

# Uso eficiente del espectro: métrica de eficiencia económica

**Jrisky Motis<sup>1,2</sup>**

Centro de Estudios  
Enero 2022

---

<sup>1</sup> Los argumentos, el uso de los datos y el análisis incluido en este estudio son responsabilidad absoluta de la autora y no representan necesariamente la opinión del Instituto Federal de Telecomunicaciones ni la del Centro de Estudios.

<sup>2</sup> Doctora en Ciencias Económicas por la *Toulouse School of Economics* y Post Doctorado en la Universidad de Creta en donde realizó investigación en organización industrial aplicada para casos de prácticas anticompetitivas. Se ha desempeñado como asesora en materia de competencia económica, regulación e inversiones en los sectores de telecomunicaciones y radiodifusión en PROMTEL, el IFT y la COFECE. Se desempeñó como asesora en competencia económica en la Comisión de Competencia del Reino Unido y para la Dirección de Competencia de la Unión Europea; también como investigadora en competencia económica y regulación en instituciones académicas y consultorías de Francia, el Reino Unido y Grecia.

El estudio busca contribuir con el elemento económico de la MIDEE (Métrica Integral de Eficiencia Espectral) propuesta por la UER del IFT en 2018 para medir el uso eficiente del espectro concesionado para uso comercial y utilizado para brindar servicios de telecomunicaciones. Realiza una investigación sobre la literatura y la práctica regulatoria de lo que se ha propuesto como uso eficiente del espectro concesionado para uso comercial, desde el punto de vista económico, encontrando que no se ha llegado a un conceso para medir el uso eficiente del espectro y que, en su caso, debe incluir aspectos diversos como la eficiencia técnica y la eficiencia energética que a su vez determinan la eficiencia económica. El estudio propone una métrica de uso eficiente del espectro desde el punto de vista económico, MEEc reconciliando los conceptos que ofrece la literatura académica con la practicidad que requiere la práctica regulatoria y concluye con algunas sugerencias y recomendaciones de mejores prácticas para el caso de México.

# I. Introducción

---

El espectro radioeléctrico es un recurso natural limitado de gran valor económico y social, cuya demanda crece rápidamente en el actual entorno digital. Su uso tiene un impacto transversal en prácticamente todos los aspectos de la actividad económica y humana, tales como la comunicación, salud, educación, trabajo, transporte, entre otros. Por lo anterior, es importante saber si el espectro radioeléctrico concesionado está siendo utilizado de manera eficiente desde la perspectiva económica. De no ser así, es necesario que las autoridades regulatorias como el IFT promuevan y ofrezcan soluciones a la industria a través de diversos instrumentos. Entre otros, el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) realiza la planeación anual de asignación de bandas de frecuencias, realiza de estudios de factibilidad de uso de bandas, implementa los Lineamientos Generales sobre la Autorización de Arrendamiento de Espectro Radioeléctrico, los Lineamientos Generales para el Acceso a la Multiprogramación<sup>3</sup>, o la Política para la Transición a la Televisión Digital Terrestre y realiza estudios como el puesto a disposición en consulta pública en noviembre del 2020, sobre el uso de la banda de 6 GHz<sup>4</sup>, para tratar el evaluar el uso eficiente del espectro radioeléctrico por lo menos desde una óptica técnica. La evolución del uso eficiente del espectro desde una óptica económica es una tarea compleja sobre la cual no existe realmente un consenso a nivel internacional, pues el uso eficiente del espectro depende de varios parámetros y circunstancias que hacen su medición un tanto compleja. Sin embargo, es importante que los reguladores del espectro y la industria que hace uso de este cumplan con la función de la asignación de este, esto es, maximizar el beneficio de la sociedad. De no lograrse, las autoridades regulatorias pueden acudir a la medida extrema de recuperar dicho espectro y ponerlo a disposición del mercado para que los agentes económicos que mayor valor le otorguen puedan, en efecto, hacer un uso eficiente del espectro. Sin embargo, en México debe continuar el análisis de una metodología, lineamientos, criterios o procedimientos para efectuar mediciones sobre el uso eficiente del espectro desde el punto de vista económico.

Con el aumento de la demanda del espectro y el suministro finito del espectro, las actividades de gestión del espectro deben centrarse en permitir que los mercados del espectro se vuelvan más eficientes, entre otras herramientas, como las mencionadas en el párrafo anterior, optimizando la cantidad de espectro disponible para su uso. Sin embargo, para determinar dicha eficiencia, hacen falta métricas que permitan medir su uso de manera objetiva y robusta.

---

<sup>3</sup> Se estableció que, aquellos concesionarios de radiodifusión a los cuales se les autorizara la multiprogramación, deberán atender el principio de calidad técnica, el cual implica que el formato de compresión de la señal sea MPEG-2 (10 Mbps para alta definición y 3 Mbps para definición estándar) o MPEG-4 (6 Mbps para alta definición y 2.5 Mbps para definición estándar). Además, dentro de dichos lineamientos también se establecen diferentes tasas mínimas de transmisión, dependiendo de la cantidad de canales a multiprograma

<sup>4</sup> [http://www.ift.org.mx/sites/default/files/comunicacion-y-medios/comunicados-ift/comunicadoift85\\_1.pdf](http://www.ift.org.mx/sites/default/files/comunicacion-y-medios/comunicados-ift/comunicadoift85_1.pdf)

Cabe señalar que La Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión (LFTR) no contempla una definición concreta sobre el uso eficiente del espectro o eficiencia espectral. Sin embargo, en el artículo 15, fracción XLVIII señala que el IFT tiene la atribución de establecer las métricas de eficiencia espectral que serán de observancia obligatoria, así como las metodologías de medición que permitan cuantificarlas. Incluso en el Artículo 298 se establece que se sancionará con multa por el equivalente del 2.01% hasta 6%% de los ingresos del concesionario o autorizado por: ... “VII. Incumplir con los niveles de eficiencia en el uso del espectro establecidos por el Instituto”. Es por lo anterior que es importante que el IFT analice e idealmente diseñe las herramientas adecuadas para medir el uso eficiente del espectro en sus diferentes dimensiones, que se explicarán más adelante.

En diciembre 2018, la Unidad de Espectro Radioeléctrico (UER) del IFT, publicó el estudio de Medición de la Eficiencia Espectral, Definiciones y Consideraciones a Observar para su Aplicación en México<sup>5</sup> (en adelante Estudio de la UER sobre Eficiencia Espectral), en el cual define justamente el concepto de eficiencia espectral, así como su medición, la cual llama *Métrica de Eficiencia Espectral* (en adelante MIDEE). El estudio considera aspectos económicos, sociales y regulatorios. La UER investiga el concepto integral de la eficiencia espectral a partir del estado de la técnica y las submétricas que debe contener la MIDEE, a saber, por lo menos: la Métrica de Eficiencia Espectral Técnico Regulatoria (MEET-R), la Métrica de Eficiencia Económica (MEEc) y la Métrica de Calidad (MC). La UER define la MEET-R y la MC con base en parámetros cuantitativos que derivan de la tecnología y las características de infraestructura empleadas por el prestador de servicios de telecomunicaciones y radiodifusión (TyR). Por otro lado, la UER invita a la industria, la academia y la sociedad civil a contribuir en el análisis de las submétricas a incluir en la MIDEE, particularmente en la MEEc, pues ésta debe incorporar, de acuerdo a la UER, cuestiones sociodemográficas e indicadores económicos de las áreas atendidas por un determinado servicio que requieren de un mayor análisis.

Así pues, de acuerdo al análisis realizado por la UER el IFT puede contar con formas de cuantificar y comparar la eficiencia espectral de los diferentes servicios que hacen uso del espectro radioeléctrico, en particular a través de la MIDEE la cual contiene ya las submétricas de MEET-R y MC quedando pendiente el análisis y propuesta para la MEEc.

Este estudio busca contribuir con el análisis de la submétrica que completaría la MIDEE, esto es, con la Métrica de Eficiencia Económica, la MEEc. Esta deberá medir el uso eficiente del espectro concesionado para uso comercial y utilizado para brindar servicios de telecomunicaciones desde la perspectiva económica.

En este sentido, el estudio revisa y analiza las propuestas planteadas en la literatura y la práctica regulatoria para estimar y medir la MEEc, asimismo, tratando de reconciliar la aportación académica con la practicidad regulatoria, propone una MEEc particularmente para los servicios de telecomunicaciones móviles. Lo anterior logra el objetivo para disponer de la información y análisis que permitan diseñar un instrumento normativo para establecer y

---

<sup>5</sup>Disponible en: <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/industria/temasrelevantes/13534/documentos/medicionde la eficiencia espectral scc.pdf>

monitorear obligaciones a los regulados relacionada con el uso eficiente del espectro desde la perspectiva de la MIDEE. Cabe señalar que se encuentran varios criterios propuestos por la academia, pero estos son difícilmente implementables por los reguladores.

