

HERRAMIENTA EDUCATIVA PARA VISUALIZAR, AJUSTAR LOS RETARDOS DE SINCRONIZACIÓN Y PROGRAMAR LA PLANTA TRANSMISORA EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA PARA TV DIGITAL ABIERTA

Carlos Guillermo Liendo, Universidad Nacional de Córdoba, FCEfYN
carlosliendo@unc.edu.ar
Néstor Oscar Pisciotta, Universidad Blas Pascal
npisciotta@ubp.edu.ar
Maximiliano Fried, Universidad Nacional de Córdoba, FCEfYN
maxi_fried@hotmail.com

Resumen

Las Redes de Frecuencia Única (SFN - Single Frequency Network) son un recurso que la ingeniería utiliza para lograr mayores áreas de cobertura en televisión digital abierta y que tienen como principal ventaja el ahorro de espectro, ya que funcionan con transmisores sincronizados en una misma frecuencia. El sistema ISDB-Tb permite lograr la sincronización mediante ajustes automáticos y manuales. Cuando un determinado receptor recibe señales provenientes de distintos transmisores, es condición de funcionamiento que la referencia de cuadro de cada una de las señales emitidas llegue dentro del “Intervalo de Guarda” (IG). Cuando esto no sucede, es necesario compensar los retardos de propagación y para lograrlo, se debe realizar un análisis dinámico de las múltiples señales (*ecos*) que llegan al receptor. Visualizar y ajustar los retardos es una tarea compleja y por ello, en este artículo se presentan las funcionalidades de la Calculadora ISDB-Tb versión 2.0, una aplicación educativa on-line de acceso libre que puede ser empleada durante la fase de aprendizaje del funcionamiento de las SFN en los cursos avanzados de ingeniería. La calculadora emplea la denominada “ventana de sincronización” (VS), una herramienta que permite analizar los retardos de las emisiones en distintos puntos de recepción y ayuda a lograr la sincronización. Adicionalmente permite configurar todos los parámetros de funcionamiento de los moduladores ISDB-Tb de cada sitio de transmisión.

Palabras clave

ISDB-Tb; SFN; Sincronización; Ajuste de retardos; TV digital

1. Introducción a las Redes de Frecuencia Única

Las SFN se conforman con dos o más transmisores que emiten en la misma frecuencia y que además transmiten exactamente la misma información. Cuando la red está sincronizada se dice que los transmisores emiten “la misma información de manera sincronizada”. Estas redes se diseñan para conseguir una mayor área de cobertura, la cual no sería posible de lograr con un solo transmisor. También se utilizan para cubrir áreas de sombra que se producen por obstrucciones naturales o artificiales existentes dentro de la cobertura primaria de la estación. Antes de continuar con las particularidades de las SFN, es importante destacar que el objetivo buscado es la emisión de una programación o contenido audiovisual dentro del canal asignado en una determinada área geográfica, situación que depende de la licencia otorgada por la autoridad de aplicación. Cuando las áreas a servir son extensas y no se pueden cubrir con un solo transmisor, existen dos soluciones posibles:

1. Construir una Red de Frecuencia Múltiple (MFN - Multiple Frequency Network) en donde los transmisores que conforman la red emiten en canales distintos. Si las áreas de

cobertura se superponen, cualquier receptor ubicado en esas zonas podría recibir al menos dos emisiones, pudiendo seleccionar cualquiera de ellas. Las redes MFN tienen la desventaja de una mayor ocupación del espectro radioeléctrico y por lo tanto son menos eficientes, especialmente cuando la red tiene varios transmisores y áreas de cobertura superpuestas.

2. Construir una SFN, en donde todos los transmisores emiten en la misma frecuencia. Para que este tipo de red funcione correctamente, se deben cumplir tres condiciones:
 - i. Operar en la misma frecuencia.
 - ii. Transmitir el mismo programa.
 - iii. Transmitir la misma información, es decir los mismos bits de manera sincronizada en todos los transmisores de la red, lo cual implica:
 - a. Utilizar la misma configuración (parámetros de modulación y codificación).
 - b. Emplear el mismo modo e intervalo de guarda. El intervalo de guarda es fundamental para posibilitar el funcionamiento de las redes SFN.

La condición i. constituye la esencia del funcionamiento de una SFN y no requiere mayores explicaciones.

La condición ii. establece que todos los transmisores que conforman la SFN deben transmitir la misma programación, hecho que resulta evidente, pues en caso contrario la situación sería asimilable a la interferencia producida entre dos estaciones distintas que operen en la misma frecuencia.

La condición iii. se logra gracias a los recursos de sincronización dinámica y estática previstos por el Sistema ISDB-Tb (*Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial - Radiodifusión Digital de Servicios Integrados Terrestre*). En la dinámica, los transmisores ajustan sus retardos en base a las señales de referencia generadas por los satélites de GPS (*Global Positioning System*): 1 pulso por segundo (pps) y 10 MHz. Lo que se busca es compensar los retardos introducidos por los equipos y el retardo de tiempo de propagación de la señal desde el nodo principal en donde se genera la transmisión hasta cada emisor. En la práctica, el nodo principal se vincula con cada transmisor mediante algún tipo de enlace: radioeléctrico, por fibra óptica o satelital. Estos enlaces tienen un retardo que puede variar desde los cientos de microsegundos hasta cientos de milisegundos. Cuando se conforma una red con varios transmisores, los retardos de cada enlace estudio-planta transmisora deberán ser compensados para lograr la emisión sincronizada a la que se hace referencia.

La señal de referencia de 1 pps del GPS llega a todos los transmisores de la red al mismo tiempo. Por otro lado, estos emisores reciben, además de la programación, cierta información específica tal como el bit de inicio de cuadro par, que indica el comienzo de la secuencia normalizada de datos que se transmitirá. El tiempo que demora este bit en llegar al transmisor se mide con respecto a la señal de referencia de 1 pps. A partir de este valor se calcula el “ajuste de retardo”, valor de tiempo a introducir para igualar el “retardo de red”, cifra que todos los transmisores de la red deben alcanzar en relación a la referencia de 1 pps.

La condición iii.b. se relaciona con la superposición de áreas de cobertura. En estas áreas, los receptores reciben señales directas provenientes de dos o más transmisores e incluso de señales reflejadas (*ecos*) en montañas, edificios, etc. Estos ecos generan zonas de solapamiento cuyo efecto es el mismo que las señales directas provenientes de dos o más transmisores.

