



Propuesta de diseño de una Red de Frecuencia Única basada en el ajuste de los retardos de transmisión

Dalila Garrido Mirabal, Alejandro Sánchez Domínguez, Leandro Boucourt Ferrer, Reinier Díaz Hernández

RESUMEN / ABSTRACT

La actual condición de simultaneidad de los servicios de Televisión Analógica y Digital, así como la evolución y crecimiento del número de servicios móviles, definen la necesidad en nuestro país de estudiar nuevas vías para hacer un uso más eficiente del espectro radioeléctrico. En este sentido, en el presente trabajo, se propone el análisis de una red de frecuencia única (SFN) como alternativa a la red de múltiples frecuencias (MFN) actualmente desplegada en La Habana para la radiodifusión de TVD. El grupo de simulaciones propuesto constituye una primera aproximación a las bondades y limitaciones de este tipo de red de radiodifusión en una etapa inicial de su posible despliegue. La estrategia de diseño empleada se basa en la selección de los retardos para cada transmisor de la red, buscando limitar los casos de auto-interferencia destructiva. Se comprueba la validez de esta estrategia y la aplicabilidad de SFN en las condiciones de evaluación, pues se mantiene la cobertura actual con un margen de protección de 9 μ s para el intervalo de guarda teórico de 74 μ s y de 4 dB respecto a los 15 dB de señal/interferencia (S/I) necesarios para la demodulación en DTMB en modo 6. Como uno de los principales aportes se introduce el software de creación propia *Simulador de Interferencias para SFN* que permite el análisis de interferencias en redes de múltiples transmisores, basado en el procesamiento de los datos que aporta Radio Mobile sobre la interferencia co-canal entre solo dos de los transmisores.

Palabras claves: Redes de Frecuencia Única; Señal/Interferencia; Televisión Digital; Radio Mobile.

The condition of coincidence between analog and digital television services, as well as the global evolution of mobile services, define our country's need to make a more efficient use of the spectrum. In this sense, it is proposed the analysis of Single Frequency Network (SFN) as an alternative to the currently deployed in Havana Multifrequency Network (MFN). The proposed group of simulations is a first approaching to the advantages and limitations of this kind of broadcasting network at an early stage of its possible deployment. The used design strategy is based on the selection of delays for each transmitter in the network as a way to limit the cases of destructive self-interference. One of the objectives is to validate this strategy and the applicability of SFN under the evaluation conditions. The current coverage is maintained with a protection margin of 9 μ s for the theoretical guard interval of 74 μ s and 4 dB for the 15 dB of signal/interference (S/I) required for DTMB mode 6 demodulation. One of the main contributions of this research is the software of own creation Interference Simulator for SFN. It allows the analysis of interference in networks of multiple transmitters and it is based on the processing of the data provided by Radio Mobile about the co-channel interference between only two of the transmitters.

Key words: Signal Frequency Network; Signal/Interference; Digital Television; Radio Mobile.

“Design proposal for a Single Frequency Network employing Radio Mobile software”

Recibido: 15/10/2019

Aceptado: 23/3/2020

1. - INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el desarrollo de los sistemas de telecomunicaciones ha debido ir inevitablemente aparejado a la búsqueda de estrategias y tecnologías que permitan la coexistencia de los viejos y nuevos servicios en un espectro radioeléctrico limitado. En nuestro país, aún cuando el servicio de Televisión Digital no alcanza todavía los niveles de cobertura del servicio de Televisión Analógica, ya no se dispone de canales libres para continuar su despliegue. La alternativa de un apagón parcial, entendido como el apagón de uno de los canales de televisión analógica "el Educativo", constituye solo una etapa en la transición entre estas tecnologías y no una acción encaminada al empleo eficiente del espectro. Por otra parte, la existencia de canales de televisión analógica operando en la banda de 700MHz representa una barrera al posible despliegue de la tecnología LTE 4G en esta banda. El empleo consciente de este recurso limitado permitiría no solo tener hoy un espectro radioeléctrico menos susceptible a las interferencias sino, además, mejor preparado para el futuro de las comunicaciones.

El sistema de radiodifusión de televisión constituye en Cuba uno de los principales consumidores de este espectro radioeléctrico, empleando alrededor de 330 MHz distribuidos en más de 55 canales de Televisión Digital de 6 MHz de ancho de banda. El empleo actual de la configuración MFN, donde cada transmisor de la red utiliza un canal de frecuencia diferente, provoca que tan solo en La Habana se ocupen cinco canales para definición estándar y dos para transmisiones de alta definición (sin tener en cuenta los canales que pudieran verse afectados por interferencia de canal adyacente).

El despliegue de Redes de Frecuencia Única para la transmisión de televisión digital aparece como una de las alternativas disponibles para lograr un empleo eficiente del espectro radioeléctrico. En esta configuración, varios transmisores desde los que se difunde la misma información y cuyas áreas de cobertura se solapan, pueden operar en el mismo canal de frecuencia. El empleo de esta tecnología ha sido ampliamente estudiado y documentado en la literatura para las normas DVB-T y DVB-T2, mientras que numerosos países como Italia, Japón, Malasia y China se suman a la lista de los que han escogido esta configuración para el despliegue de su sistema de radiodifusión [1-7]. Más allá de la propuesta de ahorro de frecuencias, según [8], el empleo de SFN implica una mayor eficiencia espectral, ahorro en potencia de transmisión y la probabilidad de cubrir zonas de silencio presentes en MFN.

Sin embargo, el diseño y despliegue de una red SFN impone algunas limitaciones más allá del necesario equipamiento adicional. En SFN, además de las interferencias producidas por parte de otros servicios, hay que considerar los posibles efectos de auto-interferencia. Adicionalmente a los multitrayectos resultantes de los mecanismos físicos de la propagación tales como la reflexión, refracción, difracción, y dispersión, aparecen como trayectos adicionales las señales provenientes de los propios transmisores de la red [9].

La presencia de una cabecera en la estructura de la señal de la norma DTMB permite a los receptores de este estándar el tratamiento de los retardos y, en condiciones definidas, estimar y corregir sus efectos sobre la señal transmitida. La duración de esta cabecera de trama va desde 74us (formato de cabecera PN420) hasta 167us (formato de cabecera PN945) [10]. En teoría, los retardos en la señal recibida con duración inferior a la duración de la cabecera de trama no provocan interferencia destructiva significativa. Teniendo en cuenta esto, se consigue el sincronismo de una red SFN cuando los ecos con un nivel de señal representativo llegan a cualquier punto dentro de la zona de cobertura deseada con retardos inferiores a la duración de la cabecera de trama. Según [11], el diseño de la red para DTMB modo 6, debe estar orientado a asegurar que los ecos cuyo nivel de señal no cumpla con los 15dB de relación señal interferencia (S/I), lleguen al receptor con valores de retardo inferiores a la duración de la cabecera de trama [12].