El estudio está alineado con la Hoja de Ruta 2021-2025 del IFT y particularmente con el Objetivo 1: Promover el desarrollo, despliegue y uso eficiente de redes e infraestructura que faciliten el desarrollo del ecosistema digital y fomenten la inclusión digital; la Estrategia 1.3 Administrar y aprovechar eficientemente el espectro radioeléctrico, así como supervisar, verificar y vigilar el uso adecuado del mismo; y la LAR 1.3.1: Promover la disponibilidad de espectro radioeléctrico para la provisión de diferentes servicios y aplicaciones de radiocomunicaciones.

Los principales hallazgos y conclusiones se pueden resumir en que la MEEc no es evidente de cuantificar por los múltiples factores que involucra y por la complejidad de los datos que se necesitarían para efectivamente ser calculada de manera precisa.

La sección II resume el análisis de la literatura teórica y regulatoria, así como las propuestas implementadas para aplicación de la MEEc en algunos países. La sección III resume los criterios a considerar para cuantificar una MEEc y la sección IV concluye con algunas recomendaciones para el uso e implementación de la MIDEE por el IFT.

## II. Literatura

---

### II.1 Definiciones básicas

El término "eficiencia" o "eficiencia económica", generalmente empleado en la producción o provisión de un bien o servicio, se usa para relacionar la cantidad que se puede producir o proveer basada en una cierta cantidad de insumos. El diccionario *Random House College*, por ejemplo, define la eficiencia como el "logro o la capacidad de realizar un trabajo con un mínimo gasto de tiempo y esfuerzo", y alternativamente como "la relación entre el trabajo realizado o la energía desarrollada por una máquina, motor, etc., a la energía que se le suministra, generalmente expresada como un porcentaje." Esto se puede expresar genéricamente como:

$$Eficiencia = \frac{Producto}{Insumo}$$

Para usos del espectro, la eficiencia podría expresarse como eficiencia espectral, esto es, el producto podría expresarse en términos de la cantidad (o bits) de información transmitida, y el insumo podría expresarse en términos de la cantidad de espectro (o Hertz) utilizado, o no disponible para otro uso, la infraestructura utilizada y demás insumos requeridos para la provisión de un servicio de telecomunicaciones, radiodifusión, y/o radiocomunicación. A mayor abundamiento, para medir la eficiencia del espectro radioeléctrico el insumo puede ser entendido como el espectro radioeléctrico con el que cuenta la red para su operación y el producto es aquella

información transmitida. Ahora bien, para efectos de la eficiencia espectral en general, y de la MIDEE en particular, no solamente basta con transmitir la información, sino que además ésta debe ser entregada y percibida con los niveles de calidad necesarios para la correcta prestación de un determinado servicio.

Cabe señalar que, de acuerdo con la literatura y práctica internacional, no existe una medición única para la eficiencia espectral. Sin embargo, se reconoce que la eficiencia espectral, contiene diferentes elementos de naturaleza técnica, regulatoria y económica.

Por ejemplo, El Grupo de Trabajo de Regulación del Espectro de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, por las siglas en inglés de *Federal Communications Commission*) de Estados Unidos publicó en 2012 un Reporte donde compara distintas definiciones de eficiencia (espectral, técnica, económica). Explica que mientras la eficiencia espectral ocurre con el mayor rendimiento esto es la transmisión de la mayor cantidad de información con la menor cantidad de espectro; la eficiencia técnica crea el mayor rendimiento con la menor cantidad de inversión en costo de todos los insumos y la eficiencia económica crea el mayor valor para los consumidores con la menor cantidad de costo de todos los insumos.

En su estudio, la UER propone definir la Eficiencia Espectral como:

**Eficiencia Espectral.** - es la capacidad de los sistemas de telecomunicaciones o radiodifusión de transmitir la mayor cantidad de información utilizando una cantidad de espectro radioeléctrico determinada, manteniendo la calidad de las comunicaciones al menos en un nivel mínimo determinado.

Ahora bien, la métrica para cuantificar y evaluar la eficiencia espectral o equivalentemente el uso eficiente del espectro propuesta por la UER, esto es, la MIDEE se define como como el conjunto de submétricas compuestas de consideraciones cualitativa y/o cuantitativas, utilizadas para medir, comparar y dar seguimiento a la eficiencia espectral. Dichas submétricas deben ser al menos: la MEET-R, la MC y la MEEc.

la UER propone de forma general las aproximaciones de dos de las tres submétricas que debe incorporar la MIDEE, la Eficiencia Técnica y la Eficacia de la Calidad, MEET-R y MEC, respectivamente. Estos conceptos tienen que ver con aspectos técnicos específicos como las técnicas de codificación de señales, patrones de radiación de las antenas, del ruido térmico<sup>6</sup> en los sistemas de transmisión, de multiplexaje<sup>7</sup>, entre otros. Por ejemplo, la MEET-R se define como el conjunto de parámetros cuantitativos, los cuales derivan de la tecnología y de las características de infraestructura que emplea el concesionario en su red para prestar el servicio autorizado dentro de su título habilitante y de la calidad con que éste es prestado. De esta manera, la M está a su vez incluida en la MEET-R al

---

<sup>6</sup> Ruido generado por la agitación térmica de los electrones dentro de un conductor. También conocido como ruido blanco o de Johnson.

<sup>7</sup> El multiplexado es una forma de enviar múltiples señales o flujos de información a través de un enlace de comunicaciones al mismo tiempo en forma de una única y compleja señal. El receptor recupera las señales separadas mediante un proceso llamado demultiplexación

ser afectada de forma directa por los aspectos técnicos de la red del concesionario, aunque también podría incorporar aspectos subjetivos de percepción del usuario final, por ejemplo, el audio percibido.<sup>8</sup>

La submétrica que haría falta incorporar en le MIDEE es la de eficiencia económica, la MEEc. Ésta última también debe considerar varios aspectos de índole socio económica como por ejemplo el número de personas a las que se atiende y el valor del servicio que se proporciona. La MEEc puede presentar grandes retos, ya que puede ser difícil comparar los beneficios relativos que brindan los diferentes servicios, por lo que es deseable realizar comparaciones entre proveedores que brindan el mismo tipo de servicio, pues comparar diferentes tipos de servicios sería equivalente a comparar peras con manzanas.<sup>9</sup>

A través del tiempo, las propuestas para medir la eficiencia económica del uso del espectro han incorporado variables adicionales a las de producción e insumos requeridos para la provisión de servicios que utilizan el espectro radioeléctrico a los usuarios, para diseñar fórmulas con mayor precisión, sin embargo, también con mayor grado de complejidad para poder ser estimadas por el regulador.

## II.1 Investigación académica reciente

La literatura académica reciente asocia la eficiencia económica del espectro con la eficiencia de la energía eléctrica necesaria para la provisión de los servicios. Tal es el caso de Akhtman y Hanzo (2009), Aggoune et al. (2016) y Li et al (2018). Estas aportaciones se resumen a continuación y se encuentran a mayor detalle en el Anexo.

Akhtman y Hanzo (2009) analizan un grupo de redes inalámbricas comerciales y exploran las propiedades e implicaciones del balance entre la energía y el ancho de banda. Encuentran que la elección de desempeño óptimo de una red tiene efectos en el desempeño del resto de las redes. Con lo anterior, concluyen que la gestión de recurso escaso, el espectro radioeléctrico, impacta en la eficiencia integral del sistema de redes, esto es, buscar la eficiencia económica del uso del espectro necesariamente implica un balance entre la eficiencia espectral técnico regulatoria (MEET-R) y la eficiencia de energía. Los autores definen eficiencia económica usando el principio de maximización de ingresos menos costos de los servicios provistos, donde la función de costos por segundo es:

$$C = C_p P + C_r = C_p P_{RF} + C_p P_c + C_r$$

---

<sup>8</sup> La UIT-R BS.1387-1 establece un mecanismo de evaluación de diferentes formatos de compresión de audio y los considerandos que deben tomarse en cuenta para la evaluación subjetiva realizada por el usuario final.

<sup>9</sup> En el Estudio de la UER se ilustra cuatro ejemplos de servicios de radiocomunicaciones que no serían comparables, a saber: Comunicaciones por satélite geoestacionario con modulación digital, Comunicaciones satelitales analógicas, Enlaces de microondas punto a punto y Sistemas de radiocomunicaciones móviles.

$C_p$  denotan los costos por joule y  $P$  son los Joules promedio utilizados por la red, mientras que  $C_r$  denota la tasa acumulativa de los costos adicionales que no están relacionados con el consumo de energía, por ejemplo, el hardware, los costos de mantenimiento y el costo del espectro.  $P_{RF}$  y  $P_c$  denotan la energía consumida por el equipo de transmisión  $RF$  y el resto de la energía utilizada en la infraestructura de la red, por ejemplo, los servidores, el equipo de aire acondicionado, el equipo de comunicación para el *backhaul*, etc.

