Configuration Control (TMCC).

Como se verá en el Capítulo XX, la TMCC junto con otras señales piloto y las señales correspondientes a la transmisión de los datos útiles, conforman el cuadro OFDM.

Al tratarse de una señal que contiene información crítica sobre la transmisión se la debe proteger fuertemente frente a los distintos tipos de errores que podría sufrir durante su transmisión.

En particular ISDB-T establece que para la TMCC se debe utilizar el código acortado (200,118) del *difference-set cyclic code* (273,191) como código corrector de errores.

### 2.2.2. Códigos Cíclicos

El conjunto  $GF(2) \triangleq \{0, 1\}$ , con las operaciones de suma " + " y producto "  $\times$  " usuales módulo 2, cumple con la propiedad de que cualquier elemento de  $GF(2)$  distinto de cero tiene inverso. Esta propiedad se cumple trivialmente en este conjunto y es la condición necesaria para que  $GF(2)$  sea un *Campo de Galois*. Es común encontrar que a este campo también se lo llame *campo binario* y se lo denote

## 2.2. Estrategias para mitigar los efectos del canal

como  $\mathbb{F}_2$ . Las operaciones de suma y producto definidas en  $GF(2)$  son asociativas, conmutativas y distributivas, y llevan elementos de  $GF(2)$  en elementos de  $GF(2)$ . Por esto  $GF(2)$  también es un *anillo*. El conjunto de todos los polinomios con coeficientes en  $GF(2)$  con las operaciones usuales de suma y producto forman un *anillo de polinomios* en  $GF(2)$  y se denota como  $GF(2)[x]$ . Por ejemplo  $g(x) = x^3 + x + 1$  es un elemento de  $GF(2)[x]$ .

Sea  $\mathbf{c} = (c_0, c_1, \dots, c_{n-1}) \in GF(2)^n$ , con  $GF(2)$  tal como se describió anteriormente. Un código  $\mathcal{C}$  de bloque  $(n, k)$  se dice que es un *código cíclico* si para cada vector  $\mathbf{c} = (c_0, c_1, \dots, c_{n-1}) \in \mathcal{C}$  cualquier rotación circular a la derecha de  $\mathbf{c}$  también pertenece a  $\mathcal{C}$ , es decir  $(c_{n-1}, c_0, c_1, \dots, c_{n-2}) \in \mathcal{C}$ . Los códigos de bloque se caracterizan por codificar mensajes de longitud fija  $k$  en *codewords* de longitud fija  $n$ , con lo cual el tamaño del mensaje original se incrementa en  $n - k$ . Cada *codeword* del código  $\mathcal{C}$  puede ser representada en una forma polinomial de la siguiente manera:

$$c(x) = \sum_{i=0}^{n-1} c_i x^i \quad (2.1)$$

A continuación se enumera una serie de propiedades de los códigos cíclicos, en [4] se puede encontrar una demostración detallada de cada una de ellas.

- Un código cíclico es un código lineal de bloque
- Cada *codeword* se corresponde con un polinomio
- Los polinomios del código forman un *ideal* en  $GF(2)[x]/(x^n - 1)$
- Para un código cíclico existe un generador  $g(x)$  que es divisor de  $x^n - 1$  y que puede generar todos las *codewords*  $c(x) = m(x)g(x)$

Se puede probar que esto implica la existencia de una *matriz de chequeo de paridad*  $\mathbb{H} \in \mathcal{M}_{(n-k) \times n}$  tal que para toda *codeword*  $\mathbf{c}$  de  $\mathcal{C}$  se cumple  $\mathbf{c}\mathbb{H}^T = \mathbf{0}$ .

El proceso de codificación se realiza de la siguiente manera, primero se construye el polinomio  $x^{n-k}m(x)$  de grado  $n$ . Luego se divide entre el polinomio generador  $g(x)$  y el resto de esa división es el polinomio de paridad  $d(x)$  que se le agregará al mensaje:

$$x^{n-k}m(x) - q(x)g(x) = d(x) \quad (2.2)$$

La *codeword* se forma de la siguiente manera:

$$c(x) = x^{n-k}m(x) - d(x) = q(x)g(x) \quad (2.3)$$

Como se trata de un múltiplo de  $g(x)$ , entonces efectivamente es una *codeword* válida. La representación vectorial de la *codeword* queda de la siguiente manera:

$$\mathbf{c} = (-d_0, -d_1, \dots, -d_{n-k-1}, m_0, m_1, \dots, m_{k-1}) \quad (2.4)$$