Los modelos de planeación de redes SFN se basan fundamentalmente en tres parámetros de ajuste: la ubicación de los transmisores, la potencia de transmisión y los retardos de transmisión. Algunos métodos parten de cero con un modelo teórico hexagonal donde todos los transmisores están a la misma distancia y transmitiendo con la misma potencia [6, 13-15]. En una primera etapa se realizan ajustes finos de la red hasta cumplir con las condiciones geográficas de la zona de servicio. Los valores de retardos y potencia se configuran en dependencia de las condiciones específicas de cada red.

En [16], el diseño parte de una red existente MFN como es el caso de esta investigación, es decir, se utilizan los mismos emplazamientos de los transmisores de la red antigua para la creación de una nueva red. Esto permite que el usuario no tenga que reorientar su antena hacia un nuevo emplazamiento a pesar del cambio de tecnología. Tomando como referencia el transmisor principal (el de mayor potencia) y el más distante con respecto a este, se calcula el tamaño del intervalo de guarda con mejores posibilidades de evitar la auto-interferencia de la SFN y luego se escoge el formato de cabecera de trama que más se ajuste a este valor. Una vez seleccionado el intervalo de guarda se realizan los ajustes de retardo y potencia de los transmisores para que en todos los puntos del área de servicio las señales lleguen con una diferencia de tiempo menor que la duración del intervalo de guarda. En los casos donde no es posible cumplir con estas limitaciones temporales, se asegura que se mantenga una relación entre la señal principal y el eco interferente, mayor que el mínimo necesario para la demodulación [8, 11]. Teniendo en cuenta las condiciones actuales de nuestro país, esta estrategia de diseño se considera la más acertada.

Para la presente investigación se parte sobre la base de mantener los emplazamientos de la actual red de radiodifusión de televisión, lo que favorecería el empleo de la mayor parte del equipamiento ya existente en estos puntos. Dado que este es un servicio activo y es fundamental, al menos, mantener la cobertura en todas las zonas de servicio actual, se propone además en

una primera etapa del proyecto, conservar los niveles de potencia de transmisión que se utilizan en la MFN existente. Cumpliendo con esto, la investigación está orientada al ajuste de los retardos en cada uno de los transmisores de la red de forma tal que se obtenga una cobertura similar, a la vez que se liberan tantas frecuencias de transmisión como sea posible. Las restantes secciones del trabajo se organizan de la siguiente forma: en la Sección II se presenta la herramienta de simulación empleada: Radio Mobile, así como el software de creación propia *Simulador de Interferencias para SFN* que sirve como complemento al primero y permite el análisis de interferencias en redes de más de dos transmisores. En la Sección III se muestran resultados de las simulaciones para diferentes márgenes de protección respecto a la duración del intervalo de guarda y a la S/I mínima necesaria para la demodulación. Por último, en la Sección IV se presentan las conclusiones del trabajo.

2. - HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

Una parte importante para el proceso de planeación de cualquier tipo de red es la etapa de simulación. La selección del software adecuado para acometer este proceso es de vital importancia pues define el grado de exactitud de los resultados de simulación con respecto a los que se obtienen luego de la implementación física de la red. Radio Mobile es una de las herramientas disponibles para el cálculo de radio enlaces que, tiene entre sus puntos a favor que es un software libre.

Radio Mobile trabaja en el rango de frecuencias de 20MHz - 20GHz y utiliza el modelo de propagación Longley-Rice. Los datos de elevación que utiliza el programa para crear los mapas del área de estudio se descargan gratuitamente de Internet y pueden obtenerse de diversas fuentes. Una de las fuentes de datos de elevación es el Shuttle Terrain Radar Mapping Mision (STRM), proyecto de la NASA que ofrece datos de altitud con una precisión de 100m. El software ofrece la posibilidad de agregar a los relieves de contorno los mapas de carreteras, imágenes satelitales e imágenes con mapas topográficos simultáneamente.

La selección de Radio Mobile para el análisis propuesto se basa fundamentalmente en sus funcionalidades para el cálculo de radioenlaces (Radio Link), el cálculo de coberturas (Radio Coverage) de una o varias estaciones transmisoras, y el análisis de interferencias. Sin embargo, en el empleo de esta última funcionalidad aparece la principal limitante del uso de Radio Mobile, pues es solo aplicable a redes de dos transmisores. Si bien el análisis pudiera realizarse de a pares de transmisores, esto se hace notablemente más complejo cuando el número de transmisores aumenta.

2.1. - SIMULADOR DE INTERFERENCIAS PARA SFN

El software de creación propia *Simulador de Interferencias para SFN* constituye uno de los principales aportes de la investigación como complemento al software Radio Mobile, teniendo en cuenta que no es solo aplicable al análisis de interferencia en SFN sino a cualquier red de radiodifusión con dos o más transmisores en un mismo canal de frecuencia. Sobre la plataforma del asistente matemático MATLAB, este software es empleado para procesar los resultados de cobertura de cada transmisor en el fichero *Cartasianraster.txt* de Radio Mobile y obtener la simulación de interferencias.

En el fichero *Cartasianraster.txt* se recogen los niveles de intensidad en cada coordenada geográfica, los datos de posición y de altura del terreno de las unidades involucradas en la simulación, el umbral de recepción definido y el rango de intensidad que será representado en el mapa. Para garantizar la compatibilidad entre la herramienta *Simulador de Interferencias para SFN* y los ficheros *Cartasianraster.txt*, se debe mantener un orden lógico en la creación de las unidades en Radio Mobile. Primero se crean todas las unidades transmisoras y por último las receptoras (los nombres no pueden contener espacios). Esto permite que la herramienta extraiga correctamente los datos del fichero. Por otra parte, se necesita que todos los ficheros generen la misma cantidad de coordenadas y en el mismo orden. Esta diferencia en la cantidad de puntos disminuye a medida que se reduce la precisión geográfica. Con la herramienta desarrollada se consigue eliminar este error, realizando la simulación para una precisión de 5 píxeles y con el campo rango máximo (*maximum range*) con un valor de 300 Km. Para la corrección es necesario, además, generar el mapa con las siguientes dimensiones: 1000 píxeles de alto, 1000 píxeles de ancho, 100 km de alto y 100 Km de ancho. Los ficheros generados se deben guardar con la siguiente estructura de nombre: "tx (número del transmisor)", manteniendo la correspondencia entre el nombre del transmisor con el número otorgado.

