

ESTUDIO DE OCUPACIÓN ESPECTRAL DE SERVICIOS DE COMUNICACIÓN DE 85 MHZ A 2.5 GHZ EN SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

SPECTRUM OCCUPANCY MEASUREMENTS ON COMMUNICATION SERVICES FROM 85 MHZ TO 2.5 GHZ IN SAN LUIS POTOSI, MEXICO

David Antonio Arista Ramírez

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
davrista@gmail.com

Marco Aurelio Cárdenas Juárez

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
mcardenas@fc.uaslp.mx

Ulises Pineda Rico

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
u_pineda@fc.uaslp.mx

Armando Arce Casas

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
armando.arce@uaslp.mx

Enrique Stevens Navarro

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
estevens@fc.uaslp.mx

Resumen

El espectro radioeléctrico es un recurso limitado para las comunicaciones inalámbricas, en México este es administrado por el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) el cual asigna las frecuencias que van desde los 3 kHz hasta los 300 GHz. El hecho de que todo este ancho de banda este atribuido para ser usado en ciertos servicios de comunicación no significa que todas las bandas sean utilizadas en determinado momento y lugar. Con el fin de determinar la ocupación real del espectro radioeléctrico en determinadas bandas, se realizó una campaña de medición espectral en la ciudad de San Luis Potosí utilizando tres distintos umbrales de decisión propuestos en la literatura. En este trabajo se presenta la metodología utilizada para la realización de dicha campaña, así como

del cálculo del umbral de decisión y ciclo de trabajo de cada banda. Los resultados muestran que el ciclo de trabajo en las bandas de estudio varía en relación con el umbral de decisión utilizado, además de que la ocupación depende del tipo de servicio ofrecido en cada banda.

Palabras Claves: Ciclo de trabajo, espectro radioeléctrico, ocupación espectral.

Abstract

Radioelectric spectrum is a limited resource for wireless communication, in Mexico it is managed by the Federal Telecommunication Institute whom allocate frequencies between 3 kHz and 300 GHz, the fact that this whole bandwidth is reserved for its use in certain communication services does not mean that all bands will be used at a particular time and place. In order to measure the real spectrum occupancy in certain bands, a spectrum measurement campaign was held in the city of San Luis Potosi, three different decision thresholds were used in this paper. In this paper we present the methodology used in this campaign, also decision threshold and duty cycle calculation are explained. Results show that duty cycle in the studied bands vary depending on decision threshold used, also we conclude that spectrum occupancy depends on the kind of service offered in the band.

Keywords: *duty cycle, radioelectric spectrum, spectrum occupancy.*

1. Introducción

Desde el inicio de las comunicaciones, el medio de transmisión ha jugado un papel importante en el desarrollo y eficiencia de las mismas. Las primeras tecnologías se basaban en medios de transmisión alámbricos, lo cual implica un medio controlado y directo entre usuarios, si la capacidad del cable era comprometida por el número de usuarios, simplemente se instalaban cables extra y de esta manera se ampliaba la capacidad del sistema. Con el advenimiento de las comunicaciones inalámbricas, las cuales comparten el mismo medio de propagación, los gobiernos tuvieron que crear políticas para la correcta distribución del espectro radioeléctrico, esto provoco que a las diferentes

tecnologías les fueran asignadas bandas específicas. El problema de esta distribución fija es que el total del espectro radioeléctrico fue asignado a diferentes servicios, lo que provoca que servicios que tienen gran cantidad de usuarios en determinado momento y lugar, puedan saturarse, provocando fallas en la disponibilidad, mientras que otros servicios son poco o nulamente usados en esa misma región. Es por esto que se han propuesto métodos de acceso dinámico al espectro [López,6], estos buscan solucionar el problema de la escasez de espectro partiendo de la idea de que un usuario puede no estar usando su banda asignada lo cual abre la posibilidad a otros usuarios de usarla de manera oportunista. Para la correcta implementación de estos sistemas es importante conocer la ocupación espectral, esto con el fin de identificar bandas que podrían ser candidatas para usar en acceso dinámico al espectro.