## Capítulo 2. Fundamento Teórico

En una situación en la que se recibe una palabra  $\mathbf{r}$  cuyo mensaje es  $\mathbf{m}$  y sus bits de paridad son  $\mathbf{d}$ , el procedimiento para detectar si hubo error es codificar el mensaje  $\mathbf{m}$  que se recibió con el mismo codificador utilizado por el transmisor (ambas partes deben conocer el polinomio generador), y luego comparar el  $\mathbf{d}'$  obtenido con el  $\mathbf{d}$  recibido. Si ambos difieren entonces hubo error. Por ejemplo, para un código cíclico (7, 4) con polinomio generador  $g(x) = x^3 + x + 1$  se desea codificar el mensaje 1001. Los mensajes codificados tendran  $n - k = 7 - 4 = 3$  bits de paridad. El mensaje en su forma polinomial queda  $m(x) = 1 + x^3$ . Los bits de paridad se obtienen calculando el resto de la division  $x^{(7-4)}m(x)/g(x)$ , los coeficientes de ese resto seran los bits de la paridad buscada. Operando se llega a que la paridad es 011 y el mensaje codificado queda 0111001.

### 2.2.3. Códigos BCH

### 2.2.4. Códigos de Reed-Solomon

### 2.2.5. Entrelazamiento de datos

## 2.3. Modulación OFDM

Chang presenta un metodo para lograr la multiplexion canales de datos a través de un medio de frecuencia acotada, en [2], que elimina los efectos de interferencia intersimbolica e intercanal. Implico un cambio importante en la teoría de telecomunicaciones de la época, pues hasta entonces, los resultados existentes tomaban como funciones modulantes ortogonales, señales limitadas en el tiempo, lo que implica grandes anchos de banda en frecuencia, y en los canales de banda acotada implementados en la practica se traducían en interferencias producto de los recortes en banda.

En el paper, Chang postula la idea de una nueva clase de funciones modulantes acotadas en frecuencia, que ademas, permite modular de manera independiente amplitud y frecuencia. En ese momento se sentaban las bases de la modulacion OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).

Uno de los mayores problemas de los sistemas FDM, era la incapacidad para escalar en cantidad de canales. La complejidad y el costo de construir los osciladores para la cantidad de portadoras necesarias, mantenían la brecha entre la teoría y la practica.

La solución a estos problemas, llega cuando se logra programar computadoras capaces de procesar grandes cantidades de datos, mediante la implementación del algoritmo de "Fast Fourier Transform".

Weinstein y Ebert, resolvieron en [7] el problema de la escalabilidad de los sistemas FDM, mediante la conjugacion de los mencionados avances tecnologicos, discretizando las señales a transmitir, y modulandolas por computadora, en lugar de usar los bancos de osciladores.

Una señal multitonal, puede ser vista como la transformada de fourier de un tren de pulsos, y la demodulacion coherente a su vez puede entenderse como la

## 2.4. MPEG y sus Estándares

aplicación en tiempo continuo de una transformada inversa de Fourier. Entonces, probaron que muestreando la señal de origen, y mediante la implementación de un modem sobre una computadora que ejecute el algoritmo de la transformada rápida de Fourier, se pueden obtener aproximaciones suficientemente cercanas a los de la señal original.

En principio el resultado es válido para un sistema FDM con  $N$  canales simultáneos, con portadoras separadas en frecuencia en distancias suficientemente cercanas, como para aproximar la respuesta al impulso del canal, como si fuese de módulo constante sobre cada uno de los  $N$  canales.

Pero falta un paso más, pues la hipótesis del comportamiento del canal constante, se aleja bastante de la realidad. Plantearon entonces un canal, de respuesta al impulso lineal en frecuencia.

En estas condiciones, y atendiendo además que la señal discreta a transmitir solo “vive” en el ancho de banda de transmisión ( $N \cdot \Delta f$ ), consideraron a la señal a transmitir como una transformada de Fourier enventanada. Desarrollando estas ideas lograron probar que, si la ventana es plana en las frecuencias de interés, y se agregan “guardas” de seguridad a ambos lados de las portadoras activas, de modo que las colas del enventanado caigan de forma continua, (alejando el enventanado de la idealidad de las ventanas rectangulares) se logran condiciones para reducir la distorsión generada por la respuesta al impulso del canal, a efectos transitorios de dispersión rápida, y la señal en recepción sigue convergiendo a la señal transmitida.