Los parámetros de configuración de la herramienta son: el umbral de recepción en dBm, la mínima S/I en dB, el intervalo de guarda en μ s y las demoras de transmisión. El umbral de recepción define el valor mínimo de señal libre de ruidos necesario para considerar un punto cubierto. La selección de un umbral superior al umbral estandarizado, permite considerar a las simulaciones como un caso crítico y esperar mejores resultados en posibles pruebas de campo. El valor mínimo de S/I determina el nivel de ruido aceptable respecto al nivel de señal. El parámetro intervalo de guarda, coincide en teoría con la duración de la cabecera de trama que se emplea en la transmisión de la señal. Si bien esta cabecera de trama tiene valores de duración bien definidos, la selección de valores más pequeños permite corregir en la práctica un determinado margen de error en las simulaciones. Las demoras de transmisión constituyen el parámetro de ajuste propuesto en esta investigación. Mediante este, la herramienta nos permite realizar los ajustes en el tiempo de inicio de transmisión de cada una de las estaciones y, por tanto, eliminar las zonas de posible interferencia que surgen en puntos donde no se cumplen los intervalos temporales. Estos datos se introducen en una interfaz gráfica creada con la herramienta Grafical User Interface Designer Environment (GUIDE)

de MATLAB, que facilita su utilización mediante un ejecutable, eliminando la dependencia de utilización del script .m para su ejecución (Figura 1).

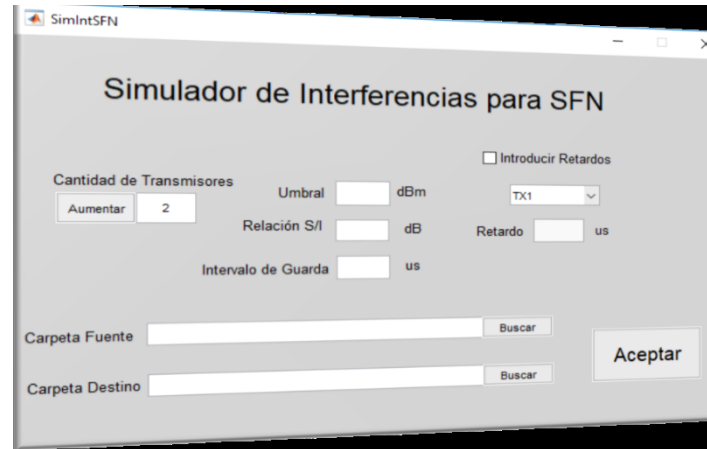


Figura 1
Interfaz gráfica programa desarrollado

Inicialmente se extraen de los ficheros las coordenadas geográficas de cada transmisor y del resto de los puntos del mapa con la intensidad correspondiente a cada transmisor en dicho punto. Esta información permite calcular la distancia de cada transmisor a cada par coordenado del mapa y por ende el tiempo de propagación de la señal.

La distancia se calcula mediante la fórmula de Haversine (5):

- Se convierten todas las coordenadas a radianes. Los parámetros Longitud A y Latitud A pertenecen al par coordenado del primer transmisor y Longitud B y Latitud B al del segundo transmisor que se esté analizando.

$$\text{LatA(rad)} = (\text{LatA} * \pi) / 180 \quad (1)$$

$$\text{LonA(rad)} = (\text{LonA} * \pi) / 180 \quad (2)$$

$$\text{LatB(rad)} = (\text{LatB} * \pi) / 180 \quad (3)$$

$$\text{LonB(rad)} = (\text{LonB} * \pi) / 180 \quad (4)$$

- Se sustituyen los valores en la fórmula (5) devolviendo la distancia en kilómetros (Km).

$$D = 6378.13 * \cos^{(-1)} (\cos (\text{LatA}) * \cos (\text{LatB}) * \cos (\text{LonB} - \text{LonA}) + \sin (\text{LatA}) * \sin (\text{LatB})) \quad (5)$$

Para el cálculo del tiempo de propagación de la señal se multiplica la distancia obtenida anteriormente por el inverso de la velocidad de propagación de la onda en el espacio libre que es igual a 3.3 $\mu\text{s/Km}$.

Teniendo toda la información necesaria se comienza a realizar el proceso para el cálculo de la interferencia, de forma similar a como lo hace Radio Mobile, asignándole un color al punto del mapa en dependencia si cumplen o no las condiciones de interferencia.

Los colores serán:

- **Amarillo:** la señal principal supera el valor umbral de relación S/I para la recepción y la diferencia entre todos los tiempos de propagación es menor que el intervalo de guarda. Se considera zona cubierta. La interferencia de ecos cuya duración es menor a la duración de la cabecera de trama es insignificante; incluso, en determinadas condiciones, puede resultar en un mejoramiento de la calidad de la señal.
- **Verde:** la señal principal supera el valor umbral de recepción y la diferencia entre todos los tiempos de propagación no es menor que el intervalo de guarda, pero la relación S/I es mayor o igual que el valor definido. Se considera zona cubierta. La diferencia de nivel entre la señal principal y los ecos es suficiente como para que estos no la afecten sea cual sea su valor de retardo.
- **Rojo:** Si no cumple con ninguna de las condiciones anteriores. Zona cubierta, pero con niveles elevados de interferencia.

- A los puntos donde las intensidades no alcanzan el valor umbral de relación S/I definido para la recepción no se les asigna ningún color.

El procedimiento a seguir para la asignación de cada color comienza con la lectura de los valores de intensidad y tiempos correspondiente al primer par coordenado. Se toma el máximo valor de intensidad y se compara con el umbral de recepción definido, en caso de que sea menor se deja sin color. En caso contrario se procede a analizar los tiempos de propagación. Se toma el mayor y el menor, si la diferencia entre ellos es menor que el intervalo de guarda se le asigna el color amarillo pues se entiende que todas las señales van a cumplir esta condición. De no ser así se tendrá que delimitar cuáles señales llegan dentro o fuera del intervalo de guarda. Para lograr esto se toma el menor tiempo de propagación y se le adiciona el intervalo de guarda para así tener un tiempo de referencia que luego se compara con los restantes tiempos de propagación. De esta manera se suman las intensidades de las señales con tiempo de propagación menor al intervalo de guarda, lo mismo que para las que llegan con un tiempo mayor. Ambos resultados se llevan a dB y se restan, dando como resultado la relación Señal/Interferencia en ese punto. Aclarar que este resultado es modular. Una vez obtenida la S/I se procede a compararla con la S/I umbral definida con anterioridad, en caso de ser mayor o igual se puede garantizar que no van a existir interferencias, a pesar de que algunas señales lleguen fuera del intervalo de guarda, asignándose el color verde. Para el caso en que el S/I sea menor al umbral entonces existirá interferencia y se le asigna el color rojo.