El espectro radioeléctrico es un recurso que es administrado por las autoridades de cada país, estas se encargan de dividirlo en bandas que puedan ser usadas por diferentes usuarios y para distintos servicios. En México el espectro radioeléctrico es administrado por el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) y las frecuencias reservadas para distintos servicios se detallan en el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias [IFT,5], las bandas reservadas en este consideran un ancho de banda que va desde los 3 kHz hasta los 300 GHz. El hecho de que el espectro radioeléctrico este asignado en su totalidad no significa que todas las bandas de frecuencia sean utilizadas en determinado momento y lugar; es por esto que es importante conocer la ocupación real del espectro en determinada región, el ciclo de trabajo (DC) es el parámetro utilizado para conocer el porcentaje de tiempo que una frecuencia se encuentra en uso.

La figura 1 muestra la ubicación de dichas campañas mientras que la tabla 1 contiene algunos parámetros utilizados en estas.

En 1998 se realizó el primer estudio de ocupación espectral reportado en la IEEE [Sanders,10], en este se midió la ocupación en diversas ciudades de California, Estados Unidos. En 2005 se realizó un estudio donde se compara el uso del espectro en ciudades y áreas rurales, se estableció que el DC promedio en áreas rurales es mucho menor que en áreas urbanas [Petrin,9]. En Nueva Zelanda se

realizó uno de los estudios de ocupación espectral de mayor duración a la fecha [Chiang,3], en este se tomaron muestras durante 7 semanas y además se comparan los resultados de interiores y exteriores. En [López,7] se midió el DC Promedio en la ciudad de Barcelona, en este se propuso una nueva metodología para medir el DC, en la cual se fija con base en la probabilidad de falsa alarma deseada. En Australia se realizó una campaña que midió la ocupación espectral usando una plataforma de medición montada en un vehículo, en esta se comparó la ocupación espectral con la densidad poblacional [Al-Hourani,2].

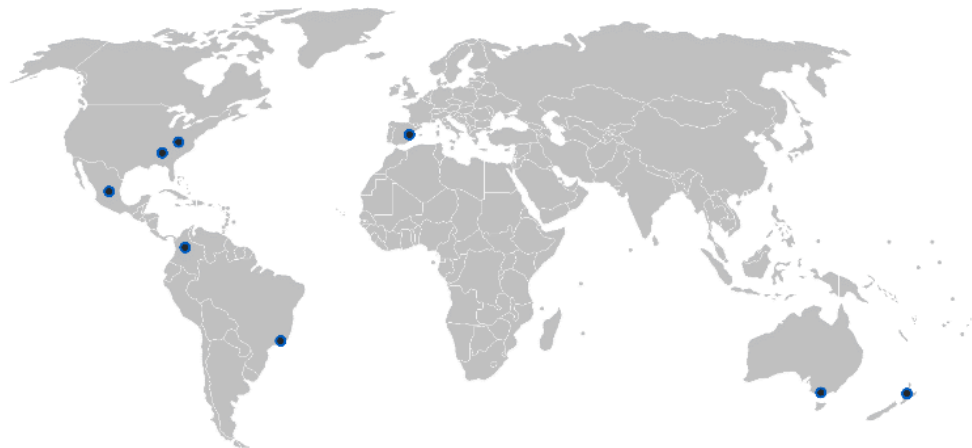


Figura 1 Ubicación de las principales campañas de medición alrededor del mundo.

Tabla 1 Detalles de las Campañas de Medición realizadas.

Año	Lugar	Span (MHz)	DC (%)	Referencia
2005	Atlanta, Carolina del Norte (Estados Unidos)	400 - 7,200	3.2-22.4	[Petrin,9]
2007	Auckland (Nueva Zelanda)	806 - 2,750	6.21	[Chiang,3]
2009	Barcelona (España)	75 - 3,000	22.57	[López,7]
2012	Bogotá (Colombia)	54 – 6,000	53.8	[Pedraza,8]
2013	Rio de Janeiro (Brasil)	255 – 2,690	19.6	[de Lima,4]
2013	San Luis Potosí (México)	30 - 910	12.5	[Aguilar,1]
2015	Melbourne (Australia)	400 – 6,000	-	[Hourani,2]