Los sistemas basados en OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) incorporan un Intervalo de Guarda (IG) como medio de protección ante la superposición de múltiples emisiones en la misma frecuencia (varios transmisores y/o multi-trayectorias) y consiste en un agregado que se coloca al principio de cada símbolo. Con la ayuda del IG, el receptor determina la posición de una ventana temporal dentro de la cual realiza el cálculo de la FFT (*Fast Fourier*

Transform), operación que permite la demodulación de los símbolos OFDM que conforman la señal. Si todas las señales que llegan a la antena receptora lo hacen dentro de un lapso de tiempo menor o igual a la duración del IG, se evita la interferencia entre símbolos, haciendo posible la demodulación de la señal recibida.

El trabajo del ingeniero al momento de diseñar una SFN consiste en determinar los valores de retardo que se deben aplicar a cada transmisor para garantizar que todos los receptores puedan desmodular la señal en las zonas de solapamiento. Esta tarea puede resultar muy tediosa si se realiza en forma manual sobre un mapa de cobertura. Actualmente se dispone de software especializado que ayuda a predecir los puntos críticos de recepción y a calcular los retardos necesarios, tales como los señalados en la bibliografía [1] y [2]. Una alternativa es utilizar instrumentos de medición específicos como el indicado en [3], que permiten verificar y determinar los retardos una vez que la red se encuentra en funcionamiento. En todos los casos se trata de herramientas de costo elevado y por lo tanto, inviables para su uso con fines educativos.

2. Parámetros de transmisión

En el sistema OFDM la transmisión se hace con múltiples portadoras en el ancho de banda del canal. Según la norma ISDB-Tb se establece Modo 1: 1405, Modo 2: 2809 y Modo 3: 5617 portadoras, cada portadora transporta los bits del flujo de entrada según el esquema de modulación digital seleccionado. Las portadoras se agrupan en 13 segmentos y los segmentos se pueden agrupar en hasta 3 Capas (A, B y C), la situación de usar Capa A con 1 Segmento se utiliza para transmitir el servicio móvil, denominado One-Seg. El agrupamiento en Capas permite darle jerarquía a los bits que se transmiten, pudiendo seleccionar para cada Capa: el esquema de modulación (QPSK, 16-QAM y 64-QAM), la codificación convolucional (1/2, 2/3, 3/4, 5/6 o 7/8) y el entrelazado de tiempo.

El funcionamiento de OFDM implica que las portadoras no deben interferirse entre ellas (ICI – Inter Carrier Interference), para esto es determinante su separación en frecuencia, esto se consigue cuando la inversa de la separación de portadoras en frecuencia sea igual al tiempo de duración de un Símbolo OFDM. Los símbolos se suceden uno tras otro transportando el flujo binario.

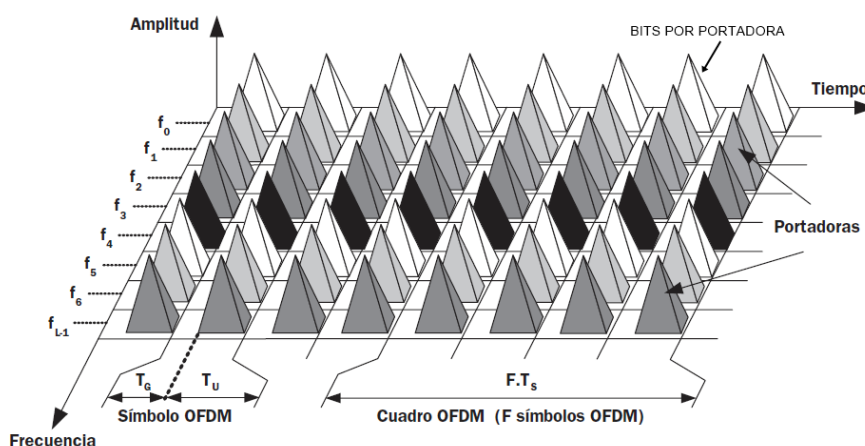


Figura 1. Símbolo y Cuadro OFDM. Fuente [4]

En la Figura 1 se muestra un diagrama simplificado en tres dimensiones, en el eje de frecuencias están las distintas portadoras y en eje de tiempo la duración del Símbolo OFDM ($T_U + T_G$). La sucesión de 204 Símbolos se denomina Cuadro OFDM. Este contiene toda la información para que el receptor recupere el flujo binario transmitido.

El tiempo T_G se denomina IG (Intervalo de Guarda) y es una variable que se selecciona entre $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{16}$ o $\frac{1}{32}$ de T_U . IG es fundamental para evitar las interferencias entre símbolos (ISI – Inter Symbol Interference) que lleguen a la antena del receptor desde varios transmisores o ecos por rebotes en obstrucciones. Esta es una condición clave para el funcionamiento de las SFN, los Símbolos de distintos transmisores o ecos deben arribar a la antena del receptor en un tiempo menor al IG.

Como ejemplo, en el Modo 3 T_U es $1008\mu s$, si el $IG = \frac{1}{8}$ el T_G será $126\mu s$. Si la diferencia de tiempo entre dos transmisores que llegan al receptor es menos que $126\mu s$ el sistema funciona. Otra forma es utilizar el equivalente a distancia considerando que la propagación se hace a la velocidad de la luz, para $126\mu s$ la protección será de $37,8km$. Se sugiere al lector que indague en la referencia [4] donde se brindan las tablas con todas combinaciones posibles entre las variables.

En la Figura 2 se muestran dos transmisores Tx1 y Tx2, un receptor ubicado en Rx1 y un rebote en la montaña, ambos transmisores emiten la misma programación y conforman una SFN, por lo que un Símbolo OFDM determinado se emite desde cada antena al mismo tiempo y llegarán a la antena del receptor con diferencias de tiempo que dependen de los retardos de propagación por las distancias que separan a cada transmisor del receptor, d_2 es mayor que d_1 y el eco d_1' se ubica entre ambos, se deduce que los tiempos de retardo de propagación son distintos para los tres trayectos. Si se cumple la condición indicada arriba no habrá ISI y el receptor desmodulara el flujo sin errores.