Este proceso se repite para cada par coordenado obteniéndose una distribución de colores recogidas en un vector columna que es necesario mostrar en el mapa. Esto se logra aprovechando a la opción de cargar archivos de la herramienta Cobertura Combinada de Radio Mobile. Es necesario generar entonces un fichero Cartasianraster.txt acorde a lo explicado con anterioridad, pasándole un valor de intensidad por cada coordenada en dependencia del color que se le haya asignado con la herramienta. Aclarar que los valores que se le pasan al .txt son la diferencia en dB entre el valor de intensidad asignado a cada color y el umbral de recepción definido.

Las figuras 2 y 3 muestran los mapas de interferencias entre los transmisores de Televilla y Guanabo, de acuerdo a la distribución de colores según Radio Mobile y la herramienta desarrollada, respectivamente. En ambos casos, las zonas con cobertura coinciden (colores verde y amarillo), lo que valida la aplicabilidad de la herramienta. Sin embargo, a diferencia de la asignación de colores en Radio Mobile, la segunda prioriza los puntos donde se cumplen los intervalos temporales (amarillo) asociados a la PN420 que es el caso de estudio. Este ajuste es favorable tanto a la investigación que se presenta como a todo un grupo de otras investigaciones orientadas al análisis de la ganancia SFN [5, 8].

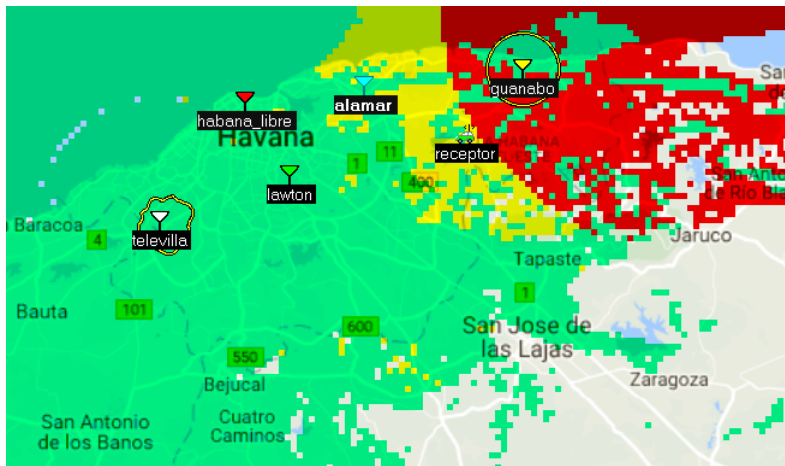


Figura 2

Simulación de Interferencia entre Televilla y Guanabo con Radio Mobile (PN420)



Figura 3

Simulación de Interferencia entre Televilla y Guanabo con la herramienta desarrollada (PN420)

2.2. – ESTRATEGIA DE DISEÑO BASADA EN LA SELECCIÓN DE LOS RETARDOS DE TRANSMISIÓN

La estrategia de diseño de la red SFN propuesta se basa en el aprovechamiento de las utilidades de la herramienta complementaria *Simulador de Interferencias para SFN*. La posibilidad de conocer los puntos donde se cumplen los requerimientos temporales de DTMB, permite realizar ajustes en los tiempos de transmisión de cada una de las estaciones de la red y con esto disminuir las posibles interferencias por retardos con duración superior a la cabecera de trama.

La figura 4 muestra nuevamente el mapa de interferencia entre los transmisores de Televilla y Guanabo, pero en este caso, el inicio de transmisión en Guanabo es retardado 40us.

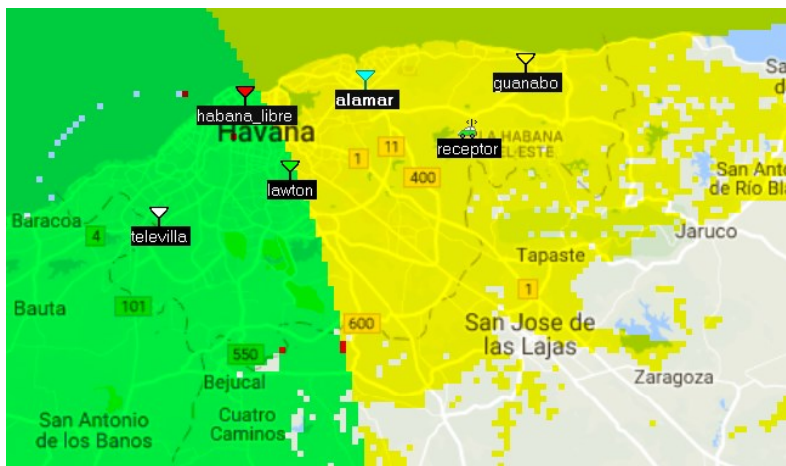


Figura 4

Simulación de Interferencia entre Televilla y Guanabo retardado 40 µs el programa desarrollado

Comparando este resultado con el presentado en la Figura 3 se comprueba cómo esta estrategia contribuye notablemente a la reducción de las zonas de interferencia significativa. Sin embargo, el diseño de toda la red representa mayor complejidad, pues es necesario tener en cuenta la influencia de cada uno de los transmisores sobre el resto. Nuevamente, el empleo complementario de la herramienta desarrollada representa una ventaja respecto al uso solo de Radio Mobile, pues permite realizar ajustes simultáneos en todos los transmisores y representar la interferencia resultante en un mapa de cobertura.

3. – ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez descritas las herramientas que se utilizaron en esta investigación se pasa a la etapa de diseño y simulación de la red. Se propone el diseño de una Red de Frecuencia Única, tomando como caso de estudio La Habana cuya red actual cuenta con 5 transmisores (Txs) de televisión digital trabajando en modo MFN.

De acuerdo a la estrategia de diseño seleccionada, se comienza por la definición del transmisor principal. En este sentido, se selecciona el que representa la principal fuente interferente de la red, es decir el de mayor potencia radiada. Televilla es el transmisor de mayor potencia radiada (5kW) en La Habana por lo que fue tomado como principal para las simulaciones de interferencias. Para la SFN se escoge entonces el canal 38, el cual ocupa desde los 614 MHz hasta los 620 MHz con frecuencia central en 617 MHz, correspondiente al transmisor de Televilla.

Se utilizan como intervalo de guarda los 74 μ s correspondientes al modo 6 de DTMB que se emplea actualmente para la transmisión de televisión digital en Cuba. El umbral de recepción que se emplea es de -74 dBm dejando un margen de protección de 10 dB con respecto al estandarizado para la recepción de la señal en definición estándar en la banda de Ultra Alta Frecuencia (UHF) [17].