Más recientemente, Li., et al. (2018) también proponen una métrica de la eficiencia económica del uso del espectro haciendo un balance entre la eficiencia técnica espectral (MEET-R) y la eficiencia de la energía utilizada. Es importante señalar que los autores, al igual que la UER en su Estudio de Métrica de Eficiencia Espectral aclaran que las métricas que integran la eficiencia espectral en su integridad se deben componer de varias métricas complementarias, en este caso, de la de eficiencia energética y la de eficiencia espectral técnica regulatoria (MEET-R). Estas se basan en sistemas de comunicación con interferencia mutua causada por la reutilización del recurso (el espectro) cuando se brindan servicios D2D (por las siglas en inglés de *Device to Device*) en el uso de las tecnologías 5G. Los autores proponen como eficiencia económica, MEEc, la ganancia en unidad monetaria por segundo de los sistemas de comunicación, esto es, el ingreso que generan menos el costo de los proveedores por producir los servicios. Esta medida toma en cuenta tanto la capacidad de una red como la energía utilizada en ella, en bits y Joules<sup>10</sup>, respectivamente, convertidos a valor monetario.

Aggoune et al. (2016), proponen una métrica de eficiencia económica del uso del espectro, también incorporando como factores a ponderar, la eficiencia espectral técnico regulatoria (MEET-R) y la eficiencia energética en el segmento específico de redes móviles provistas con tecnología 5G. En este caso, los factores relevantes a incorporar están relacionados con las condiciones técnicas<sup>11</sup> de los canales, la correlación de las antenas (señales con ruidos o señales débiles con espectros parecidos a los espectros del ruido) y la contaminación de la energía<sup>12</sup>. Los autores encuentran que con una sola antena por usuario se alcanza la mayor eficiencia energética pues reduce la interferencia entre canales. Por su parte, la eficiencia espectral técnico regulatoria se reduce conforme aumenta la duración de las pruebas (del balance óptimo entre la MEET-R y la eficiencia energética) para un determinado canal, lo que finalmente demuestra poder transmitir menos información en un tiempo limitado. Al igual que Akhtman et. al (2009) y Li., et al. (2018) los autores encuentran que, la estimación de la eficiencia económica del uso del espectro es interdependiente del balance entre la eficiencia espectral técnico regulatoria y la energética.

Ahora bien, en un contexto pragmático de mercado, los prestadores de servicios de telecomunicaciones y/o radiodifusión, como cualquier otro oferente de bienes o servicios, diseñan sus planes de negocio a corto, mediano

---

<sup>10</sup> El **julio** o **joule** es la unidad derivada del Sistema Internacional utilizada para medir energía, trabajo y calor. Como unidad de trabajo, el julio se define como la cantidad de trabajo realizado por una fuerza constante de un newton en un metro de longitud en la misma dirección de la fuerza. Por ejemplo 1 kWh (kilovatio-hora) = 3,6·10<sup>6</sup> J = 3,6 MJ.

<sup>11</sup> Por ejemplo, para el acceso a la multiprogramación, los “Lineamientos Generales para el Acceso a la Multiprogramación” se refieren a la transmisión de señales como son el formato de compresión y las tasas de transferencia para contenido en alta definición y en definición estándar.

<sup>12</sup> Se entiende como contaminación electromagnética, también conocida como electrosmog, a la presencia de diversas formas de energía electromagnética en el ambiente, que por su magnitud y tiempo de exposición pueden producir riesgo, daño o molestia a las personas, ecosistemas o bienes en determinadas circunstancias.

y largo plazo lo que implica, en principio, una intensidad de uso variante del espectro de acuerdo con la etapa de maduración del negocio, del despliegue de infraestructura, de cambios o actualizaciones tecnológicos, etc. En este mismo sentido, los concesionarios de servicios de telecomunicación y radiodifusión generalmente despliegan sus redes en una porción del área total de cobertura que tienen asignada, pues en ella se encuentra la masa crítica de usuarios que permiten que el negocio genere rentabilidad. Lo anterior implica que al tiempo que se realiza la prueba, pueden existir otros concesionarios que se encuentran en una etapa más madura del negocio brindando servicios por ejemplo en regiones del área de cobertura menos atractivas económicamente y que implican por tanto menor rentabilidad donde probablemente el espectro y la infraestructura desplegada se usa con menor intensidad. Por lo anterior, es importante que al implementar una MIDEE y sus correspondientes MEET-R, MC y MEEc se haga en un universo con elementos lo más homogéneos posible, esto es no únicamente en cuánto al servicio y cobertura, sino también considerando la etapa de madurez del negocio del prestador de servicios.

## II.2 Práctica Regulatoria

Algunas de las definiciones que se han propuesto para medir el uso eficiente del espectro eléctrico por autoridades encargadas de la gestión del recurso escaso se pueden resumir en los siguientes numerales.

- 1) En la Recomendación SM.1046-1 la UIT-R<sup>13</sup> (1994-1997) se menciona que “La utilización eficaz del espectro se logra, entre otros métodos, mediante el aislamiento obtenido gracias al direccionamiento de la antena, la separación geográfica de los equipos transmisores y receptores, la compartición de frecuencias o la utilización de frecuencias ortogonales y la compartición en el tiempo o división en el tiempo, reflejándose estas consideraciones en la definición de utilización del espectro. Por consiguiente, la medida de utilización del espectro es el factor de utilización del espectro,  $U$ , que se define como el producto de la anchura de banda de frecuencia por el espacio geométrico (geográfico) y por el tiempo denegado a otros usuarios potenciales:

$$U = B * S * T$$

En donde:

B: anchura de banda de frecuencia

S: espacio geométrico (normalmente una superficie)

T: tiempo.

Este factor de utilización de espectro es usado así para medir la Eficacia de Utilización de Espectro (EUE) o simplemente eficacia del espectro en un sistema de radiocomunicaciones, expresada así:

---

<sup>13</sup> [SM.1046-1 - Definición de la eficacia en la utilización del espectro por un sistema de radiocomunicaciones \(itu.int\)](http://itu.int)

$$EUE = \frac{M}{U} = \frac{M \text{ (se refiere a la cantidad de información transferida en cierta distancia)}^{14}}{B * S * T}$$

Para comparar las eficacias espectrales de dos tipos similares de sistemas de radiocomunicaciones que proveen el mismo servicio, la Recomendación dice que se puede calcular la Eficacia relativa de utilización de espectro (ERE), definida matemáticamente como una relación o el cociente de dos EUE, en donde el divisor es el criterio de comparación (o sistema patrón: que puede ser el más eficaz teóricamente, el más claro o el más usado). De acuerdo con IFT (2018)<sup>15</sup> dicha Recomendación recoge los conceptos claves de literatura publicada previamente en el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, por sus siglas en inglés).<sup>16</sup>

En una versión más reciente, la Recomendación SM.1046-3 de la UIT-R (2017) señala los riesgos de usar la comparación de eficacias relativas en sistemas de comunicación diferentes, pues se tendrían valores muy distintos y por ende no comparables, por lo que tampoco sería útil llevar a cabo la comparación, es por ello por lo que, la comparación de la eficacia o del uso del espectro debe ser únicamente entre sistemas similares y que proporcionen servicios idénticos.

Es de destacarse que la UIT-R (2017) en su recomendación 1046-3 señala que a pesar de que el EUE es importante, no debe ser el único factor que se considere, así que deben incluirse por ejemplo la elección de un sistema o de una tecnología y de sus viabilidades, los costos, la disponibilidad y/o compatibilidad de equipos, las técnicas existentes y las características de explotación. En resumen, la UIT-R no propone una métrica integral para el uso eficiente del espectro que incorpore el costo beneficio para los proveedores de los servicios y los usuarios finales, esto es, una MEEc.

- 2) A principios de la década del 2000 la SPTF (por las siglas en inglés de *Spectrum Policy Task Force*) de los Estados Unidos propuso medir el uso eficiente del espectro con las siguientes definiciones. Por un lado, a través de la eficiencia espectral, esto es, cuando la máxima cantidad de información (producto) es transmitida con una cantidad fija de espectro (insumo) o equivalentemente, cuando la mínima cantidad de espectro es usado para transmitir una cantidad fija de información:

$$\text{Eficiencia espectral} = \frac{\text{Información transmitida}}{\text{Espectro utilizado}}$$

Donde el Espectro utilizado a su vez se refiere a la siguiente operación:

<sup>14</sup> Posteriormente, en 2017 en la Recomendación de la UIT-R SM.1046-3 sobre la Definición de la eficacia en la utilización del espectro por un sistema de radiocomunicaciones, M se define como el efecto útil que se consigue con el sistema de telecomunicaciones considerado.