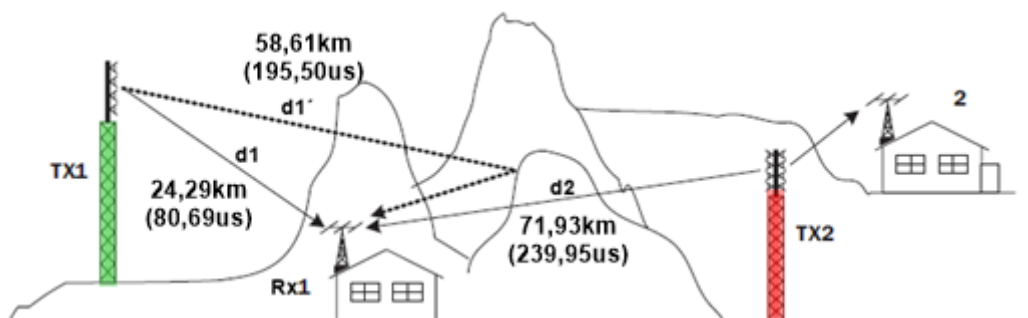


Figura 2. SFN. Recepción múltiple. Fuente [4]

En el apartado 1. se estudió que la SFN se sincroniza en forma dinámica con las señales provenientes del GPS (ver Figura 4). Esto garantiza que los transmisores emitan el mismo Símbolo al mismo tiempo, entonces en la Figura 2 queda por compensar las distancias d_1 , d_1' y d_2 para que lleguen dentro del IG. Este es el aporte que hace la Calculadora para simplificar el ajuste.

Por otro lado, se estudió que a todos los transmisores de la red se les debe aplicar un Retardo de Red, el cual debe tener un valor menor a $1s$ y mayor que el mayor de los retardos de los enlaces del BTS más los retardos propios del Modulador. El Retardo de Red se utiliza como objetivo de tiempo a alcanzar, en relación a $1pps$, por todos los transmisores independientemente de los equipos que se utilicen para los enlaces del BTS y el tipo de Modulador e incluso frente a cambios de equipos que se pudieran realizar, el sistema se auto-compensa. Por ésta razón se usa la referencia común de $1pps$. Otra razón del Retardo de Red es que en la tarea de sincronización de las diferencias de retardo debidas a las distancias de propagación, suele ser necesario adelantar algún transmisor y esto solo se puede lograr si previamente todos están retrasados. No se puede adelantar un Símbolo antes de que éste ocurra. Las distancias de propagación se compensan aumentando o disminuyendo el Retardo de Red (a

esto se le denomina offset de retardo). Un Retardo de Red típico es de 300ms, aunque puede ser de 700ms si el transporte del BTS se realiza por satélite.

Volviendo a la Figura 2, Tx2 está a 239,95µs del Rx1 y Tx1 está a 80,69µs, además los dos están atrasados en 300ms (no se tiene en cuenta porque afecta a todos los transmisores). Cuando un Símbolo de Tx1 llegue a Rx1 el mismo símbolo estará a 239,95µs - 80,69µs = 159,26µs y como IG es 126µs habrá interferencia.

Una forma de representar esto es con la Ventana de Sincronización. La Figura 3 muestra la diferencia de tiempo entre la señal primero en llegar al receptor (Tx1), Tx2 y el eco de Tx1. El eco de Tx1 está dentro de IG por lo que no interfiere. Tx2 si interfiere.

Una solución a la interferencia es “adelantar virtualmente” Tx2 para que llegue dentro del IG, ejemplo: que la diferencia con Tx1 sea de 100µs, ver Figura 3 en líneas de puntos. Para que esto ocurra el adelanto será 239,95-100-80,69 = 59,26µs.

Para comprender, “adelanto” implica que Tx2 debe empezar a emitir el Símbolo 59,26 µs antes que el otro transmisor. Para introducir ese valor en el Modulador de Tx2 debemos transformarlo a módulos de 100ns por ser éste el período de los 10MHz recibido del GPS que se utiliza para el reloj de las líneas de retardo en el Modulador. 59,26µs equivalen a 592,6x100ns, se programa el offset con 593 módulos de 100ns.

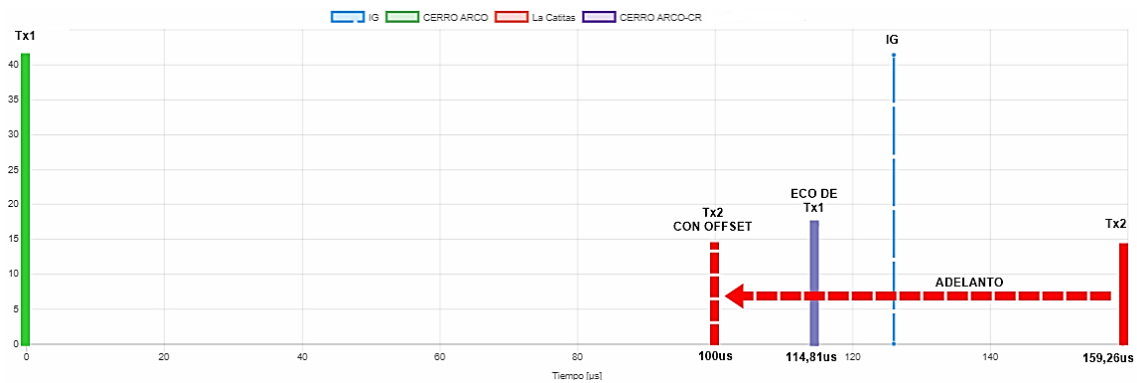


Figura 3 Ventana de Sincronización. Fuente [5]

El resultado de aplicar el adelanto a Tx2 se muestra en la Ventana de Sincronización, líneas discontinuas, Figura 3.

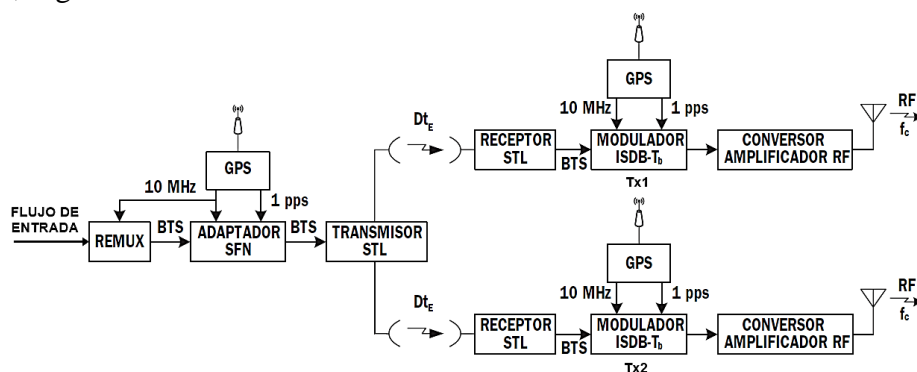


Figura 4. Red SFN con compensación dinámica de retardos. Fuente [4]

En la Figura 4 se muestra el diagrama de la SFN con los transmisores Tx1 y Tx2. El BTS se envía a cada Modulador por medio de dos radioenlaces. La función del BTS es transportar el flujo de entrada, que ingresa en paquetes de 188 bytes, agregando a cada paquete 16 bytes quedando en 204 bytes.