En América latina la primera campaña de ocupación de la medición espectral se realizó en Colombia [Pedraza,8], durante esta se añadió equipo de radiofrecuencia

con el fin de obtener mejores muestras. En 2013 un estudio realizado en Brasil midió la ocupación en la ciudad de Rio de Janeiro [de Lima,4], dentro de este estudio también se preparó un algoritmo que simula el DC en el rango de mediciones. Ese mismo año se reportó la primera campaña de medición espectral en México, esta se midió en la ciudad de San Luis Potosí [Aguilar,1], durante esta se usó una antena direccional que era direccionada manualmente a los cuatro puntos cardinales.

En este artículo se busca complementar trabajos realizados anteriormente, haciendo uso de diversas técnicas que mejoren la toma y procesamiento de las muestras. En este se describe la metodología usada para obtener el DC de diversas bandas usando tres distintos umbrales de decisión, los resultados muestran que el DC de cada banda varía en relación con el umbral de decisión utilizado y el tipo de servicio ofrecido.

2. Métodos

Como se vio en la sección 1, la totalidad del espectro radioeléctrico está dividido en bandas que son asignadas para ser usadas en distintos servicios, un gran número de estas bandas están licitadas a empresas que se encargan de ofrecer servicios de telecomunicaciones a los usuarios finales, estas empresas pagan grandes cantidades de dinero por hacer uso de una porción del espectro. Las bandas restantes están asignadas para usos gubernamentales, meteorológicos, industriales y científicos.

Este trabajo se centra en 5 bandas las cuales se encuentran asignadas para la prestación de servicios de radiodifusión y telefonía móvil, además de la banda de uso libre ISM en 2.4 GHz. A continuación, se presentan tres secciones donde se describe la metodología utilizada para calcular la ocupación espectral en dichas bandas.

Equipo, ubicación y bandas

El equipo utilizado en este estudio consiste en una antena omnidireccional AOR DA3200 polarizada verticalmente con patrón de radiación horizontal, dicha antena

está fabricada para el rango de frecuencias 35 – 3000 MHz. Esta se conectó con un cable de bajo ruido al analizador de espectro portátil Tektronix RSA306, el cual está especificado para frecuencias hasta 6.2 GHz, este se controla por medio de Matlab desde una laptop, la figura 2 muestra la plataforma de medición espectral. La campaña de medición se realizó en el Laboratorio del Posgrado en Telecomunicaciones de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, el cual se encuentra en la planta superior (tercer piso) del edificio 1 de la Facultad de Ciencias, la ubicación de la medición se observa en el punto azul de la figura 3. Las mediciones fueron tomadas el día 9 de septiembre del 2017, en total se tomaron 10,000 trazas de energía en un periodo de 2 horas por banda.



Figura 2 Plataforma de Medición Espectral.

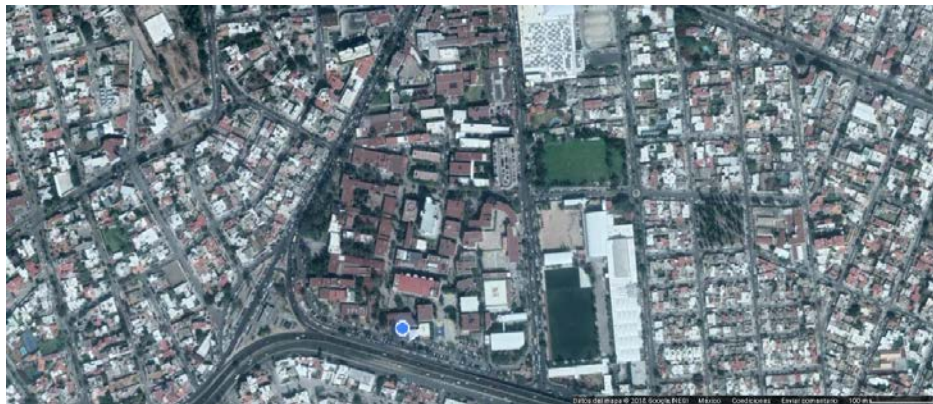


Figura 3 Ubicación de la campaña preliminar (22°8'33.7" N, 101°0'56.89" O).