<sup>15</sup> <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/industria/temasrelevantes/13534/documentos/mediciondelaeficienciaespectralsc.pdf>

<sup>16</sup> A saber: Berry, L. A. (1976) "Output Oriented Measures of Spectrum Efficiency", IEEE, 1976 International Symposium in Electromagnetic Compatibility, Estados Unidos, pp. 1-3. Y Heeralall, S. (1992) "Discussion of spectrum efficiency and the factors that affect it", 1992 IEEE International Conference in Selected Topics in Wireless Communications, Canadá, pp. 413-416.

*Espectro utilizado*

$$= \text{Ancho de banda utilizado} * \text{Espacio geográfico de impacto} \\ * \text{Tiempo no utilizado por otros usuarios}$$

La SPTF reconoce que la ecuación no contiene todas las variables relevantes, por ejemplo, el número de usuarios que han sido atendidos con el espectro utilizado. De la misma manera, reconoce que es complejo medir la información del cociente de la ecuación por lo que concluye que en realidad la eficiencia espectral difícilmente se puede medir con precisión.<sup>17,18</sup>

Por otro lado, a través de la eficiencia técnica del espectro se puede medir en función de la diferencia de la eficiencia económica. La SPTF define la eficiencia económica del uso del espectro cuando el costo de todos los insumos utilizados genera el producto máximo (en este caso, la transmisión máxima de información), por ejemplo, además del espectro utilizado, el equipo técnico, capital, fuerza laboral, etc. Esto es:

*Eficiencia técnica del espectro*

$$= \frac{\text{Información transmitida}}{\text{Costo de todos los insumos necesarios para transmitir la información}}$$

Mientras que la eficiencia espectral considera únicamente el espectro utilizado, la eficiencia técnica del espectro considera el costo de todos los insumos utilizados. De esta manera, la eficiencia económica del uso de espectro ocurre cuando todos los insumos utilizados generan el mayor valor para los usuarios. El valor para los usuarios se refiere al valor que otorga el consumidos a la información transmitida ya sea a través de un dispositivo móvil, de un equipo computacional o de una conexión a internet, por ejemplo:

$$\text{Eficiencia económica del espectro} = \frac{\text{Valor del producto}}{\text{Costo de todos los insumos}}$$

LA FCC establece que la diferencia entre la eficiencia económica y técnica del espectro radica en que la primera provee el producto máximo minimizando los costos de la segunda, la segunda es simplemente la relación entre el producto provisto y el costo de los insumos para hacerlo. Una interpretación alternativa de la eficiencia económica del espectro consiste en obtener el valor máximo que los usuarios brindan por el producto al menor costo de producción posible. Asimismo, al igual que en la literatura económica más reciente, la FCC afirma que tanto la eficiencia espectral (técnico-regulatoria) debe ser considerada al tiempo que la eficiencia económica, es decir, son valores interdependientes.

<sup>17</sup> FCC Report of the Spectrum Efficiency Working Group, 2002.

<sup>18</sup> Existen numerosos estudios que se enfocan en métricas de eficiencia espectral y eficiencia técnica del espectro, entre ellos

- 3) En noviembre 2004 Ofcom (por las siglas en inglés de *Office of Communications*) en el Reino Unido, emitió a consulta pública su programa de gestión del espectro<sup>19</sup> en el que reconoce que medir el uso eficiente del espectro no es evidente. Entre las varias razones que enlista se encuentran las siguientes:
- Existen momentos en los que no se utiliza.
  - En ocasiones las señales no llegan al usuario receptor que es donde, en su caso, se debería medir la eficiencia de la señal. Lo anterior debido a que pueden existir construcciones u obstáculos que bloqueen la señal y por ende la recepción de esta.
  - Cuando está reservado para usos particulares y críticos que no se encuentran transmitiendo continuamente, por ejemplo, en el caso de usos militares o servicios de emergencia.
  - La frecuencia medida se dejó como banda de guardia, ya sea entre dos frecuencias o entre el uso de la frecuencia en cuestión y sus celdas cercanas, en cuyos casos se producirían interferencias entre otros usuarios existentes.
  - Las señales no son fáciles de detectar, por ejemplo, en casos de multiplexación, las señales son transmitidas cerca del ruido máximo y pueden ser difíciles de detectar en el receptor.

Aún reconociendo los potenciales obstáculos para medir el uso eficiente del espectro, sin necesariamente explicar de qué naturaleza, es decir, técnico regulatorio, de calidad, de energía o económico, Ofcom comisionó un estudio del uso eficiente del espectro en bandas inferiores a 1 GHz, donde aparentemente existía poco uso del espectro. El ejercicio lo realizó Scenerioflex, una consultora especialista en software, quien con determinados parámetros midió la intensidad de la señal en varios lugares de Inglaterra durante 24 horas, para encontrar en donde había un uso más eficiente del espectro, lo que la consultora interpreta como un uso más intensivo. Los resultados son intuitivos, las grandes ciudades de población densa como Londres muestran un uso más intensivo del espectro que las localidades rurales; las bandas GSM de bajada están más ocupadas que las de subida, aunque para cada transmisión de bajada existe su par de subida.

- 4) Por otro lado, en términos comparativos: de acuerdo con el Handbook<sup>20</sup> de la UIT (2011), un sistema de radiocomunicación es más eficiente que otro si transmite la información deseada utilizando menos recursos del espectro. En este sentido, explica la UIT, la eficiencia del espectro también se ve afectada por la asignación de bandas de frecuencia; por el desarrollo de los planes de canalización o atribución de frecuencias a sistemas específicos; e implica el uso alternativo de ciertas bandas mientras otras bandas con características físicas similares están congestionadas. Para lo anterior se requieren medidas de monitoreo de ocupación y uso del espectro.
- 5) El Grupo de Trabajo de Regulación del Espectro de FCC publicó en 2012 un reporte donde compara distintas definiciones de eficiencia (espectral, técnica, económica). Explica que mientras la eficiencia espectral ocurre con el mayor rendimiento esto es la transmisión de la mayor cantidad de información con la menor cantidad de espectro; la eficiencia técnica crea el mayor rendimiento con la menor cantidad

---

<sup>19</sup> Spectrum Framework Review, A Consultation on Ofcom's views as to how radio spectrum should be managed. Disponible en: [https://www.ofcom.org.uk/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0014/25403/sfr.pdf](https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0014/25403/sfr.pdf)

<sup>20</sup> [https://www.infodev.org/infodev-files/resource/InfodevDocuments\\_1057.pdf](https://www.infodev.org/infodev-files/resource/InfodevDocuments_1057.pdf)

de inversión en costo de todos los insumos y la eficiencia económica crea el mayor valor para los consumidores con la menor cantidad de costo de todos los insumos.

De esta manera, la FCC reconoce que la eficiencia espectral y técnica se incorporan y se convierten en un componente de la eficiencia económica; toda vez que mientras haya cambios tecnológicos que reduzcan el precio de los servicios espectrales o sean técnicamente más eficientes, lo que podría consecuentemente cambiar el cálculo de lo que es económicamente eficiente y a su vez conducir a un marco político en el que también se sopesen otras consideraciones que pudieran o no impactar en la eficiencia económica.

- 6) En 2012 a su vez, la Comisión Europea (CE) solicitó un reporte exploratorio que determina qué datos son útiles para medir la eficiencia del espectro, así como los que están razonablemente disponibles; y experimenta con distintas medidas y formas de organizar, analizar y presentar los datos<sup>21</sup>. A pesar de que se reconocen los tipos distintos de eficiencias (técnicas, sociales y económicas) señalan que ninguna métrica puede capturar completamente la eficiencia en ninguna de las 3 dimensiones; sino que sólo pueden ayudar colectivamente a identificar aspectos o candidatos para mejorar. Por lo que también señala la necesidad de distinguir la eficiencia de una banda o aplicación y el costo de una intervención de política que tenga por objeto modificar la manera en que dicha aplicación usa el espectro (aunque la intervención de política suele cambiar el modo de implementación de la aplicación no le resta totalmente el valor a la aplicación). Deduce que, por lo anterior, la eficacia del uso del espectro debe evaluarse por sus propios méritos y el análisis no debe confundir la ineficiencia con los costos y beneficios potenciales de las posibles soluciones. El reporte mide la eficiencia técnica de acuerdo con cuatro criterios: 1) Utilización: ¿cuánto del recurso del espectro se está utilizando actualmente y durante cuánto tiempo? 2) Tendencia de la demanda: ¿la demanda está creciendo, está estable o está disminuyendo? 3) Tecnología: comparar la eficiencia relativa del espectro de la tecnología utilizada en la banda con el punto de referencia relevante del estado de la técnica. Y, 4) la extensión geográfica: ¿cuál es la cobertura o extensión del territorio nacional donde se utiliza el recurso de espectro.