El BTS se estructura en lo que se denomina Cuadro Múltiplex a nivel de bits que es equivalente al Cuadro OFDM a nivel de portadoras. El Cuadro Múltiplex comienza con un paquete especial

denominado IIP (ISDB Information Packet) que se repite al inicio de cada Cuadro. A su vez el IIP transporta dos bits de señalización, uno para indicar Campo par e impar y otro para indicar el comienzo del Cuadro. La “referencia de sincronización” de la red SFN es la combinación de los dos bit que indican el inicio del Cuadro Par.

El GPS suministra la referencia de 1pps común a todo el sistema, en la Figura 5 se muestra el flanco activo que se repite cada 1s. Los Moduladores miden el tiempo que transcurre entre el flanco activo de 1pps y la llegada de la referencia de sincronización, que depende de los retardos de los enlaces del BTS, puntos (a) en la figura. Cada Modulador resta ese tiempo al Retardo de Red y obtiene el tiempo que debe retardar el Modulador para que la emisión se retrarde el valor del Retardo de Red. Ejemplo para el Modulador del Tx1: desde el flanco de 1pps hasta la referencia de sincronización 300ms restado al Retardo de Red de 500ms es igual a 200ms que se deben aplicar al Modulados del Tx1.

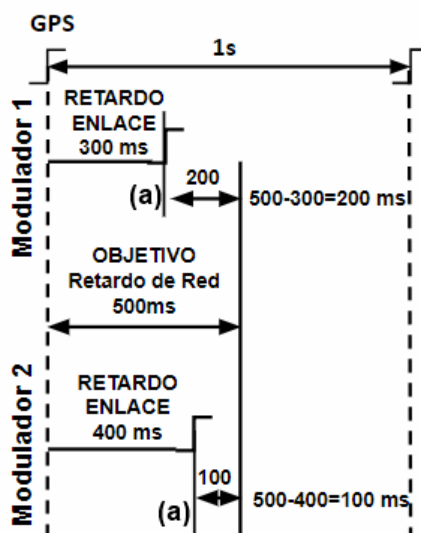


Figura 5. Sincronización Dinámica. Fuente propia

Con éste procedimiento, de manera dinámica se sincroniza automáticamente la SFN, solo queda por compensar los retardos desde la antena transmisora hasta el receptor que se hace con el offset que consiste en sumar o restar un tiempo al valor del Retardo de Red.

3. Herramienta educativa Calculadora ISDB-Tb Versión 2.0

El libro de referencia en el cual se basa éste artículo [4] contiene el desarrollo pormenorizado de la Norma ISDB-Tb, desde la entrada del flujo de datos de los programas a emitir hasta la antena transmisora. El libro incluye un sencillo software en formato ejecutable, llamado “Calculadora ISDB-Tb” versión 1.0, que permite configurar fácilmente los distintos parámetros del modulador, además de calcular automáticamente las distintas variables de funcionamiento del sistema. También permite determinar la auto-interferencia en el receptor, ingresando las distancias del recorrido de la señal por camino directo del transmisor al receptor y por un camino reflejado. Luego de varios años de enseñanza de la Norma en numerosos cursos, los autores de este trabajo decidieron avanzar con el desarrollo de una nueva versión de la Calculadora, que estuviera disponible on-line y que integrara algunos elementos necesarios para el trabajo en SFN, tales como la cartografía y la ventana de sincronización. El desarrollo de ésta nueva versión fue motivo

de un trabajo final en la carrera de grado de ingeniería [5]. El resultado del desarrollo está disponible con acceso libre en el enlace [6].

La Calculadora ISDB-Tb v2.0 se pensó como una herramienta educativa disponible en línea para facilitar el uso desde cualquier navegador. Muestra el sistema completo desde los flujos de entrada a la salida en radiofrecuencia por la antena. Se pueden configurar las etapas simulando lo que se hace en el campo profesional con equipos reales. Es una herramienta auxiliar para la enseñanza de la norma ISDB-Tb que se puede utilizar mientras se hace el desarrollo teórico y/o para la resolución de ejercicios prácticos en situaciones reales. El uso de la Calculadora para la enseñanza permite:

- Comprender el funcionamiento del sistema de forma integral
- Identificar los distintos equipos que intervienen en el sistema
- Identificar las distintas variables o parámetros y el lugar donde se ingresan
- Visualizar todos los resultados al aplicar la norma y compararlos con el estudio teórico
- Obtener resultados inmediatos cuando se cambian las variables
- Visualizar en la cartografía las posiciones de los transmisores y la problemática de los retardos de propagación
- Identificar las interferencias y verificar los resultados de las correcciones

La Calculadora no ofrece soluciones de área de cobertura en radiofrecuencia.

3.1. Descripción general de la Calculadora ISDB-Tb versión 2.0

Se hará una descripción de las funcionalidades de la Calculadora en su versión 2.0. Para no extender el informe con imágenes de las secciones y sub-secciones, se invita al lector a acceder a la misma desde el enlace [6]. Lo primero que se muestra es la portada del libro [4] a modo de presentación, donde está disponible el acceso a la primera ventana o Inicio. Ingresando a “Entrar” se muestra el diagrama en bloques completo del sistema Estudios/Planta Transmisora, desde las entradas de los flujos de programas hasta la antena, que incluye el conjunto (a) Codificadores de video y audio, (b) Multiplexor, (c) Re-Multiplexor, (d) Modulador, (e) Amplificador de Potencia (f) Filtros de máscara y (g) Antena. Además se muestran los GPS y la inserción de Tablas y Control del sistema.

Un menú con distintas secciones permite acceder a los módulos (a) hasta (d). También el acceso a éstos se puede hacer directamente accionando los enlaces en el diagrama en bloques. Otra funcionalidad permite conocer el contenido principal de los flujos de las señales en varios puntos del sistema accionando los enlaces en los caminos que unen los distintos bloques.

Los bloques (a), (b) y (c) conforman lo que se denomina Estudios y los bloques (d) hasta (g) Planta Transmisora.

La Calculadora permite conformar redes SFN donde intervienen: un Estudio (bloques a, b y c) con hasta tres Codificadores de video/audio que corresponden a tres señales o programaciones de televisión digital a transmitir por el sistema y hasta cuatro Plantas Transmisoras (bloques d hasta g). La Figura 6 muestra el diagrama de la SFN que se puede configurar con la Calculadora.