Las bandas a medir en esta campaña corresponden a las tecnologías más usadas actualmente, se eligieron 5 bandas, 4 de ellas bandas comerciales licitadas por el IFT (radiodifusión FM, televisión digital terrestre (TDT), telefonía móvil GSM 900 y

GSM 1900) y la banda libre de uso Industrial, Científico y Médico (ISM por sus siglas en inglés) de 2.4 GHz, las propiedades de estas bandas se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Bandas consideradas en la campaña.

Frecuencia (MHz)	Ancho de Banda	Uso
85 – 110	25	Radio Comercial FM
480 – 600	120	Televisión Digital Terrestre
824 – 894	70	Telefonía Móvil (GSM 900)
1850 -1990	140	Telefonía Móvil (GSM 1900)
2400 - 2500	100	ISM (2.4 GHz)

Ciclo de trabajo (DC)

Como se mencionó en la sección 1, el DC nos indica el porcentaje de tiempo que una señal se encuentra activa durante cierto periodo. Calcular este parámetro permitiría ubicar las bandas de mayor uso en cierto lugar, así como identificar bandas en las que es posible hacer uso de tecnologías de acceso dinámico al espectro [López,6].

El DC se calcula mediante la sumatoria del número de muestras de energía que se encuentren por encima de cierto umbral de decisión. Sea $X(f)$ un vector con N_t niveles de energía correspondientes a las muestras tomadas en cierta frecuencia, Ω un vector de la forma expresada en la ecuación 1 y sea γ el umbral de decisión utilizado, el DC para cierta frecuencia se define en la ecuación 2. El DC promedio (ecuación 3) indica el porcentaje de ocupación de todo el rango de frecuencias y se calcula expandiendo la ecuación 2 para todo el número de puntos de frecuencia N_f .

$$\Omega = \begin{cases} 0 & \text{si } x_i(f) \leq \gamma \\ 1 & \text{si } x_i(f) > \gamma \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N_t \quad (1)$$

$$DC = \frac{\sum_{i=1}^{N_t} \Omega_i}{N_t} \quad (2)$$

$$DC \text{ Promedio} = \sum_{j=1}^{N_f} \frac{DC_j}{N_f} \quad j = 1, 2, \dots, N_f \quad (3)$$

El umbral de decisión γ es el parámetro más importante a la hora de calcular el DC, ya que un valor muy bajo de este puede provocar que se sobrestime el porcentaje de ocupación, mientras que un valor muy alto ocasionará que se subestime. Por esta razón se han propuesto diversos umbrales con el fin de estimar la ocupación espectral [López,6]. Todos estos se basan en el método de detección de energía ya que este no requiere saber propiedades de las señales a analizar, solamente conociendo el nivel de ruido del aparato de medición y las propiedades de las muestras de energía es posible calcular los diferentes umbrales de decisión:

- **Máximo Ruido:** Este método se basa en tomar la mayor muestra de potencia de ruido obtenida en el analizador (ecuación 3), la principal desventaja de este es que algunas muestras de ruido pueden elevarse muy por encima del promedio de ruido, esto significa que se estaría subestimando la ocupación espectral; sin embargo, este método asegura que ninguna muestra de ruido sea tomada como señal activa, lo que es igual a una falsa alarma del 0 %, tal y como se expresa en la ecuación 4.

$$\gamma(f) = x_{\max}(f) \quad (4)$$

- **m-dBm:** Hasta ahora este es el método más utilizado para definir el umbral de decisión, este se fija calculando el promedio del nivel de ruido del aparato de medición y aumentando cierta cantidad (m) de decibeles por encima de este (ecuación 5).

$$\gamma(f) = x_{\text{prom}} + m \quad (5)$$

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU por sus siglas en inglés de International Telegraph Union) recomienda el uso de 6 dBm para frecuencias menores a 400 MHz y 10 dBm para frecuencias mayores [Aguilar,1]. Se ha calculado que 5 dBm por encima del ruido promedio de fondo corresponden a una probabilidad de falsa alarma de 1.2 % [Chiang ,3]; sin embargo, ya que la distribución del ruido de fondo varía entre analizadores de espectro es necesario hacer un análisis de la probabilidad de falsa alarma correspondiente para cada aparato. A diferencia de la ecuación

4, este tipo de umbral puede detectar señales débiles que caigan por debajo del máximo ruido del sistema.