De igual manera, el estudio realizado para la CE por WIK-Consult, apoyado por Aegis Systems/Plum Consulting e IDATE se produjo un inventario del espectro (400MHz-6GHz) que la CE debía administrar dentro de su programa de política de espectro radioeléctrico, encontró que era difícil medir la eficiencia económica o social del uso del espectro porque algunos servicios o aplicaciones pueden tener una baja eficiencia técnica pero un muy alto valor social, que además es difícil de cuantificar. Un ejemplo de los anterior se presenta en el caso del servicio de auxilio en situaciones de desastres. Por otra parte, se encontró que era más sencillo recopilar datos sobre eficiencia técnica. Sin embargo, el estudio reconoce que aún no se recolectaban muchos datos sobre el uso de bandas para propósitos específicos y que los datos disponibles eran de resultados de subastas o evaluaciones de impacto públicas que no permiten necesariamente estimar un uso eficiente del espectro sino únicamente el valor privado que se le otorga al momento de la subasta.

---

<sup>21</sup> [https://www.wik.org/uploads/media/Inventory\\_and\\_review\\_of\\_spectrum\\_use.pdf](https://www.wik.org/uploads/media/Inventory_and_review_of_spectrum_use.pdf)

- 7) El IFT a través de la UER ha definido la eficiencia espectral como “la capacidad de los de los sistemas de telecomunicaciones o radiodifusión de transmitir la mayor cantidad de información utilizando una cantidad de espectro radioeléctrico determinada, manteniendo la calidad de las comunicaciones al menos en un nivel mínimo determinado”.<sup>22</sup> En donde dicha capacidad depende de las características regulatorias, tecnológicas y del entorno socioeconómico que tiene que ver con el servicio en cuestión. La Métrica Integral de Eficiencia Espectral (MIDEE) se conforma por al menos tres submétricas que contienen elementos cualitativos y/o cuantitativos para comparar la eficiencia espectral, a saber: Métrica de Calidad (MC), Métrica de Eficiencia Espectral Técnico-Regulatoria (MEET-R)<sup>23</sup> y Métrica de Eficiencia Económica (MEEc). Para esta última, la UER sugiere incluir indicadores económicos o sociodemográficos de áreas servidas por cierto servicio y considerando la cantidad de proveedores del mismo tipo de servicio dentro del área referida.

Lo anteriormente descrito permite concluir que el análisis de eficiencia debe reflejar las estructuras de asignación de espectro (una banda puede admitir muchas aplicaciones y una aplicación puede abarcar varias bandas); por lo que una métrica debe entenderse en el contexto de la aplicación para la que fue diseñada (es decir que será relevante y útil para cierta aplicación, pero no necesariamente para una aplicación diferente).

### III. Consideraciones y propuesta de MEEc para el caso de México

---

La revisión de la literatura académica y la práctica internacional nos proporcionan diversos elementos para poder reflexionar en una métrica de eficiencia económica del uso de espectro. Por un lado, la literatura económica, más reciente que la documentación regulatoria, invita a considerar factores no solamente de la capacidad de transmisión de una red de telecomunicaciones sino también de la energía eléctrica que esta requiere. Sin embargo, las fórmulas propuestas para la medición de la eficiencia espectral, ya sea en su totalidad o parcialmente, esto es, para la MEET-R y la MEEc se revela compleja para ser realmente implementada, no solamente por la complejidad de los modelos de estimación sino también por las variables que involucra y por lo tanto en los requerimientos de información disponible para poder estimar o cuantificar dichas fórmulas. Por otro lado, de la experiencia internacional, documentada previamente a la literatura académica revisada, se desprende que se han propuesto varias fórmulas o métricas para cuantificar el uso eficiente del espectro desde el punto de

---

<sup>22</sup> Medición de la eficiencia espectral, Definiciones y consideraciones a observar para su aplicación en México, 2018. Disponible en <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/industria/temasrelevantes/13534/documentos/mediciondeleficienciaespectral1scc.pdf>

<sup>23</sup> La MEETR está definida como el “conjunto de parámetros cuantitativos, los cuales derivan de la tecnología y de las características de infraestructura que emplea el concesionario en su red para prestar el servicio autorizado dentro de su título habilitante y de la calidad con que éste es prestado; dichos parámetros deberán estar acorde al marco regulatorio que rige al servicio”; así los aspectos técnicos impactan directamente la MC, pero también puede ser la percepción del usuario siempre que se cuente con la metodología para medirla.

vista económica. Sin embargo, en general, también concluye que las fórmulas son un tanto complejas de estimar con datos reales.

El objetivo de este estudio es contribuir con el elemento económico de la MIDEE (Métrica Integral de Eficiencia Espectral) propuesta por la UER para medir el uso eficiente del espectro concesionado para uso comercial y utilizado para brindar servicios de telecomunicaciones y por lo tanto ofrecer una propuesta de uno o varios criterios para obtener la cuantificación y la metodología de medición del uso del espectro desde la perspectiva de eficiencia económica.

En esta sección, resultado del análisis de la revisión, se sugieren listan los elementos que pudieran considerarse como relevantes para estimar una MEEc, se propone una fórmula simplificada y adaptada que trata de extraer la robustez que ofrece la literatura económica y la practicidad que requiere el regulador del espectro para poder ser implementada. Se ofrecen también una serie de recomendaciones para el IFT y en particular para la UER y la MIDEE que pudieran adaptarse al caso que nos ocupa, esto es, la medición del uso eficiente del espectro desde la perspectiva económica a los concesionarios de espectro en el país.

En esto momento vale la pena señalar que la propuesta se enfoca en los servicios brindados por tecnologías inalámbricas móviles, es decir, por el momento, no se consideran las tecnologías que ofrecen servicios fijos ni las bandas que son reservadas para el servicio del estado tales como las de seguridad nacional, emergencias y otras que no requieren de una concesión de uso comercial para brindar sus servicios.

Desde un punto de vista económico, el insumo más importante para la provisión de los servicios de telecomunicaciones móviles es el financiero<sup>24</sup>, esto es, la capacidad de gasto e inversión que tienen los concesionarios del espectro para efectivamente transmitir la información requerida por los usuarios, la cual, evidentemente enfrenta restricciones de acuerdo con la capacidad de financiamiento de cada proveedor de servicios.

Este estudio ofrece una propuesta de MEEc para ser implementada en los servicios que ofrecen los concesionarios de espectro con bandas asignadas a los servicios de telecomunicaciones móviles, particularmente para las llamadas tecnologías RAT (por las siglas en inglés de *Radio Access Technology*) que consisten en la conexión física de una red con radio bases. Sobre las RAT, vale la pena agregar que la mayoría de los dispositivos móviles pueden adoptar varias RAT en su sistema operativo, por ejemplo, Bluetooth, W-Fi, GSM, UMTS, LTE y 5G y por esto último también se les denomina redes inalámbricas heterogéneas<sup>25</sup>.

---

<sup>24</sup> GSMA, The impact of spectrum prices on consumers, 2009.

<sup>25</sup> Aijaz et al. (2016), Management architecture for aggregation of heterogeneous systems and spectrum bands, IEEE Communications Magazine.

En esta propuesta, el concepto de eficiencia económica y su métrica, la MEEc, se define como el máximo beneficio obtenido por los usuarios, representado por el valor que otorgan al servicio recibido, provisto con el menor costo posible de los concesionarios, representado a su vez por el valor presente del costo total de utilización del espectro en las bandas arriba mencionadas.

Así, para un operador  $i$ , con tecnología  $j$ , en una zona geográfica  $g$ , en un lapso determinado  $t$  (el cual puede ser hora, día, mes, u otro intervalo de tiempo), la MEEc puede ser representada como:

$$(1) \text{MEEc}_{ijgt} = \frac{\text{Valor que otorgan los usuarios a la recepción de servicios provistos por } i, \text{ con } j, \text{ en } g, \text{ durante } t}{\text{Costos de } i \text{ por proveer } jgt}$$

Como mencionado anteriormente el valor que los usuarios otorgan al servicio  $j$ , del proveedor  $i$ , en la zona geográfica  $g$ , durante el tiempo  $t$ , es equivalente a su disposición a pagar por el servicio. Suponiendo que el usuario efectivamente refleja su disposición a pagar por el servicio de telecomunicación móvil con la tecnología  $j$ , provista por el operador  $i$ , en la zona geográfica  $g$ , durante el tiempo  $t$ , se refleja en lo que efectivamente paga, entonces dicho valor es equivalente a los ingresos recibidos por el operador. Mientras los precios e ingresos del operador pudieran ser directamente observados de las estadísticas recopiladas por el IFT u otras fuentes de información como el INEGI y sus encuestas, y los ingresos pudieran ser observados de los reportes que los prestadores de servicios de telecomunicaciones móviles reportan en sus estados de cuenta. En principio, los costos en los que incurre el operador  $i$  para prestar el servicio con  $j$  durante  $t$ , podrían deducirse también de la información financiera publicada por el operador; sin embargo, probablemente no al nivel de desagregación  $g$ . Aún más, reconociendo el conocido problema de información asimétrica entre el sector privado (en este caso, de los operadores de telecomunicaciones móviles) y el regulador, así como el incentivo que tendría el operador para inflar los costos reales de provisión del servicios, probablemente no sea muy conveniente utilizar los costos (entre ellos, los de inversión y operación) que reportan los operadores en sus estados de cuenta.