La señal que entrega el Re-Multiplexor, BTS, se distribuye a todos los transmisores que conforman la SFN mediante equipos de enlace punto a punto cuyas tecnologías dependen de la posición de los transmisores, la geografía, las distancias entre Estudios y cada Transmisor.

En la mayoría de las aplicaciones se utilizan enlaces de fibra óptica o satelitales, sin embargo también se pueden utilizar enlaces de microondas, cable coaxial o cables Ethernet. Se muestra que tanto en Estudios como en cada una de las Plantas Transmisoras los equipos reciben las señales de 1pps y 10 MHz de los Receptores de GPS. En la Figura 6 se muestra un receptor que

se encuentra a distintas distancias, d_1 a d_4 , de los transmisores, éstas son las que bajo ciertas situaciones producen las interferencias y deben ser compensadas.

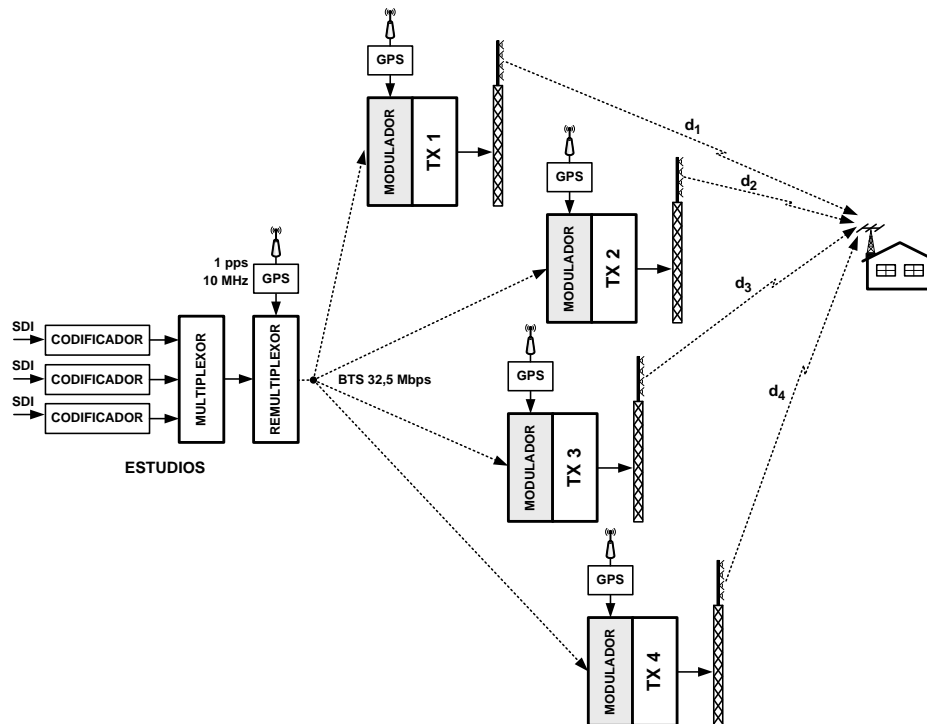


Figura 6. Diagrama de SFN. Fuente propia

La funcionalidad de la Calculadora permite configurar distintos módulos, accediendo desde el menú lateral o directamente desde el diagrama en bloques. Éstas son las descripciones de cada sección:

1. **Codificador A/V:** se configuraran hasta tres Codificadores independientes. Aquí se ingresan los parámetros de compresión de video y audio, selección de entradas, bitrate de audio y video, resolución de video, perfil de codificación y otros parámetros específicos. Se configuraran los PID de Video/Audio y PCR.
2. **Multiplexor:** hasta tres entradas ASI, por cada una se configuran los PID de las señales, el re-mapeo y la Capa donde se emitirá.
3. **Re-Multiplexor:** permite configurar el Modo, Intervalo de Guarda, activar y desactivar el one-seg, y por cada Capa: número de Segmentos, esquema de Modulación, Codificación Convolutiva y Entrelazado de tiempo. Se visualizan en cinco subsecciones los parámetros más importantes que resultan de aplicar los cálculos establecidos por la Norma ISDB-Tb. Los valores que se ingresan en ésta etapa se transmiten a los Moduladores para su auto configuración.
4. **Modulador:** permite configurar hasta cuatro Moduladores que corresponden a las cuatro Plantas Transmisoras. Aquí se ingresan la denominación de los transmisores y su correspondiente identificación (ID). Es posible ingresar el retardo del BTS en relación a 1pps en Estudios y el retardo del enlace del BTS de cada Transmisor.
5. **Red de Frecuencia Única:** esta sección permite configurar la SFN, verificar la situación de sincronización de la red y efectuar las correcciones. Dispone de las siguientes subsecciones:
 - a. Posicionar los Transmisores en la cartografía y la posición de hasta un rebote que produce un eco en el punto de recepción.

- b. Simular hasta dos receptores ubicados en la cartografía.
- c. Asignar un valor al Retardo de Red y el offset de cada Transmisor.
- d. Mostrar la Ventana de Sincronización para cada una de la posiciones de los receptores.

Se muestra la cartografía embebida en la página web. Dispone de cuatro sub-secciones, en la primera, Selector, se pueden habilitar en forma independiente hasta cuatro transmisores, Figura 6, asignándoles una posición geográfica mediante el ingreso de las coordenadas de latitud y longitud o arrastrando las anclas de cada transmisor en la cartografía, también se pueden habilitar hasta dos puntos de recepción y un obstáculo.

La segunda solapa, Retardos, permite ingresar el Retardo de Red y el offset, con su correspondiente signo, de cada transmisor.

Las dos sub-secciones siguientes corresponden a las Ventanas de Sincronización de cada receptor (Rx1 y Rx2), donde se muestran de manera gráfica y en relación al Intervalo de Guarda las diferencias de tiempo entre el Transmisor primero en llegar y cada uno de los otros Transmisores, tanto en km como en μ s. Esto permite analizar si los transmisores y los ecos llegan dentro o fuera del Intervalo de Guarda y verificar las correcciones al introducir la compensación de offset de retardo. Además se indican los valores correspondientes en formato de tablas.

3.2. Ejercicio demostrativo

Se mostrará la utilidad y el funcionamiento de la Calculadora con un ejercicio típico utilizado en la actividad académica. El enunciado es el propuesto en el libro [4] página 528, donde se plantea estimar el área de cobertura y las zonas de auto-interferencias y las compensaciones de retardo para sincronizar la red, con ocho Transmisores distribuidos entre la Ciudad de Mendoza y la localidad de La Paz, siguiendo la ruta nacional RN7.