- **Probabilidad de Falsa Alarma (PFA):** Propuesto inicialmente en [López,7], este se basa en la probabilidad de que un canal sea declarado como ocupado cuando en realidad no está siendo usado. Sean $N(f)$ las muestras de potencia de ruido, y tomando una probabilidad de falsa alarma igual a P_{fa} , el umbral de decisión $\gamma(f)$ en cada punto de frecuencia f se fija de tal manera que solo la fracción de muestras correspondientes a P_{fa} de $N(f)$ esten por encima del umbral (ecuación 6), donde $F_{N(f)}^{-1}$ representa la inversa de la función de probabilidad acumulada $F_{N(f)}$. Este umbral se puede tomar como un punto intermedio entre la ecuación 3 en el cual nunca se sobre estima la ocupación y la ecuación 5 en el que las señales pueden ser sobrestimadas o subestimadas, en este se garantiza que el máximo nivel de sobrestimación sea igual a P_{fa} .

$$\gamma(f) = F_{N(f)}^{-1}(1 - P_{fa}) \quad (6)$$

Para medir el ruido de fondo se reemplaza la antena por una carga que tenga un valor de impedancia igual a la impedancia característica del analizador, normalmente con valor de 50Ω , posteriormente se toman muestras con el fin de obtener las propiedades del ruido para ser usadas en el cálculo del umbral, entre mayor sea el número de muestras mayor será la precisión del umbral de decisión. La figura 4 muestra una comparativa entre los umbrales antes mencionados.

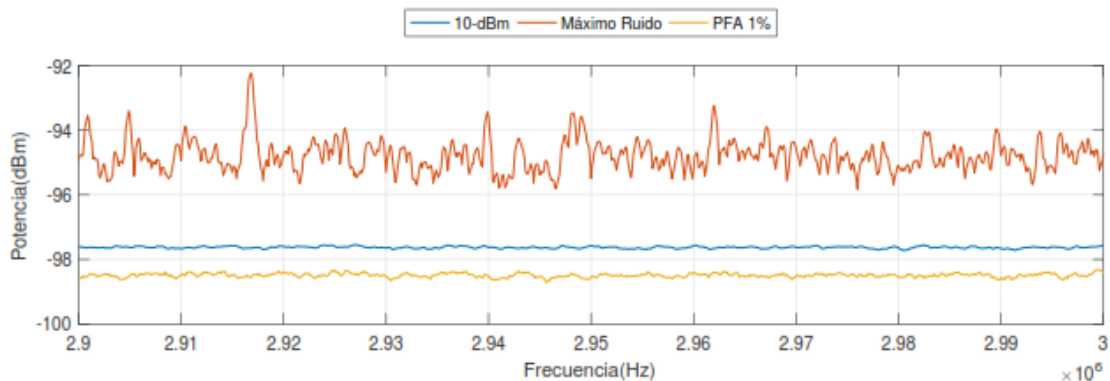


Figura 4 Comparación entre los umbrales propuestos.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos para los tres umbrales antes mencionados, para el tercero se usó una probabilidad de falsa alarma del 1%. Dicho umbral se calculó utilizando 20,000 muestras de ruido para cada banda.

Procesamiento de los datos

Es necesario configurar el analizador de espectro con diversos parámetros requeridos para la toma de muestras, los más importantes son resolución de ancho de banda, tipo de detector y puntos por barrido. El ancho de banda de resolución utilizado fue de 1 kHz, este indica el menor ancho de banda que el analizador es capaz de percibir. El tipo de detector utilizado fue “+peak”, el cual guarda la mayor potencia recibida en cada rango. Se utilizaron 1001 puntos por barrido (N_f), lo que representa la longitud del vector guardado en la computadora, los datos son guardados directamente en un archivo de valores separados por coma (csv).