Tomando en cuenta lo anterior, los costos reales, o  $\text{Costos}_{ijgt}$  de la fórmula podrían sustituirse por los costos estimados en el modelo de costos evitables (o *avoidable costs* en inglés) diseñado por Plum para el IFT en su estudio de “Valuing spectrum in Mexico” de julio 2015. Los costos evitables se refieren a los costos que los operadores necesitarían invertir en sus redes para satisfacer la demanda de los servicios de telecomunicaciones móviles en el caso en el que no exista espectro adicional para estos, con el objetivo de determinar el valor que los operadores otorgan al espectro. Como cualquier modelo estadístico y econométrico, el modelo de costos evitables cuenta con ventajas y desventajas, particularmente con la disponibilidad de la información necesaria para estimarlo. Si embargo, Plum estimó varios modelos alternativos para calcular el valor del espectro el caso de México)<sup>26</sup>, resultando el de costos evitables el más robusto. Las ventajas de dicho modelo es que, en principio, refleja los planes de diseño de red de los operadores móviles cuando adquieren el espectro y provee un resultado conservador, esto es, más cerca del precio de reserva del espectro otorgado que del guante que pudiera ganar el

<sup>26</sup> Entre ellos: comparativo internacional; comparativo internacional ajustado; modelos econométricos con variables socioeconómicas, topológicas y de subastas de espectro específicas; modelos de negocios con información contable, modelos de costo de oportunidad, etc.

espectro en caso de licitarse. Las desventajas del modelo de estimación de costos de Plum son, por un lado, que requiere de información que puede ser sensible comercialmente para el operador y puede variar conforme varían los costos de los insumos y de la red necesarios para proveer los servicios de telecomunicaciones. Sin embargo, este estudio lo propone como alternativa para el denominador de la fórmula (1) de la MEEc pues el IFT cuenta con la información necesaria en virtud de que fue recabada para el estudio de Plum 2015. Evidentemente dicha información tendría que ser actualizada, sin embargo, es importante contar con el *know how* y la experiencia de la metodología. En este sentido, la fórmula (1) para la MEEc podría estimarse de la siguiente manera:

$$(2) \text{ MEEc}_{ijgt} = \frac{\text{Ingresos}_{ijgt}}{\text{Costos evitables de } i \text{ por proveer}_{jgt}}$$

Alternativamente, y siguiendo la literatura más reciente sobre la propuesta para estimar el uso eficiente del espectro desde el punto de vista económico, se podría emplear la fórmula de Akhtman y Hanzo (2009) para la estimación de los costos por brindar el servicio  $i$ , con la tecnología  $j$ , en la zona geográfica  $g$ , durante el plazo  $t$  ( $C_{ijgt}$ ). Esto es:

$$C_{ijgt} = C_{pijgt}P + C_{ri}$$

Donde  $C_p$  denotan los costos por joule,  $P$  son los Joules promedio utilizados por la red del operador  $i$ , por brindar el servicio de telecomunicación móvil con tecnología  $j$ , en la zona geográfica  $g$ , durante  $t$ ; mientras que  $C_r$  denota la tasa acumulativa de los costos adicionales que no están relacionados con el consumo de energía, por ejemplo, el hardware, los costos de mantenimiento y el costo del espectro del concesionario  $i$ . Por lo tanto, la MEEc alternativa sería:

$$(3) \text{ MEEc}_{ijgt} = \frac{\text{Ingresos}_{ijgt}}{C_{ijgt}}$$

Cabe señalar que los supuestos detrás de la sencilla fórmula propuesta para analizar el uso eficiente del espectro desde el punto de vista económico, esto es, del concesionario  $i$ , por brindar el servicio de telecomunicación móvil con tecnología  $j$ , en la zona geográfica  $g$ , durante el periodo  $t$ , la  $\text{MEEc}_{ijgt}$ , son los siguientes:

1. Los concesionarios minimizan los costos financieros necesarios para brindar el servicio de telecomunicación móvil, es decir los montos de inversión necesarios para cubrir el costo de la energía, del espectro, del despliegue de infraestructura y de mantenimiento de las redes, así como cualquier otro costo necesario para prestar los servicios de telecomunicaciones móviles.
2. El Estado y/o el regulador y encargado de la gestión del espectro, ha, previamente, asignado dicho espectro a través de mecanismos que han asegurado la eficiente asignación a través de una acertada planeación del uso de las bandas y posteriormente con subastas competitivas o instrumentos equivalentes.

3. Es posible agregar tanto el número de usuarios en cada banda y desagregar por operador para poder obtener la totalidad de los usuarios en la zona geográfica  $g$ , en determinado tiempo  $t$  durante el cual se brindan los servicios.
4. El valor que el usuario otorga el valor del servicio que recibe es un reflejo de su disposición a pagar por el mismo y por lo tanto es directa y linealmente proporcional al ingreso que recibe el operador. A su vez, dicho ingreso es estrictamente proporcional a la cantidad de frecuencias de espectro utilizadas para brindar el servicio al usuario final, lo que se revela ya sea en la estimación de costos evitables y/o en los costos financieros listados en el numeral 1.

La propuesta de MEEc que ofrece este estudio para complementar la MIDEe propuesta por la UER del IFT es una de las posibles alternativas para medir y analizar el uso eficiente del espectro asignado para uso comercial y particularmente para los servicios de telecomunicación móvil. La sencilla relación entre el valor del espectro que otorga el usuario al servicio y el costo del espectro que el concesionario invierte para brindar los servicios, arroja un indicador que se debe interpretar cautelosamente, pues una tasa alta o baja, no necesariamente indica un mejor uso del espectro, el análisis debe ser comparativo entre concesionarios e idealmente realizado de manera continua para mitigar picos o bajas de ingresos y gastos tanto de los usuarios como de los operadores. Es decir, es necesario ajustar variables de control que permitan identificar la MEEc sin que sea influenciada por factores externos. Aun así, se considera que dentro de las ventajas de la propuesta de MEEc se encuentran las siguientes posibilidades:

- ✓ Llevar a cabo un análisis económico comparativo entre diferentes operadores por un cierto periodo de tiempo y su evolución.
- ✓ Llevar a cabo un análisis económico comparativo para varios rangos de frecuencias en diferentes periodos de tiempo y en diferentes regiones del o zonas geográficas del país.
- ✓ Estimar el incremento en la eficiencia por el uso del espectro desde el punto de vista económico cuando se concesionan nuevas frecuencias para prestar los servicios (a través de una estimación de los ingresos esperados y de la estimación de los costos evitables).

Ahora bien, es necesario analizar con mayor precisión la interdependencia y por tanto la incorporación de la MEEc propuesta en este estudio con la MIDEe propuesta por la UER. De particular importancia es la disponibilidad de la información necesaria para poder estimar tanto la MEEc como la MIDEe. Asimismo, es necesario estudiar a mayor abundamiento la dimensión de las unidades de observación que se pueden obtener para estimar la MEEc, por ejemplo, el número de usuarios utilizando la tecnología  $j$  a través del concesionario  $i$ , en la zona geográfica  $g$  durante el periodo de tiempo  $t$ . Otro reto es “controlar” o incorporar de alguna manera los cambios de precios, ya que tienen un impacto en los ingresos. Esto es, *ceteris paribus*, un operador que abarate el servicio reportará un menor valor de MEEc. Esto se puede resolver, posiblemente, utilizando precios relativos o utilizando precios hedónicos, calcular diferencias con precios anteriores, entre otras alternativas.

## IV. Conclusiones y recomendaciones para el caso de México

---

El espectro radioeléctrico es un recurso limitado, esencial para la provisión de servicios de TyR. Su asignación y uso tiene importantes efectos en los ámbitos económico y social. Por lo anterior, es importante contar con herramientas que permitan realizar medidas del uso eficiente del espectro, desde el punto de vista económico. Algunas agencias regulatorias del espectro han intentado implementar algunas métricas, no necesariamente coinciden entre ellas, pero contienen algunos elementos en común, por ejemplo, el servicio brindado, el tiempo, la cobertura y la banda de frecuencia utilizada.

Para que una métrica del uso eficiente del espectro desde un punto de vista económico sea útil para el regulador (y para los prestadores de servicios), debe ser comparable, esto es, implementada entre servicios y tecnologías relativamente homogéneas, pues justamente es la comparación la que arrojará quién o quiénes realizan mejor uso del espectro y quién o quiénes se benefician de ello. Es por lo anterior importante acotar el análisis comparativo al conjunto de prestadores de un mismo servicio, con una misma tecnología o en una misma (o sustancialmente similar) banda de frecuencias, en una misma zona geográfica, en un determinado periodo de tiempo.

La UIT<sup>27</sup> (2020) ha destacado que la eficiencia está determinada por la cantidad de información que se puede transmitir en un rango de frecuencia dado; y que, si bien medir el uso del espectro es un proceso relativamente sencillo, el evaluar la eficiencia del uso no lo es.