## 2.4. MPEG y sus Estándares

El Moving Picture Experts Group (MPEG) [5] es un grupo de trabajo conformado por expertos internacionales, formado por la Organización Internacional de Normalización (ISO) en conjunto con la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), con el objetivo de desarrollar estándares para la codificación, compresión y transmisión de audio y video.

Uno de los estándares publicados por el MPEG, es MPEG-4. Consta de métodos para la compresión digital de contenidos audiovisuales, y abarca la difusión de los mismos a través de una amplia gama de tecnologías, desde el streaming de datos a través de la web, codificación de voz y video para telefonía y videoconferencias, comercialización de discos compactos (CD) y hasta formatos para la transmisión de Televisión.

Es en este último punto donde se vincula con ISDB-T Internacional, puesto que para la codificación de fuente en la norma, fue seleccionado el Estándar MPEG-4 Parte 10 “Advanced Video Coding”, también denominado H.264.

Para garantizar que los receptores de televisión digital ISDB-T, también sean compatibles con los transmisores tanto de ISDB-T como de ISDB-T Internacional, se encapsulan los videos codificados en H.264 dentro de un formato denominado “Transport Stream” que se define en la norma MPEG-2 Parte 1 – Sistemas.

En el transmisor gr-isdbt-tx, tomamos como fuente de datos un archivo codificado como Transport Stream, para garantizar esta compatibilidad.

## Capítulo 2. Fundamento Teórico

### 2.4.1. MPEG 2 Transport Stream

### 2.4.2. Tablas PAT

### 2.4.3. Tablas PMT



## Capítulo 3

# El Sistema de Televisión Digital Terrestre ISDB-T

Este sería el capítulo más corto, pero está bueno que sea únicamente de qué cosas usa ISDB-T de lo que se discutió en el capítulo anterior, y qué parámetros son importantes a la hora de implementar un tx/rx.

- 3.1. BTS como fuente de datos
- 3.2. Robustecimiento frente a las no idealidades del canal
- 3.3. Las portadoras y la modulación
- 3.4. Formación de los frames OFDM
- 3.5. La puesta en el aire de la señal

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

## Capítulo 4

# Radio definida por Software

Acá hay que hablar en genérico qué es el paradigma para después hablar de hardware (las opciones que hay y cuáles usaron, dando sus especificaciones) y software (GNU Radio y gr-isdbt). - Implementación del transmisor Tratar de hablar de las cosas que más trabajo les dió y qué lecciones les quedaron. Si la explicación teórica ya está en un capítulo anterior, no ser repetitivos, me explico? O sea, que sea más de implementación.

### 4.1. GNU Radio

### 4.2. Hardware

#### 4.2.1. Alcance del transmisor

#### 4.2.2. Antenas de laboratorio

### 4.3. gr-isdbt

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

## Capítulo 5

# Un transmisor ISDBT implementado en GNU Radio

### 5.1. Generalidades del Transmisor

Por ejemplo algunas

### 5.2. El flujo de datos en GNU Radio

### 5.3. Obtencion de los TSP por capa

### 5.4. Codificaciones de Canal

### 5.5. La modulacion

### 5.6. El uso de los entrelazamientos

### 5.7. Formacion de cuadros OFDM

#### 5.7.1. Las portadoras piloto

#### 5.7.2. Las portadoras activas

### 5.8. El prefijo ciclico

### 5.9. La transmision desde USRP

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

## Capítulo 6

### Evaluacion del sistema

Al menos algunas pruebas de alcance y compatibilidad. Con el poco tiempo que nos queda no va a dar para mucho más.

6.1. Pruebas sobre gr-isdbt

6.2. Pruebas sobre televisores comerciales

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.



## Capítulo 7

### Conclusiones y trabajo a futuro

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Apéndice A

## Algo que agregar

De lo que aprendí y no es tan relevante.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur non neque tempor nunc fringilla tincidunt a a tortor. Phasellus leo turpis, commodo aliquam vehicula a, auctor in magna. Nulla non venenatis neque. Sed sit amet turpis metus, vel accumsan ligula. Suspendisse malesuada lacus sed tellus mollis a posuere mi porttitor. Nunc venenatis ante sit amet metus euismod iaculis. Phasellus accumsan lacinia eros, nec tempor lacus malesuada a. Suspendisse leo justo, pulvinar vitae molestie sit amet, ullamcorper ut mauris. Proin sed est ipsum.