Utilizando la herramienta Radio Mobile se realiza la simulación de cada uno de los transmisores para analizar el área actual de cobertura en modo MFN y tomarlo como referencia para garantizar igual cobertura al diseñar la SFN.

Posteriormente se simula la interferencia entre cada par de transmisores para buscar los retardos permisibles en cada caso, dependiendo de los parámetros de modulación y el correspondiente intervalo de guarda, garantizando el correcto funcionamiento de la red. Este mismo análisis se realiza (teniendo en cuenta la contribución de todos los transmisores de la red) mediante la herramienta desarrollada. Entonces se procede a realizar un análisis del mínimo intervalo de guarda que soportaría la red sin que se afecte la cobertura.

Para realizar la simulación de la cobertura actual se utiliza la herramienta de Radio Mobile, Cobertura de Radio Cartesiana Combinada ajustada con una precisión de 5 pixeles y un radio de 300 Km. Se cargó el mapa de La Habana con las siguientes dimensiones: 1000 pixeles de alto, 1000 pixeles de ancho, 100 km de alto y 100 Km de ancho y se le superpuso el mapa de Carreteras para tener mejor claridad y referencia del espacio en la simulación.

A partir de la cobertura de cada uno de los transmisores por separado, se simula la cobertura total MFN atendiendo a la contribución colectiva de todos los transmisores, sin tener en cuenta las interferencias que ocurren en las zonas de solapamiento de las señales de cada transmisor (Figura 5). Esta simulación de cobertura para la MFN actual se realiza con el objetivo de poder comparar con el diseño propuesto para SFN luego de realizar la investigación.

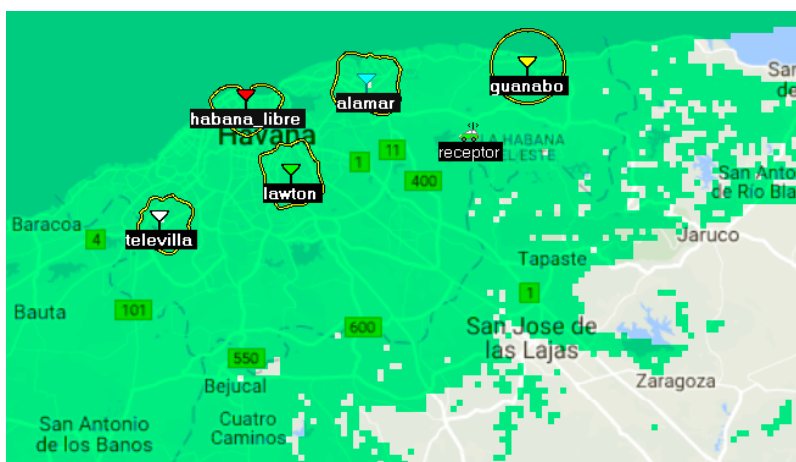


Figura 5
Cobertura total MFN

3.1. - SIMULACIÓN DE INTERFERENCIA COMBINADA

Para el análisis de la interferencia combinada en la SFN se emplean la herramienta de Cobertura de Radio Interferencia (Interference Radio Coverage) de Radio Mobile y la herramienta de desarrollo propio *Simulador de Interferencias para SFN*. Como se había definido anteriormente el umbral de recepción de la señal es de -74 dBm y se definen para la relación S/I y el intervalo de guarda, 19dB y 70us respectivamente. Se toma 19dB como valor umbral para asegurar un margen de error de hasta 4dB respecto al valor umbral definido para la correcta demodulación de la señal. Aun cuando la duración del intervalo de guarda es de 74us, en investigaciones como [8] se plantea que en algunos receptores comerciales la interferencia es

significativa para retardos de más de 70us. En cualquier caso, la selección de este valor permite tener un margen de 4us respecto al intervalo de guarda teórico.

A partir de la fórmula Haversine [18] se calcularon las distancias entre los centros transmisores (Tabla 1). De esta forma se define a Guanabo como el transmisor más alejado de Televilla. Analizando cada una de las combinaciones de pares transmisores de la red, se constata que en las áreas cercanas al transmisor de Guanabo aparecen zonas rojas correspondientes a áreas de interferencias. Esto se debe a que la distancia máxima que puede existir entre dos transmisores en configuración SFN es de 22km para PN420, 31km para PN595 y 50km para PN945 aproximadamente. Estas zonas aparecen por encontrarse dicho transmisor a una distancia mayor que el equivalente al intervalo de guarda con respecto a Televilla. Debido al nivel de potencia radiada por este, la señal transmitida alcanza esta zona con una intensidad comparable al de Guanabo, no cumpliéndose la relación S/I requerida.

En el análisis de interferencia entre el resto de los transmisores no se evidenciaron zonas interferentes ya que estos se encuentran a una distancia menor que la equivalente al intervalo de guarda. Luego de analizar el comportamiento de las señales y las posibles áreas de interferencia, se determina que solamente existen puntos interferentes entre los transmisores de Televilla y Guanabo.

Tabla 1
Distancia entre Transmisores (km).

Distancia entre Transmisores (km)	Televilla	Habana Libre	Lawton	Alamar	Guanabo
Televilla	0	12.25	11.53	20.43	32.88
Habana Libre	12.25	0	6.69	10.00	23.37
Lawton	11.53	6.69	0	9.65	21.38
Alamar	20.43	10.00	9.65	0	13.37
Guanabo	32.88	21.38	21.38	13.37	0

Para erradicar las áreas de interferencia fue necesario simular un retardo en la transmisión de Guanabo. De esta forma se logra que la señal llegue a las zonas de solapamiento con Televilla, con una demora menor que el intervalo de guarda. Luego de realizar una serie de simulaciones se pudo concluir que el retardo necesario para garantizar que no existan puntos interferentes entre ambos transmisores es de 40 μ s (Figura 6).

Como consecuencia de retardar la transmisión en Guanabo aparecen nuevos puntos donde no se recibe la señal, ya que no cumplen con la relación S/I y los retardos entre las señales no son menores que el intervalo de guarda. Algunos puntos de solapamiento entre Guanabo y otro de los transmisores, se ven afectados con este ajuste.