Objetivos del ejercicio:

- Ubicar los transmisores en la cartografía y los receptores de prueba
- Configurar el System Variant
- Configurar los Codificadores A/V
- Visualizar las auto interferencias en la Ventana de Sincronización
- Definir el Retardo de Red y la estrategia de correcciones de auto-interferencia mediante el Retardo de Offset

En el desarrollo del libro se utiliza una solución con software profesional [1], que incluye el análisis de área de cobertura de radiofrecuencia, el cual permite estimar la misma según varios algoritmos de cálculo de propagación y muestra las zonas de auto-interferencias que luego se corregirán con el offset de retardo de los transmisores.

Los siguientes son los pasos para cumplir con los objetivos planteados para el ejercicio:

3.2.1. Ubicación geográfica de los transmisores.

Se plantean inicialmente cuatro transmisores utilizando todas las posibilidades que tiene las Calculadora, Figura 6. Las coordenadas geográficas de cada uno se muestran en la Tabla 1. Se ingresan en la sección Red de Frecuencia Única, sub-sección Selector.

En la Figura 7 se muestra la ubicación de los transmisores geo localizados. La Calculadora superpone etiquetas con los valores de posición, retardo de red y offset de cada transmisor.

Tabla 1. Ubicación de los transmisores

Transmisor	Localidad	Longitud	Latitud
1	Cerro Arco	-68.9347222	-32.8352778
2	Mendoza Centro	-68.8394444	-32.8913889
3	La Paz	-67.5549999	-33.4627778
4	Las Catitas	-68.0549999	-33.2844444

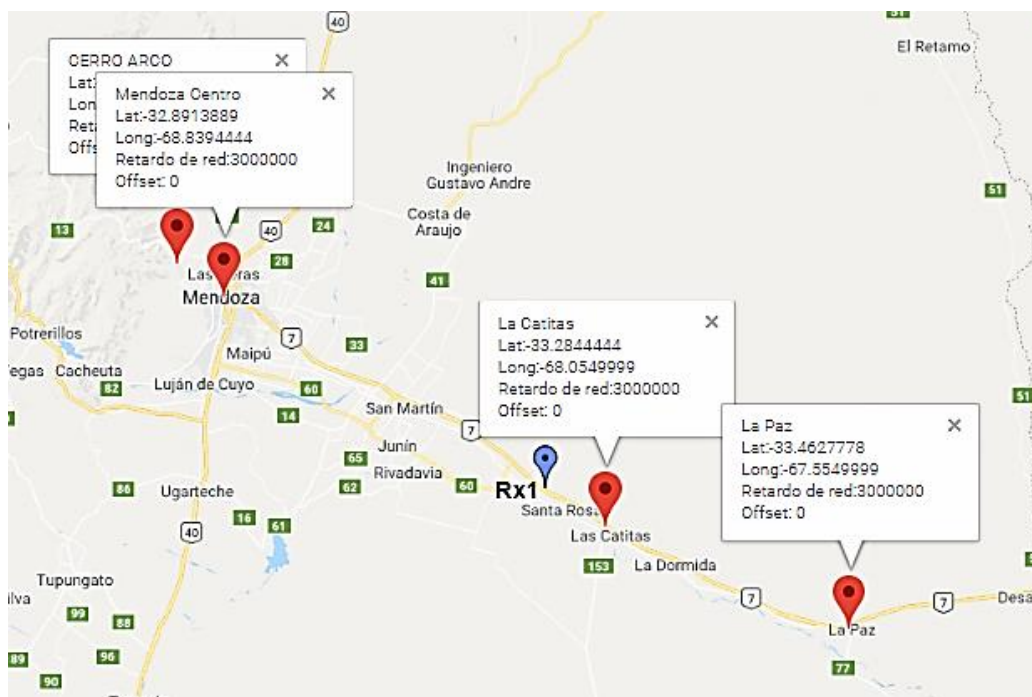


Figura 7. Ubicación de los Transmisores y receptor de prueba. Fuente: [5]

3.2.2. Configuración del sistema de transmisión (System Variant) y Codificador.

El conjunto de parámetros de configuración de los Moduladores en relación al sistema de transmisión, denominado System Variant, se ingresan en la sección Re-Multiplexor. A su salida se obtiene el BTS que será distribuido a cada Plata Transmisora. Esta forma de configurar los Moduladores se conoce como “configuración remota” a diferencia de la “configuración local” que se realiza ingresando los parámetros directamente en el equipo Modulador en la Planta Transmisora. Los valores correspondientes al ejercicio se indican en la Tabla 2.

La Figura 8 muestra la captura de pantalla de la Calculadora con el System Variant, sección Re-multiplexor.

De acuerdo a la configuración ingresada, la Calculadora resuelve las ecuaciones que hacen a la Norma ISDB-Tb.

El Payload, que es la capacidad de transporte útil del sistema, es de 10,818 Mbps, con éste valor es posible transmitir un servicio de video y audio en alta definición.

Tabla 2. Valores del System Variant

Modo de Operación	Modo 3
Intervalo de Guarda	1/8 (126 uS)
Esquema de Modulación	16-QAM
Codificación Convolutacional	2/3
Capa A	13 Segmentos
One-Seg	Desactivado
Entrelazado de Tiempo	0
Servicios	Uno en HD

Parámetros Variables

Modo: **MODO 3** Intervalo de Guarda: **1/8**

One-Seg: **Desactivado**

	Capa A	Capa B	Capa C
Nº de Segmentos [N _s]:	13	0	0
Esquema de Modulación:	16-QAM	QPSK	QPSK
Codificación Convolutacional [K]:	2/3	1/2	1/2
Entrelazado de tiempo [I]	0	0	0

Figura 8. Configuración del System Variant. Fuente [5]

En cuanto a la configuración de los Codificadores, al transmitirse un servicio, se requerirá un único Codificador. La Figura 9 muestra la sección Codificador A/V, sub-sección Encoder 1 con las variables definidas.

Calculadora ISDB-Tb

Encoder 1 Encoder 2 Encoder 3

Encoder Setup 1

Video Source	SDI
Audio Source	Analog Jacks
Audio Codec	AAC-LC-ADTS
Audio Bit Rate	64 Kbps
Video Resolution	720p (1280x720)
Rate Control	CBR
Video Bit Rate [Mbps]	10
Video Profile	High
Gop Size	15 Frames
Video burst size	150ms
Video Codec	H.264
Frame Decimation	None

Output Setup 1

Output Interface	ASI
Output Format	MPEG-2 TS
Dest IP Address	0.0.0.0
Dest Port	0
TS Bitrate [Mbps]	10.8
ASI PCR Interval [ms]	40
PID Audio	300
PID Video	400
PID PCR	500

Figura 9. Configuración del Codificador. Fuente [5]

Se puede observar la selección de los distintos parámetros que configuran al Codificador. Se han definido valores de PID (*Packet Identifier*) para los servicios. El Multiplexor se programa en la sección correspondiente donde se ingresan los PID para cada entrada de servicios, se hace un re-mapeo si corresponde y se asignan a las Capas (A, B o C) donde se emitirán cada servicio. También se configuran las Tablas del sistema.