Nulla leo ligula, porttitor eu dapibus non, porta sit amet enim. Ut eros nibh, fringilla ultrices rhoncus ut, luctus ut nibh. Nam id urna ac ligula fermentum rutrum. Sed eu cursus lacus. Donec pretium fermentum augue, eu interdum ipsum faucibus a. Praesent feugiat elit ligula. Sed ac augue luctus ligula aliquet scelerisque commodo nec justo. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Vivamus eget sem ac sapien elementum suscipit. Ut odio tellus, accumsan sit amet condimentum vehicula, vestibulum quis dui. Quisque posuere semper massa quis cursus. Aliquam gravida tellus eget lorem congue dapibus. Duis id quam eu arcu porta commodo vel at nunc. Nulla in venenatis lorem. Donec congue vehicula bibendum.

Vestibulum pulvinar lorem a velit bibendum porttitor sagittis nisl tempus. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Fusce ut mi sit amet metus ultrices feugiat ut nec lorem. Nunc felis lorem, consectetur ut eleifend et, vestibulum id purus. Praesent nec augue quis neque sodales commodo nec ac urna. Sed a nibh ac odio sodales pulvinar. Pellentesque ut odio orci. Nam dictum hendrerit felis at ullamcorper. Integer eget sapien libero, in congue tortor. Nullam blandit vestibulum aliquet. Nullam vulputate sapien quis nisl molestie vulputate. Aliquam elementum eros quis ante ultrices ultricies. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Donec porttitor sodales aliquam. Ut sit amet risus justo. Integer eu iaculis orci.

Sed lectus tellus, porttitor in viverra sed, viverra nec nunc. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Fusce gravida eleifend nisi, sit amet pulvinar ligula gravida id. Vivamus est massa, viverra sit

## Apéndice A. Algo que agregar

amet ornare non, consectetur sit amet elit. Nam sapien lectus, pharetra sit amet imperdiet ultrices, iaculis eget enim. Curabitur in felis et lectus malesuada pellentesque vestibulum ac dolor. Vivamus quis nulla tortor. Sed adipiscing fringilla leo, sit amet sodales felis volutpat id. Proin vitae arcu libero. Suspendisse sit amet est tellus. Aliquam sit amet metus ut arcu placerat feugiat. Nulla eget magna id odio facilisis blandit. Nam porta ultricies est, sed bibendum mauris volutpat ac. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Maecenas vel lorem lorem. Donec et purus a tellus lacinia fringilla a non lectus.

Sed pretium porttitor fermentum. Vivamus semper lobortis dictum. In interdum, libero id iaculis laoreet, sapien diam tristique lorem, sit amet aliquam sapien sem ac tortor. Phasellus tincidunt tempor condimentum. Aenean luctus, erat non fermentum rhoncus, quam odio gravida massa, sed scelerisque tellus elit ut massa. Suspendisse vel posuere ipsum. Vestibulum dolor leo, ornare quis faucibus non, consequat ut purus. Maecenas at massa turpis, vitae pretium metus. Mauris mollis dolor turpis, semper dignissim tellus. Sed vel ligula eu turpis accumsan vehicula id in nisl. Pellentesque sit amet mi lorem. Suspendisse potenti. Proin bibendum luctus accumsan. Mauris urna elit, lacinia sit amet adipiscing feugiat, vestibulum sed mauris.

# Referencias

- [1] ARIB. Association of radio industries and businesses, 1995. [Web; accedido el 06-11-2018].
- [2] Robert W Chang. Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission. *Agregar Luego*, 1966.
- [3] Instituto Nacional de Estadística. *Encuesta Continua de Hogares*, 2017.
- [4] Todd K Moon. Error correction coding. *Mathematical Methods and Algorithms*. Jhon Wiley and Son, 2005.
- [5] MPEG. Moving picture experts group, 1995. [Web; accedido el 06-11-2018].
- [6] Federico Larroca Pablo Flores. *Encuesta Continua de Hogares*, 2017.
- [7] Weinstein and Edbert. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete fourier transform. *Agregar Luego*, 1971.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

## Índice de tablas

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.



# Índice de figuras

1.1. Distribución de las estaciones transmisoras de TV digital en el Uruguay. . . . .	2
2.1. Esquema básico de codificación de canal. . . . .	6



Esta es la última página.  
Compilado el jueves 20 septiembre, 2018.  
<http://iie.fing.edu.uy/>