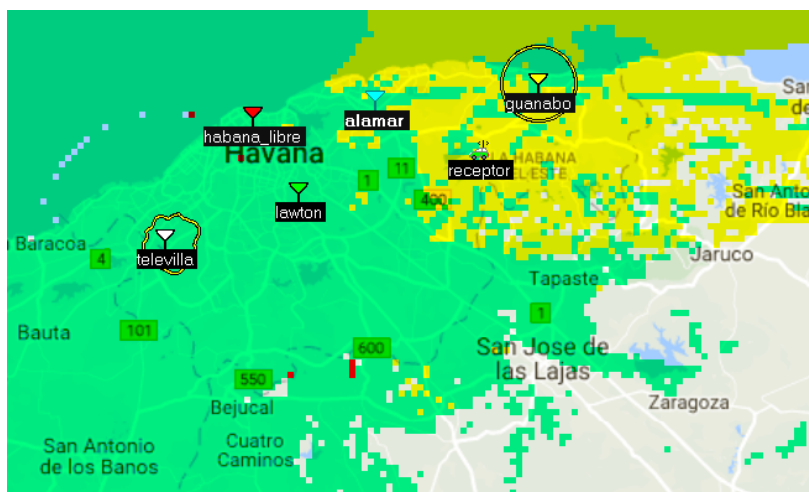


Figura 6
Interferencia entre Televilla y Guanabo retardado 40 μ s

Realizando ajustes en los retardos de transmisión se consigue eliminar estos nuevos puntos de interferencia. Sin embargo, la selección de un intervalo de guarda de 70 μ s no ofrece el suficiente margen a las simulaciones. Aunque es 4 μ s inferior al intervalo teórico, como se plantea anteriormente, es un valor similar al conseguido con receptores comerciales. Teniendo en cuenta esto, se propone el siguiente grupo de simulaciones, donde además de realizar el ajuste de retardo de los transmisores, se busca el valor mínimo de intervalo de guarda necesario para eliminar las interferencias significativas en la SFN.

3.2. - MÍNIMO INTERVALO DE GUARDA

Para encontrar el mínimo intervalo de guarda posible se realiza la simulación reduciendo a la mitad el intervalo de guarda. En caso de que se encontrara una combinación que permitiera eliminar las zonas de interferencia, se procedería a disminuirlo nuevamente.

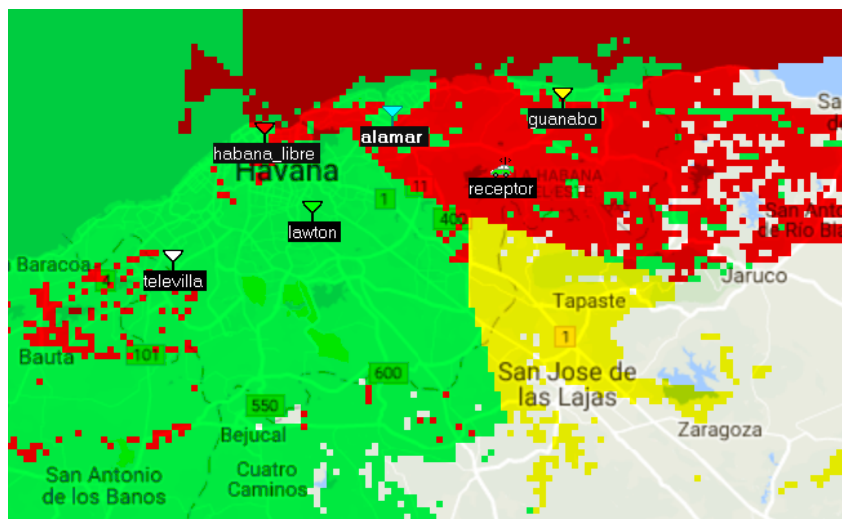


Figura 7

Interferencia atendiendo a la contribución de todos los transmisores con intervalo de guarda de 35 μ s

Se puede apreciar en la (Figura 7) que no se obtuvo combinación posible para eliminar las zonas de interferencia con la mitad del intervalo de guarda empleado. El primer resultado aceptable obtenido fue para un intervalo de guarda de 55 μ s como se muestra en la (Figura 8) y los retardos para cada transmisor según la simulación de interferencias colectiva queda de la siguiente manera: Televilla (0 μ s), Habana Libre (10 μ s), Lawton (25 μ s), Alamar (29 μ s), Guanabo (55 μ s).

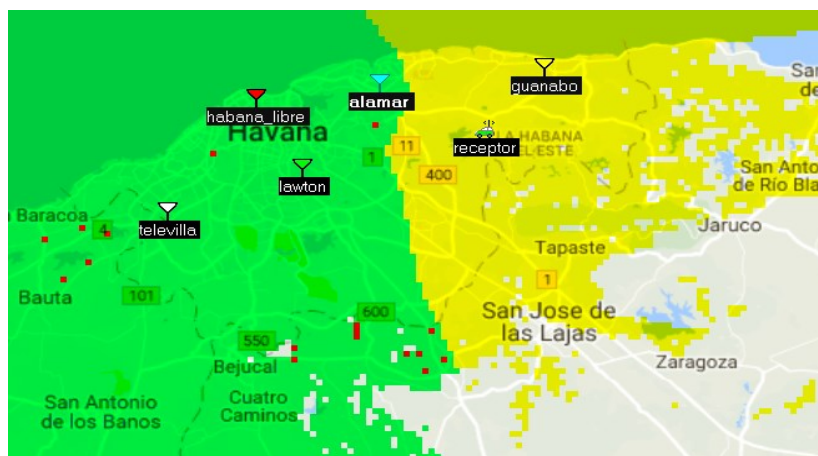


Figura 8

Interferencia entre todos los Txs. con intervalo de guarda =55 μ s

En la simulación aparecen algunas zonas de interferencia dentro de la provincia de La Habana, pero se logra cubrir la mayor parte del área de interés. Se aumenta el intervalo de guarda a 60 μ s, para concluir cual es el que mejor responde a las características de la red (Figura 9). Los nuevos retardos quedan de la siguiente manera: Televilla (0 μ s), Habana Libre (15 μ s), Lawton (20 μ s), Alamar (27 μ s), Guanabo (49 μ s). Con este resultado se puede apreciar que se obtuvo un margen de protección de 10 μ s garantizando que en la provincia La Habana no existan zonas de interferencia significativa.