En total se guardaron 10,000 archivos csv (N_t) por banda, cada uno de estos representa la densidad de potencia espectral tomada en cierto momento de la medición.

El conjunto de muestras de densidad espectral de potencia correspondientes a cierta banda puede ser representado como una matriz \mathbf{M} (6), de $N_t \times N_f$ mediante la ecuación 7.

$$\mathbf{M} = [\mathbf{M}(t_i, f_j)] \quad (7)$$

Donde cada elemento $\mathbf{M}(t_i, f_j)$ representa la muestra de densidad espectral de potencia tomada en el instante t_i ($i = 1, 2, \dots, N_t$) y en el punto de frecuencia f_j ($j = 1, 2, \dots, N_f$). Aplicando la ecuación 2 a cada fila y usando la ecuación 4 para el vector resultante, obtenemos el DC promedio de toda la banda.

En este trabajo se calculó el DC para los tres umbrales de decisión propuestos, de acuerdo con lo visto en la Sección 2.2. Para determinar que el valor de falsa alarma corresponda al error en el porcentaje de ocupación, se calculó el DC de la banda de 2.9-3 GHz la cual se encuentra asignada a radionavegación [IFT,5] y se

espera tenga casi nula actividad espectral. Los resultados muestran que, usando este umbral, el DC aumenta en razón a el porcentaje de falsa alarma (figura 5).

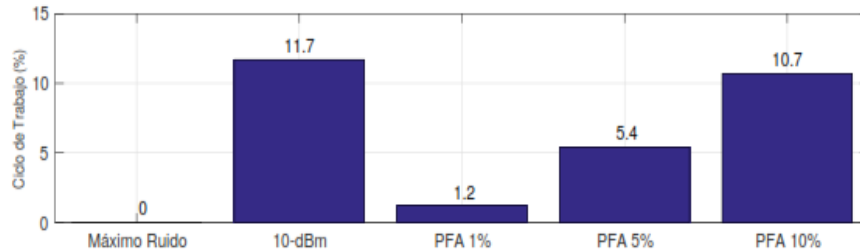


Figura 5 Ciclo de Trabajo en banda con baja ocupación espectral (2.9-3 GHz).

3. Resultados

La ocupación espectral de las distintas bandas fue tomada por periodos de dos horas, teniendo un total de 10,000 trazas. Con el fin de mostrar la diferencia entre los diferentes valores de potencia registrados durante la campaña, en la figura 6 se muestra el nivel máximo, el promedio y el mínimo de las 10,000 muestras tomadas por banda. En esta gráfica se observa que, en las bandas asignadas a FM, TDT y telefonía móvil, presentan señales con niveles de potencia promedio superiores a el resto de la banda.

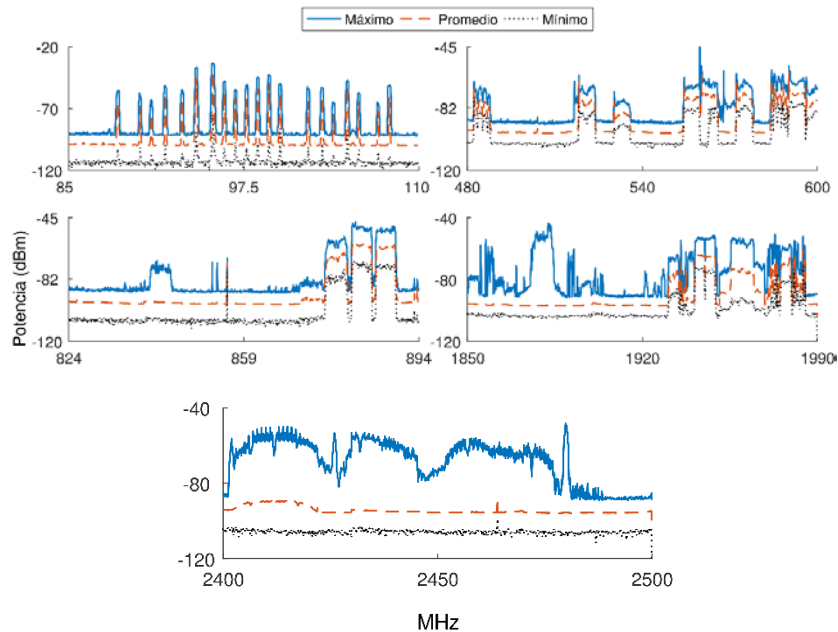


Figura 6 Niveles de potencia para cada una de las bandas.