Este estudio propone una métrica de eficiencia económica (MEEc) que podría complementar la MIDEE (Métrica Integral de Eficiencia Espectral) propuesta por Unidad de Espectro Radioeléctrico del IFT. La MIDEE, de acuerdo a la UER, debe estar compuesta por lo menos por tres submétricas: la Métrica de Eficiencia Espectral Técnico Regulatoria (MEET-R), la MEEc y la Métrica de Calidad (MC).

Ahora bien, tanto la literatura académica revisada como la práctica regulatoria reconocen que para poder diseñar una MEEc es necesario considerar los factores que afectan la MEET-R y la eficiencia energética, pues la energía es un insumo fundamental en la provisión de servicios de telecomunicaciones a través del espectro radioeléctrico. El hecho de que algunos servicios brindados con diferentes tecnologías tengan un alto nivel de eficiencia espectral técnico regulatoria o de eficiencia de energía, no necesariamente significa que tenga que un alto nivel de eficiencia económica, pues probablemente el costo de brindarlos es muy elevado comparado con el valor que brinda a los usuarios (FCC 2002, IFT 2018).

---

<sup>27</sup> <https://digitalregulation.org/elements-of-spectrum-management-for-upcoming-technologies/>

Adicionalmente, como bien lo reconoce las autoridades responsables de la gestión del espectro, mientras su objetivo es promover el acceso y uso eficiente del recurso escaso, otras consideraciones de política pública pueden obstaculizar la máxima eficiencia económica del uso del espectro. Por ejemplo, la propia asignación del recurso para determinados servicios o tecnologías a través de licitaciones con topes de espectro que se pueden asignar por operador o consorcio, pues, en ocasiones se busca cuidar la concentración de mercado con dichos topes, lo que no considera que un operador histórico podría estimar un mayor valor de mercado sin dicho tope de asignación. Sin embargo, el propio modelo de licitación y la valoración que el potencial concesionario calcula y apuesta por la obtención del recurso, en principio, revela el valor máximo de mercado que se puede obtener con dicho espectro.

En la EU se definió que, dado que algunos operadores utilizan una banda específica o más de una banda, se requiere realizar una valuación relativa de los beneficios económicos de los diferentes servicios. En este sentido, el valor promedio de un servicio que usa más de una banda de frecuencia no es indicativo, lo que se debe medir es el valor incremental de la prestación del servicio en cuestión.

El IFT en 2015 comisionó un estudio que dio como resultado una metodología para estimar el valor del espectro a través del concepto de costos evitables, que tiene que ver con los costos que los operadores necesitarían invertir en sus redes para satisfacer la demanda de los servicios de telecomunicaciones móviles en el caso en el que no exista espectro adicional para estos, concepto equiparable a los costos incrementales.

Por otro lado, la literatura académica demuestra que para estimar tanto la eficiencia espectral técnico regulatoria como la eficiencia económica del uso del espectro, es fundamental incorporar en los costos de provisión de los servicios de telecomunicaciones también la energía eléctrica que se utiliza para ello.

En este sentido, este estudio propone una métrica para la MEEc que reconcilia la propuesta de la literatura académica con la practicidad de la práctica regulatoria, eso es, una métrica del uso eficiente del espectro en la que se considera tanto el valor que otorgan los usuarios por los servicios de telecomunicaciones recibidos (reflejados en su disposición a pagar y por tanto en el ingreso de los operadores) como los costos de la prestación de los servicios, incluyendo los que debe considerar la eficiencia espectral técnico regulatoria.

La propuesta de MEEc ofrecida en este estudio se considera viable para el caso de México en razón de que se cuenta con información tanto de ingresos de operadores de telecomunicaciones móviles, se conoce la banda de frecuencias que utilizan para los mismos, la tecnología implementada, las zonas de prestación de servicio y a su vez se cuenta con un modelo de estimación de costos evitables que pueden reflejar con un grado de precisión aceptable la relación ingresos/costos para obtener un estimado de la MEEc.

Se reconoce que se debe estudiar a mayor abundamiento la factibilidad tanto de la estimación de la MEEc propuesta como su integración en la MIDEE particularmente debido a la disponibilidad y granularidad de los datos necesarios para la estimación.

## Bibliografía

---

Aggoune, E.H., Alwakeel, M., Di Renzo, M., Ge, X., Patcharamaneepakorn, P., y Wang C.X., Spectral, energy and economic efficiency of 5G multicell massive MIMO systems with generalized spatial modulation, IEEE Transaction on Vehicular Technology, Col. 65, No. 12, 2016.

Aijaz, A., Buczkowski, M., Foulakas, F., Kaltenberger, F., Holland, O., Pietrzyk, S.; y, Vivier, G., Management architecture for aggregation of heterogeneous systems and spectrum bands, IEEE Communications Magazine, Vol. 54, Septiembre 2016.

Akhtman, J., y Hanzo, L., Power versus bandwidth efficiency in Wireless communications: the economic perspective, IEEE, 2009.

Burns, J., Measuring spectrum efficiency –the art of spectrum utilisation metrics, IEE Two Day Conference. Getting the Most of the radio Spectrum, 2002.

Burns, J., Marcus, S., Marks, P., y Pujo, F., Inventory and review of spectrum use: Assessment of the EU potential for improving spectrum efficiency, WIK-Consult, Final Report, Study for the European Commission, 2012.

Chan, Y.S. y Miller, T., Valuing spectrum in Mexico, A report for the IFT, Julio 2015.

FCC Spectrum Policy Task Force, Report of the Spectrum Efficiency Working Group, 2002.

GSMA, The impact of spectrum prices on consumers, Septiembre 2009. Disponible en: <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2019/09/Impact-of-spectrum-prices-on-consumers.pdf>

IFT, Medición de la eficiencia espectral, Definiciones y consideraciones a observar para su aplicación en México, 2018. Disponible en <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/industria/temasrelevantes/13534/documentos/mediciondelaeficienciaespectralscc.pdf>

IFT, Lineamientos Generales para el Acceso a la Multiprogramación, Diario Oficial de la Federación, México, 2015. Consultado el 15 de febrero de 2018, disponible en: [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5382262&fecha=17/02/2015](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5382262&fecha=17/02/2015).

Koval, V., y Tikhvinskiy, V., (2014), Economical efficiency assessment model of spectrum conversion for new mobile wireless technologies, publicado en Proceedings of the 2014 ITU kaleidoscope academic conference: Living in a converged world - Impossible without standards?, IEEE 2014.

Li, Y., Ruan, Y., Wang, C.X., y zhang, R., Energy-Spectral Efficiency Trade-Off in Underlying Mobile D2D Communications: An Economic Efficiency Perspective, IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 17, No. 7, 2018.

Ofcom, Spectrum Framework Review, A Consultation on Ofcom's views as to how radio spectrum should be managed, Noviembre 2004. Disponible en: [https://www.ofcom.org.uk/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0014/25403/sfr.pdf](https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0014/25403/sfr.pdf)

UIT-R BS.1387-1 Método para mediciones objetivas de la calidad de audio percibida, 2001. Disponible en: : [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1387-1-200111-I!!PDF-S.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1387-1-200111-I!!PDF-S.pdf)

Spectrum Policy OECD, 2016

UIT, Spectrum use and efficiency of Radio System, 2017

GSMA, Valuing the use of Spectrum, 2013.

## Anexo

---

### A.1 Modelos propuestos para la estimación de métricas de eficiencia económica

En la literatura económica se encuentran investigaciones que asocian la eficiencia económica del espectro con la eficiencia de la energía eléctrica necesaria para la provisión de los servicios. Tal es el caso de Akhtman y Hanzo (2009) y de Li et al (2018), ambos estudios consideran que la eficiencia económica debe incorporar el efecto del desempeño del uso de la energía eléctrica en la generación de los servicios. Estas aportaciones se detallan a continuación.

Akhtman y Hanzo (2009) analizan un grupo de redes inalámbricas comerciales y exploran las propiedades e implicaciones del balance entre la energía y el ancho de banda. Encuentran que la elección de desempeño óptimo de una red tiene efectos en el desempeño del resto de las redes. Con lo anterior, concluyen que la gestión de recurso escaso, el espectro radioeléctrico, impacta en la eficiencia integral del sistema de redes, esto es, buscar la eficiencia económica del uso del espectro necesariamente implica un balance entre la eficiencia técnico espectral y de energía para la provisión de servicios de telecomunicaciones inalámbricos.