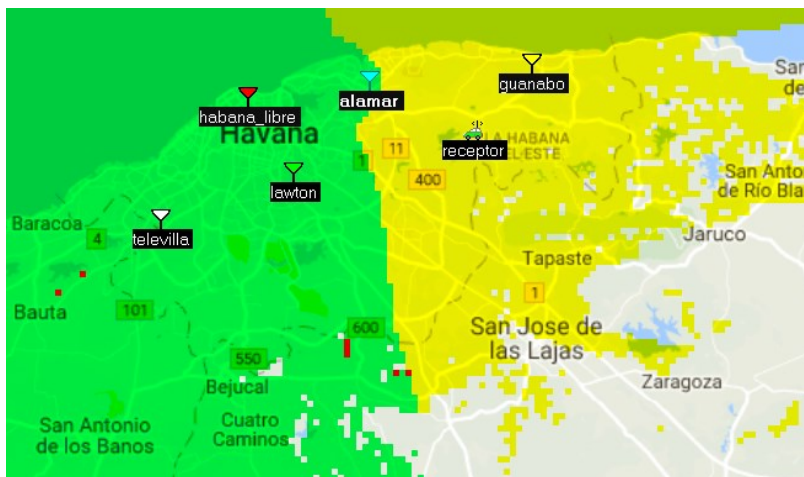


Figura 9

Interferencia entre todos los Txs. con intervalo de guarda =60 μ s

Con este resultado se puede apreciar que se obtuvo un margen de protección de 14 μ s garantizando que en la provincia La Habana no existan zonas de interferencia, aunque en las zonas aledañas a la provincia si se encuentran zonas críticas. Quedaría incluir un margen de protección con respecto a la relación señal-interferencia, que permita garantizar una mayor similitud de los resultados de la planeación con respecto a los que se obtengan durante el proceso de implementación. Por lo que se realizó el análisis nuevamente teniendo en cuenta un margen de 4 dB en la relación señal-interferencia con respecto a la utilizada en el acápite anterior y de esta manera cubrir algunos parámetros que el software Radio Mobile no considera y podrían provocar un deterioro en la señal. Los retardos en este caso quedaron de la siguiente manera: Televilla (0 μ s), Habana Libre (15 μ s), Lawton (20 μ s), Alamar (30 μ s), Guanabo (44 μ s).

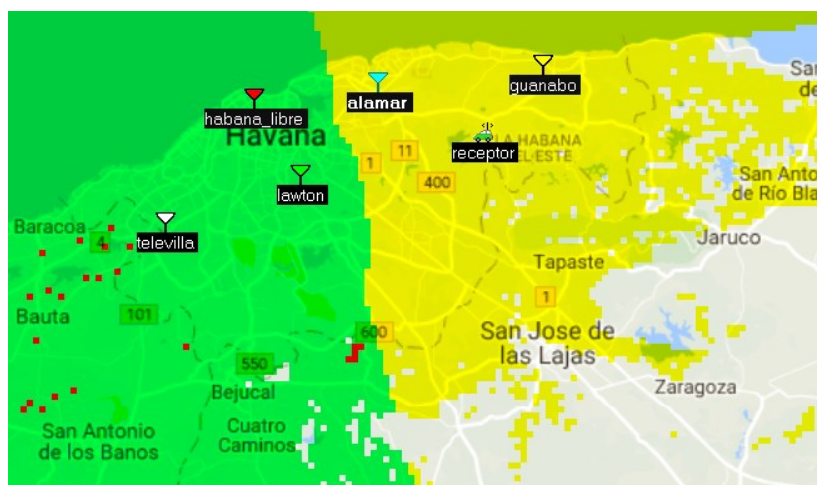


Figura 10

Interferencia entre todos los Txs. con intervalo de guarda =65 μ s y S/I=19 dB

Se obtuvo un resultado favorable, pues se logró dejar a la provincia La Habana sin zonas de interferencia, aún con los márgenes de protección de 4 dB de relación S/I y 9 μ s de intervalo de guarda.

3.3. - VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES Y ANÁLISIS COMPARATIVO CON LA MFN ACTUAL

El diseño propuesto (Figura 10), logra un área de cobertura similar a la cubierta por la MFN existente (Figura 5), permitiendo un ahorro de frecuencias y liberando 4 de las 5 frecuencias empleadas para la transmisión de la TVD de definición estándar. Estas frecuencias pueden ser destinadas a continuar el despliegue de la televisión digital y la incorporación de nuevos servicios (LTE-4G, etc.), contribuyendo así a un uso más eficiente del espectro radioeléctrico.

Los resultados de las simulaciones arrojaron que la SFN diseñada tiene similar área de cobertura a la brindada por la MFN existente, con márgenes de protección de 9 μ s con respecto al límite teórico de Intervalo de Guarda de 74 μ s, así como un margen de 4 dB con respecto a la mínima S/I de 15 dB necesaria para la recepción. Estos márgenes de protección permiten mejorar la respuesta de la red, ante factores que el modelo de propagación no tiene en cuenta en su algoritmo, y que influyen en la correcta demodulación de la señal.

Se propone de las 5 frecuencias empleadas en La Habana utilizar para las transmisiones en SFN 617MHz que es la correspondiente al canal 38 del trasmisor de Televilla, siguiendo los criterios de afectación a la menor cantidad de personas posibles, ya que al ser el trasmisor de mayor potencia es el que brinda servicio a la mayor cantidad de personas en la Habana, así como una menor probabilidad de interferencia de transmisores lejanos producto de la reutilización de la frecuencia.

4. – CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos con el grupo de simulaciones propuesto, se comprueba la aplicabilidad de una red SFN en las condiciones actuales del sistema de radiodifusión como alternativa para el uso más eficiente del espectro radioeléctrico. Respetando la posición de las estaciones transmisores existentes, así como la potencia que emplean, se logra mantener la cobertura utilizando solo uno de los cinco canales de frecuencias. La estrategia de diseño propuesta está basada en la selección de los retardos de transmisión de cada una de las estaciones bases de la red para evitar las interferencias de ecos cuya duración sea superior a la de los intervalos de guarda. Un ajuste rápido de los retardos de los transmisores permitió conseguir la cobertura deseada considerando un intervalo de guarda de 70 μ s; sin embargo, este valor no deja margen suficiente respecto a la capacidad real de los receptores comerciales recogida en otras investigaciones. La búsqueda del intervalo de guarda mínimo resulta en que, considerando un intervalo de guarda de 65 μ s y retardos en los transmisores de Televilla (0 μ s), Habana Libre (15 μ s), Lawton (20 μ s), Alamar (30 μ s), Guanabo (44 μ s), se consigue cubrir toda la zona de La Habana sin interferencias significativas en la señal. Cabe decir que los márgenes obtenidos están acorde al peor caso ya que se basan en el empleo de una PN420 que tiene solo 74 μ s de duración de intervalo de guarda, siendo más favorable para el caso de las PN595 y PN945 con tiempos de duración de 105 μ s y 167 μ s respectivamente.

El software de desarrollo propio *Simulador de Interferencias para SFN* se valida como un complemento a Radio Mobile, necesario para el análisis de interferencias en redes de más de dos transmisores. Esta herramienta, además, permite resaltar en el mapa los puntos donde se cumplen los intervalos temporales, es decir, no se reciben ecos fuera de la cabecera de trama. Esta utilidad es aplicable tanto a la investigación presentada como a un grupo de futuras investigaciones orientadas al análisis de la ganancia SFN.