La figura 7 muestra la ocupación en las 5 bandas durante el periodo de la medición, los puntos blancos representan cuando la banda se consideró ocupada. Dicha gráfica considero solo el DC calculado con la probabilidad de falsa alarma del 1%. Los resultados muestran que, en las bandas asignadas a FM, TDT y telefonía móvil presentan canales con actividad constante, sin embargo, fuera de estos el espectro se encuentra libre todo el tiempo. Por el contrario, la banda de ISM en 2.4 GHz presenta puntos negros en toda la banda, lo que representa que existen señales en todo el rango.

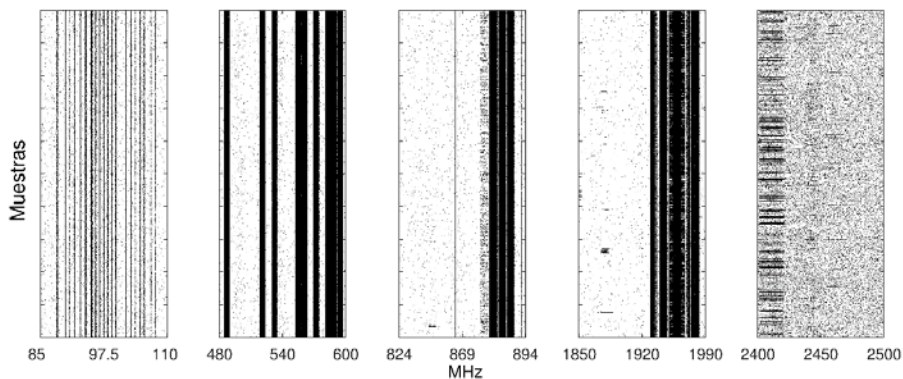


Figura 7 Evolución del DC con respecto a las muestras para cada una de las bandas.

Por último, la tabla 3 muestra el valor de DC Promedio para las cinco bandas de estudio, en esta se nota que la ocupación en cada banda depende del tipo de servicio ofrecido.

Tabla 3 DC de las distintas bandas.

Banda	Máximo Ruido	m-dBm	PFA (1%)
FM	12.8	15.7	16
TDT	41.3	41.3	42.8
GSM 900	18.6	19.4	20.9
GSM 1900	31.3	31.5	34.1
ISM (2.4)	7.2	7.8	22.3

Dado que el servicio de TDT tiene más espectro asignado, este presenta mayores DC promedio que las demás bandas. También las bandas de GSM presentan

ocupación considerable, esto debido a que ciertas bandas dentro del rango se mantuvieron activas durante todo el periodo de medición. A pesar de que las estaciones de FM se mantuvieron constantes durante todo el periodo de mediciones, esta banda presenta DC Promedio entre 12.8 y 16%, esto debido a que existen grandes espacios entre frecuencias. Por último, la banda de ISM en 2.4 GHz presentó la menor ocupación, utilizando los umbrales de máximo ruido y m-dBm. Por otro lado, con el umbral de PFA la ocupación aumento en 15.1%, siendo la banda que mayor diferencia presenta entre umbrales, esto se debe a diferencia de las otras bandas, en esta las señales son de menor potencia, lo que ocasiona que las muestras se encuentren más cerca del umbral de decisión.