3.2.3. Primera estimación de las zonas de auto-interferencia.

Para una estimación de las auto-interferencias entre transmisores y hacer evidente el problema, se ha seleccionado la posición del Receptor de prueba Rx1 en las coordenadas -33.2162661/-68.1791095. La posición del Receptor de prueba se muestra en la Figura 7 (Rx1).

Los cuatro transmisores que forman la SFN emiten al mismo tiempo por la acción de la compensación dinámica estudiada en 1.2.iii. y 2., la misma compensa los retardos de los enlaces BTS y del propio Modulador de cada transmisor para alcanzar la meta del Retardo de Red. El paso siguiente es compensar los retardos de propagación de la señal radioeléctrica que emite cada transmisor hasta llegar a la posición del receptor la que depende de la distancia transmisor-receptor. En la Figura 7 se observa que el receptor se sincroniza con la primera señal en llegar que corresponde al transmisor más cercano (Las Catitas), las otras señales llegan retrasadas porque se propagan desde una distancia mayor. Los transmisores de Mendoza Capital, La Paz y Cerro Arco llegan con una diferencia de tiempo en relación a la señal de Las Catitas mayor que el Intervalo de Guarda de 126 μ S. Por lo tanto estos tres transmisores producirán interferencias en el Rx1. Esto mismo se observa en la Figura 10 donde la Ventana de Sincronización permite analizar la llegada de las emisiones en relación al IG.

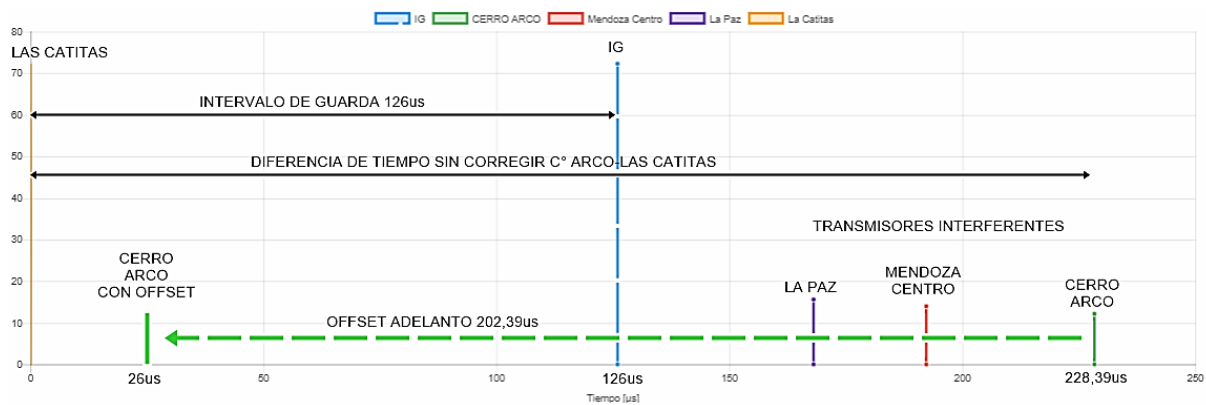


Figura 10. Ventana de Sincronización en la posición de Rx1. Fuente [5]

La Calculadora permite cambiar la posición de Rx1 o incluir otro receptor Rx2 para analizar las auto-interferencias en distintas posiciones.

Para solucionar las auto-interferencias se actúa atrasando o adelantando la emisión de determinados transmisores, procedimiento denominado ajuste del Offset de Retardo. Una vez que se determinan los transmisores que deben ajustarse, el valor de offset se ingresa al Modulador correspondiente. En la Calculadora esto se realiza en la sección Red de Frecuencia Única, sub-sección Retardos.

Se plantean dos alternativas para solucionar la auto-interferencia, una primera opción es “adelantar” las emisiones de los transmisores interferentes, otra es “retrasar” el transmisor de La Catitas.

3.2.4. Ajuste de retardos.

A los fines de simplificar la exposición, solamente se considerarán los transmisores ubicados en Cerro Arco y Las Catitas, Figura 7. Planteando una solución para estos dos transmisores se puede aplicar el mismo criterio para las otras interferencias.

En la Tabla 4 se muestran las distancias desde cada transmisor hasta el punto de recepción, medidas en kilómetros y en tiempo de propagación a la velocidad de la luz. Considerando que

los dos transmisores emiten el mismo símbolo OFDM al mismo tiempo, desde Las Catitas demora en llegar al receptor 46,11 μ s (13,82 km) y desde Cerro Arco 274,5 μ s (82,29 km). Cerro Arco llega atrasado en 228.39 μ s, el Intervalo de Guarda es de 126 μ s por lo que Cerro Arco interferirá la recepción, Figura 10.

Tabla 4. Distancias y diferencias de tiempos

Distancia entre cada Transmisor y el Rx1	C° Arco	Las Catitas
Camino Directo	82,29 km 274,5 μ s	13,82 km 46,11 μ s
Diferencia de tiempo entre cada Transmisor y el primero en llegar		
Camino Directo [μ s]	228,39*	0,00

*En color rojo indica interferencia

Para solucionar la auto-interferencia en el punto de recepción una alternativa es introducir adelanto en el transmisor Cerro Arco de tal manera que la transmisión de un determinado símbolo OFDM comience a emitirse antes y luego en Las Catitas, con el objetivo de que al llegar las señales al receptor la diferencia de tiempo sea menor al Intervalo de Guarda, según se muestra en la Figura 10.

Un procedimiento que conduciría al mismo resultado sería trasladar físicamente el transmisor de Cerro Arco a un emplazamiento más cercano a Las Catitas, sin embargo, esto se descarta porque la posición de los transmisores se selecciona más que nada por la necesidad de área de cobertura de la señal. De igual manera, adelantar en tiempo es equivalente a mover físicamente el transmisor.