REFERENCIAS

1. Iliev TB, Mihaylov GY, Ivanova EP, Stoyanov IS, Radev DI. Experimental study of the basic parameters and the field strength of a television transmitter in the single frequency network (SFN). 2017 27th International Conference Radioelektronika 19-20 April 2017 Brno, Czech Republic IEEE; 2017. p. 1-4.
2. Plets D, Joseph W. SFN Gain in Broadcast Network. 2011 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB); 8-10 June 2011 Nuremberg, Germany IEEE; 2011.
3. Bóveda J, Marcos G, Pérez JM, Ponce S, Aranaz A. MER degradation in a broadcast mobile network. 2009 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting; 13-15 May 2009 Bilbao, Spain 2009. p. 1-5.
4. Ruckveratham B, Promwong S. Evaluation of SFN gain for DVB-T2. International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT); Chiang Mai, Thailand IEEE; 2017. p. 85-93.
5. Plets D, Joseph W, Angueira P, Arenas JAJA, Verloock L, Martens L. On the methodology for calculating SFN gain in digital broadcast systems. IEEE Transactions on Broadcasting. 2010;56(3):331-339.
6. Li C, Telemi S, Zhang X, Brugger R, Angulo I, Angueira P. Planning Large Single Frequency Networks for DVB-T2. IEEE Transactions on Broadcasting. 2015;61(3):376-387.
7. ITU-R. Report ITU-R Digital terrestrial broadcasting: Design and implementation of single frequency networks (SFN). Geneva: ITU; 2015 07/2015.

8. Ruisánchez DP, Cesar FA, Adán DP, Pupo EF, Hernández RD. Análisis del comportamiento de la ganancia de SFN para DTMB. Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones. 2019;40(1):71-80.
9. González DA, Enríquez JA. Diseño de una Red de Frecuencia Única (R.F.U.) para operación de un canal de Televisión UHF en la Ciudad de Guayaquil. Tesis de Maestría. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador. 2016. [https://www.semanticscholar.org/paper/Dise%C3%B1o-de-una-red-de-frecuencia%C3%BAnica\(r.f.u.\)-para-Gonz%C3%A1lez-Enrriquez/d83667751335c80f4364203c1ec2c9857213bb8e](https://www.semanticscholar.org/paper/Dise%C3%B1o-de-una-red-de-frecuencia%C3%BAnica(r.f.u.)-para-Gonz%C3%A1lez-Enrriquez/d83667751335c80f4364203c1ec2c9857213bb8e)
10. The State Administration of Radio, Film and Television: Implementation guidelines for transmission system of digital terrestrial television broadcasting. Standard GYT236-2008. China; 2008. <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/GYT236-2008>
11. Alonso AM, Alonso RM, Nieto GG, editors. Parámetros de calidad de recepción del estándar DTMB en 6MHz. 2014 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON); 2014 11-13 June 2014; Bariloche, Argentina
12. Kusunoki M. Retransmissão do Sinal de TV Digital no padrão Brasileiro com Redes SFN e gap filler. Monografía de Especialização. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, Brasil; 2013. <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/3244>
13. Mattsson A. Single frequency networks in DTV. IEEE Transactions on Broadcasting. 2005;51(4):413-22.
14. Caiwei L, Sato T, Pablo A, Roland B, Xiaolin Z, Javier M, et al., editors. Optimal DVB-T2 network planning using theoretical SFNs. 2014 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting; 2014 25-27 June 2014; Beijing, China IEEE.
15. T. Sato BR, P. Ivan, A. Pablo. A comparison between theoretical and practical planning approaches for DVB-T2 single frequency networks. IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting; 17-19 June 2015; Ghent, Belgium IEEE; 2015. p. 1-6.
16. Bregni S, Lacavalla L, Propersi B, Residori F, editors. Synchronization of single-frequency simulcast networks using network time protocol. 2007 IEEE International Conference on Communications. Glasgow, UK; 2007.
17. Resolución No.79/2018. Especificaciones Técnicas y de Operación que tienen que cumplir los receptores empleados para Televisión Digital Terrestre en Cuba. La Habana, Cuba; (2018). https://www.mincom.gob.cu/sites/default/files/marcoregulatorio/r_7918_especificaciones_tecnicas_de_tvd_y_cajas_decodificadoras_0.pdf
18. Database MGPC. Distancia entre dos puntos / coordenadas Madrid,España2016 [Available from: <http://www.mapanet.eu/resources/Script-Distance.htm>.

CONFLICTO DE INTERESES

Ninguno de los autores manifestó la existencia de posibles conflictos de intereses que debieran ser declarados en relación con este artículo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Dalila Garrido Mirabal: Conceptualización, Curación de Datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración de proyecto, Recursos, Validación-Verificación, Visualización, Redacción borrador original, Redacción y revisión de la versión final.

Alejandro Sánchez Domínguez: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Software, Validación-Verificación.

Leandro Boucourt Ferrer: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Software, Validación-Verificación.

Reinier Díaz Hernández: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración de proyecto, Recursos, Supervisión, Validación-Verificación.

AUTORES

Dalila Garrido Mirabal, Ing. Telecomunicaciones y Electrónica, Aspirante a Investigador, **LACETEL**, La Habana, Cuba, dalila@lacetel.cu, ORCID ID 0000-0001-8695-980X, los principales intereses de investigación en que se desempeña están relacionadas con las comunicaciones digitales y el procesamiento digital de señales en sistemas de radiodifusión.

Alejandro Sánchez Domínguez, Ing. Telecomunicaciones y Electrónica, ETECSA, La Habana, Cuba, alejandro.sanchez@cubacel.cu, ORCID ID 0000-0003-0711-1398, los principales intereses de investigación en que se desempeña están relacionadas con las comunicaciones digitales y el procesamiento digital de señales en sistemas de radiodifusión.

Leandro Boucourt Ferrer, Ing. Telecomunicaciones y Electrónica, La Habana, Cuba, leandrob94@gmail.com, ORCID ID 0000-0001-9944-3714, los principales intereses de investigación en que se desempeña están relacionadas con las comunicaciones digitales y el procesamiento digital de señales en sistemas de radiodifusión.

Reinier Díaz Hernández, MSc. Ing. Telecomunicaciones y Electrónica, *LACETEL*, La Habana, Cuba, reinier@lacetel.cu, ORCID ID 0000-0001-9439-4714, los principales intereses de investigación en que se desempeña están relacionadas con las comunicaciones digitales y el procesamiento digital de señales en sistemas de radiodifusión.



Esta revista se publica bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Sin Derivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)