4. Discusión

Basándonos en la sección anterior se puede distinguir que de las 5 bandas existen 4 que presentan canales con potencia promedio y DC promedio superiores al resto. En el caso de radio FM y TDT que son servicios de radiodifusión, dichos canales son destinados a proveer servicios de audio y video usando un tipo de transmisión *simplex* (unidireccional), en la que el receptor solo recibe la señal sin enviar nada de vuelta. Por otro lado, las bandas designadas a telefonía móvil utilizan transmisión *full dúplex* (ida y vuelta), en estas bandas se observa gran diferencia entre los canales de subida (824-849 MHz, 1850-1910 MHz) y de bajada (936-960 MHz, 1930-1990 MHz), esto se debe a que las señales generadas en los dispositivos celulares (subida) son más débiles que las enviadas por las estaciones base (bajada) y por tanto nuestra plataforma es incapaz de detectarlas. Para el caso de la banda ISM en 2.4 GHz, los resultados muestran que tanto la potencia como el DC varían en relación al instante de la medición, esto se debe a que ciertos estándares que usan la banda emiten energía solo cuando lo requieren, como es el caso de WiFi.

5. Conclusiones

En este trabajo se presentó un estudio de la ocupación espectral en distintas bandas asignadas a distintos servicios. Los resultados presentados muestran que

la ocupación espectral depende directamente del tipo de servicio ofrecido. En el caso de servicios de radiodifusión la ocupación depende del número de canales asignados a la prestación de estos servicios. Por esta razón el DC promedio de estas bandas puede cambiar dependiendo del lugar de medición.

La ocupación en bandas de telefonía móvil depende del tipo de canal medido, en el caso de canales de bajada la ocupación es del 100%, mientras que los canales de subida presentaron ocupación casi nula. Para la banda de 2.4 GHz los resultados fueron diferentes, ya que la potencia indica actividad en toda la banda, sin embargo, ya que esta solo se mantiene durante pequeños periodos de tiempo, el DC promedio es menor a otras bandas.

Por último, se notó que los diferentes umbrales de decisión afectan el cálculo del DC promedio, ya que los resultados difieren para todos los casos, siendo el de máximo ruido el que menores porcentajes aporta, sobre todo en bandas en las que la potencia promedio es más débil.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Aguilar, R., Cardenas, M., Pineda, U. & Stevens, E. Spectrum Occupancy Measurements below 1 GHz in the City of San Luis Potosi, Mexico. 2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference, p. 1-5, Las Vegas, 2013.
- [2] Al-Hourani, A., Trajkovi, V. & Kandeepan, S. Spectrum occupancy measurements for different urban environments. 2015 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), p. 97-102, Paris, 2015.
- [3] Chiang, R., Rowe, G. & Sowerby, K. A Quantitative Analysis of Spectral Occupancy Measurements for Cognitive Radio. 2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference, p. 3016-3020, Dublin, 2007.
- [4] De Lima, M. & Mello, L. Cognitive radio simulation based on spectrum occupancy measurements at one site in Brazil 2013 International Microwave & Optoelectronics Conference, p.1-5, Rio de Janeiro, 2013.
- [5] Instituto Federal de Telecomunicaciones, Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF), <http://cnaf.ift.org.mx>.

- [6] López, M. & Casadevall, F. Methodological aspects of spectrum occupancy evaluation in the context of cognitive radio. 2009 European Wireless Conference, p. 199-204, Aalborg, 2009.
- [7] Lopez, M., Umbert, A. & Casadevall, F. Evaluation of Spectrum Occupancy in Spain for Cognitive Radio Applications, IEEE 69th Vehicular Technology Conference, p. 1-5, Barcelona, 2009.
- [8] Pedraza, L., Molina, A. & Paez, I. Spectrum occupancy statistics in Bogota Colombia 2013 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing, p. 1-6, Medellin, 2013.
- [9] Petrin, A. & Steffes, P. Analysis and Comparison of Spectrum Measurements performed in Urban and Rural Areas to Determine the Total Amount of Spectrum Usage. Radio Spectrum Engineering Lab, 2005.
- [10] Sanders, F. Broadband spectrum surveys in Denver, CO, San Diego, CA, and Los Angeles, CA: methodology, analysis, and comparative results. 1998 IEEE EMC Symposium. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record, p. 988-993, Denver, 1998.