Las diferencias de tiempo de Tx1 (Cerro Arco) se determinan en (1), la diferencia de tiempo de Tx2 en (2). Lo que implica que el símbolo OFDM tomado como referencia llega al receptor fuera del intervalo de Guarda produciendo interferencias.

$$\Delta T_{x1} (\text{Cerro Arco}) = \frac{82290 \text{ m} - 13820 \text{ m}}{299792458 \text{ m/s}} = 228.39 \mu\text{s} \quad (1)$$

$$\Delta T_{x4} (\text{Las Catitas}) = \frac{13820 \text{ m} - 13820 \text{ m}}{299792458 \text{ m/s}} = 0 \quad (2)$$

Para hacer las correcciones se ajusta el retardo en adelanto de la señal de Cerro Arco, como ejemplo para ubicarlo a una diferencia de 26 μ s entre ambos transmisores. Esto se consigue adelantando Cerro Arco en aproximadamente 200 μ s, que se determinan fácilmente de la Ventana de Sincronización, Figura 10, observando la escala de tiempo. Con éste valor e incluso con al menos 103 μ s se solucionaría el problema.

Para determinar el valor exacto se procede:

$$[d_{Tx1} (\text{Cerro Arco}) - X] - d_{Tx4} (\text{Las Catitas}) = 26\mu\text{s} \quad (3)$$

De donde y reemplazando los retardos:

$$X = 274,5\mu\text{s} - 46,11\mu\text{s} - 26\mu\text{s} = 202,39\mu\text{s} \text{ en Adelanto} \quad (4)$$

Que corresponden a: 202390ns = 2023,9 módulos de 100ns

Redondeando, el retardo en adelanto a aplicar a Tx1 en la sección Red de Frecuencia Única, sub-sección Retardos, Figura 10 es:

2024 módulos de 100ns

El resultado en la Ventana de Sincronización es el de la Figura 10 donde se puede ver el transmisor de Cerro Arco en la nueva posición virtual en línea de puntos. La red se ha sincronizado desapareciendo la auto-interferencia. La Figura 11 muestra la captura de pantalla de la sub-sección Retardos con el offset introducido en adelanto.

Retardos	
Retardo de Red: Dt_{max} (x100ns)	3000000

Retardo adicional					
#	Equipment ID	Time-Offset: Dt_{off} (x100ns)	Offset	Modo	Enable
CERRO ARCO	00001	-2024	Adelanto (-) ▼	Dinámico ▼	<input checked="" type="checkbox"/>
Mendoza Centro	00002	0	Atraso (+) ▼	Dinámico ▼	<input type="checkbox"/>
La Paz	00003	0	Atraso (+) ▼	Dinámico ▼	<input type="checkbox"/>
La Catitas	00004	0	Atraso (+) ▼	Dinámico ▼	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 11. Ingreso de los retardos. Fuente [5]

3.2.5. Verificación final de la cobertura obtenida.

Para la verificación final habrá que analizar la situación de auto-interferencias en diversas posiciones del Receptor de prueba dentro de toda el área de cobertura, incluso utilizando dos receptores para facilitar el análisis. En situaciones donde varios transmisores o sus ecos debido a obstrucciones llegan al receptor se requerirá un análisis pormenorizado y además establecer una estrategia combinada de ajustes de retardos de offset para que la red quede libre de interferencias.

4. Resultados y Discusión

Luego de utilizar la Calculadora en cursos de grado se ha podido comprobar que cumple con los objetivos planteados en el apartado 3. Con su uso se simplifica la interpretación de las SFN simulando situaciones reales al utilizar la cartografía. Se obtuvieron resultados de cálculo según lo esperado y aportó conocimientos y experiencias adicionales al grupo de trabajo, reflejadas en [5], porque fue necesario incursionar en la programación de software para web y la forma de embeber la cartografía.

5. Conclusiones y recomendaciones

La Calculadora ISDB-Tb es una herramienta educativa de uso libre y en línea [6] que permite desarrollar ejercicios prácticos de SFN y simular el trabajo como si fuera en una situación real.

Resulta de gran valor la posibilidad de ubicar los transmisores en la cartografía y analizar la sincronización de la red en distintos puntos del área de cobertura mediante la Ventana de Sincronización. Además de visualizar fácilmente los cambios que se producen al introducir nuevos valores en las variables. Ha sido muy valorada por los Estudiantes tanto de grado como de posgrado en Ingeniería Electrónica y en Telecomunicaciones.

La Calculadora ISDB-Tb tiene muchas posibilidades de desarrollo a futuro, se han planteado principalmente éstos cuatro:

- a) Visualizar las áreas de auto-interferencias en la cartografía, esto permitiría a simple vista detectar los puntos donde los receptores se verán interferidos y comprobar las soluciones luego de las compensaciones de retardos.
- b) Incluir la sensibilidad de receptor y las distintas formas en que recupera la ventana FFT
- c) Incorporar el Retardo Estático por cada transmisor y la compensación de los retardos frente a los eventuales cambios en los enlaces de BTS o pérdidas de la señal GPS.
- d) Mostrar las áreas de cobertura en radiofrecuencia de cada transmisor y de la red en su totalidad, considerando la ganancia de red que se consigue en el solapamiento de las áreas de cobertura.

6. Agradecimiento

El desarrollo teórico que permitió diseñar la Calculadora está tratado en detalle en [4], lo referente a SFN se estudia en los Capítulos 12 y 13 que estuvieron a cargo del Ing. Roberto Lauro, co-autor del libro, a quien le agradecemos su invaluable aporte.

7. Referencias

- [1] TELECOMUNICAZIONI ALDEN A. Software EMLAB.
<http://www.aldena.it/index.php/multicoverage-uk.html>
- [2] APTICA. XIRIO Online Planning Tools. <https://www.xirio-online.com>
- [3] ANRITSU. Spectrum Master™, High Performance Handheld Spectrum Analyzer Model MS2721B
- [4] PISCIOTTA, N. LIENDO, C. LAURO, R. *Transmisión de Televisión Digital Terrestre en la Norma ISDB-Tb. Tratado fundamental para estudiantes avanzados, técnicos y profesionales*. Editado por Cengage Learning, Buenos Aires, Argentina. Edición 2013. 552 páginas. ISBN 978-987-1954-08-7.
- [5] FRIED, M. *Desarrollo de una herramienta educativa para la enseñanza de la selección de parámetros de la Planta Transmisora de Televisión Digital en la Norma ISDB-Tb*. Proyecto Integrador para la obtención del Título de Grado Ingeniero Electrónico. FCEFyN de la Universidad Nacional de Córdoba. Director Esp. Ing. Carlos Liendo, Co-Director Esp. Ing. Néstor Pisciotta. (2018).
- [6] Acceso a la Calculadora ISDB-Tb versión 2.0: www.eradigital.com.ar. Acceso alternativo: <https://test-calculadora.firebaseio.com>