A mayor abundamiento se debe escoger entre diferentes niveles de desempeño tanto de bps/Hertz<sup>28</sup> como de bps/Watts (generalmente acompañada de menores niveles de interferencia). Los resultados de los autores demuestran que, en 2009, la red inalámbrica con mayor eficiencia económica fue la de 2G, tecnologías superiores no alcanzaron los niveles de eficiencia de la 2G cuando se tiene que balancear entre eficiencia espectral y de energía. Esto es, no se alcanzaron mayores niveles de eficiencia económica al incrementar la eficiencia del ancho de banda bps/Hertz. Sin embargo, reconocen que se pueden alcanzar mayores ganancias y valor para el usuario, así como mayor calidad de los servicios con otras combinaciones de eficiencia energética y expansiones de ancho

---

<sup>28</sup> Bits por segundo o b/s, en una transmisión de datos, es el número de impulsos elementales (1 o 0) transmitidos en cada segundo.

de bandas. Los autores definen eficiencia económica usando el principio económico de la maximización de ingresos menos costos de los servicios provistos, definen la función de costos por segundo como:

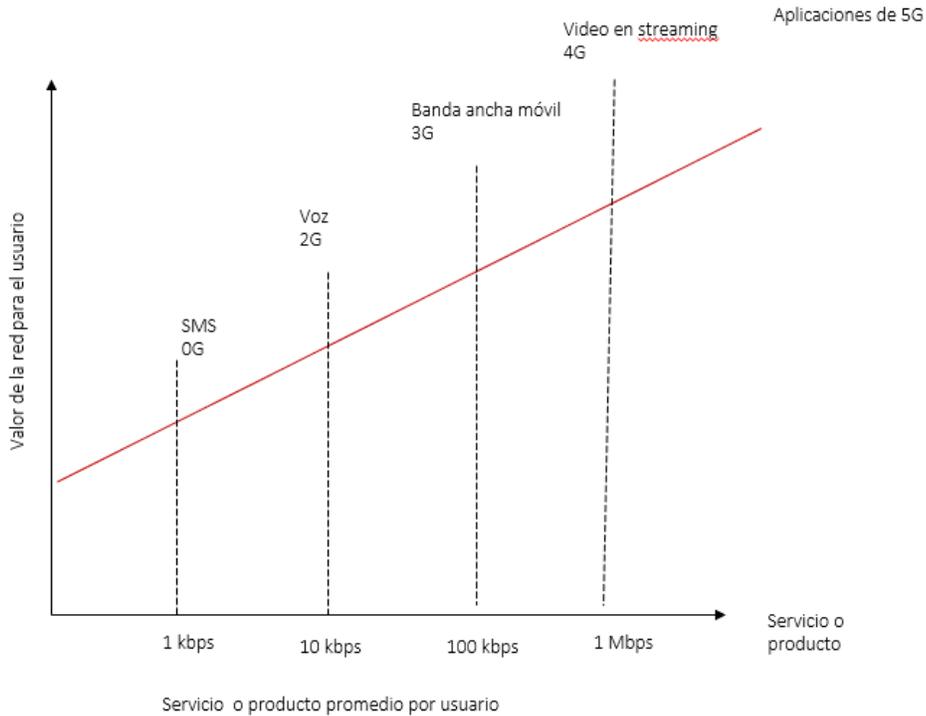
$$C = C_p P + C_r = C_p P_{RF} + C_p P_c + C_r$$

Donde  $C_p$  denotan los costos por joule y  $P$  son los Joules promedio utilizados por la red, mientras que  $C_r$  denota la tasa acumulativa de los costos adicionales que no están relacionados con el consumo de energía, por ejemplo, el hardware, los costos de mantenimiento y el costo del espectro.  $P_{RF}$  y  $P_c$  denotan la energía consumida por el equipo de transmisión  $RF$  y el resto de la energía utilizada en la infraestructura de la red, por ejemplo, los servidores, el equipo de aire acondicionado, el equipo de comunicación para el *backhaul*, etc. Los autores reconocen que es complejo definir y cuantificar  $C$  además de que varía sustancialmente entre diferentes sistemas, sin embargo, la función de costos se puede simplificar sin que pierda un grado de precisión considerable, por lo que la ecuación que deben maximiza:

$$K = A(R) - C_p P_{RF}$$

Donde  $K$  representan los ingresos de cualquier productor. Así, la función de ingreso promedio por segundo,  $A(R)$ , donde  $R$  representa el total de bps de una comunicación sobre la red del proveedor. Luego entonces, la función de ingresos del proveedor se determina con el valor que brinda a los usuarios finales, la que su vez evidentemente depende de la habilidad de los usuarios de beneficiarse de tipo de servicio de telecomunicación, ya sea un SMS, voz, acceso a internet móvil, etc. Conforme las tecnologías de telecomunicaciones han evolucionado, los usuarios se han beneficiado de mayores y mejores servicios y por ello han estado dispuestos a pagar “una prima” por un mejor servicio, por ejemplo, por una mayor calidad de video en líneas desde un dispositivo móvil, lo anterior se ve reflejado en un mayor valor para el usuario que recibe los servicios como muestra la gráfica 1. Ahora bien, los autores se basan en el supuesto de una correlación positiva entre el valor para el usuario y su disposición a pagar y por lo tanto en los ingresos del proveedor de los servicios.

Gráfica 1. Valor de la red para el usuario por servicio ofrecido (en bps)



En este sentido, el ingreso del proveedor de servicios se puede representar como una función linealmente proporcional al número de suscriptores activo  $N_u$  y logarítmicamente proporcional a la tasa de transmisión de datos recibida por cada usuario y al valor que éste le otorga, así, si  $\bar{R}_u$  y  $B_u=B/N_u$  es el ancho de banda promedio por usuario activo. Así la función de ingresos se expresa:

$$A(R) = N_u \log_2 \left( 1 + \frac{B_u}{\bar{R}_u} \right)$$

El ingreso que recibe el proveedor es igual al valor monetario que otorga el usuario por el servicio por lo que expresando el valor del servicio para del usuario en términos monetarios se propone expresar la función de ingresos, no sin antes definir  $v_b = \log_2(1 + \gamma_s)$  como la eficiencia de la banda ancha del sistema de comunicación donde  $\gamma_s$  es la tasa promedio de señal-ruido de receptor.

$$K = N_u \log_2 \left( 1 + \frac{B_u}{\bar{R}_u} \log_2(1 + \gamma_s) \right) - C_p \alpha \gamma_s B N_0 = \frac{B}{B_u} \log_2 \left( 1 + \frac{B_u}{\bar{R}_u} \log_2(1 + \gamma_s) \right) - C_p \alpha \gamma_s B N_0$$

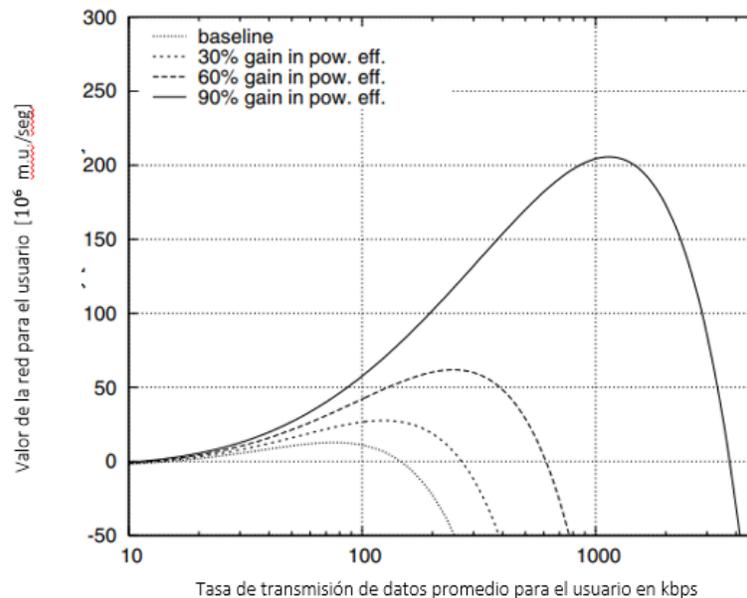
En el caso de una sola antena corresponde a bps/Hz, mientras que, en el caso de múltiples antenas, es equivalente a bps/Hz/antena. Es decir, eficiencia de energía,  $v_p$ , es el número de bits por unidad de energía recibida por el

usuario y se expresa como  $v_p = \frac{v_b}{\gamma_s} < \frac{\log_2(1+\gamma_s)}{\gamma_s}$ . Si  $B$  es el total de grados de libertad y  $\alpha$  el coeficiente de eficiencia de energía, la definición utilidad por canal utilizado como,  $k=K/B$ , se obtiene que:

$$k = \frac{1}{B_u} \log \left( 1 + \frac{B_u}{R_u} \log(1 + \gamma_s) \right) - C_p \alpha \gamma_s B N_0$$

Ambas cantidades por uso de canal  $\gamma_s$  y  $k$ , constituyen las cantidades por segundo normalizadas por ancho de banda. Luego entonces, al explorar la relación entre el valor que le otorga el usuario a la red  $K$  y las tres principales características de la red: energía, ancho de banda  $B$  y servicio promedio al usuario  $R_u$ , se grafica la siguiente relación:

Gráfica 2. Utilidad de la red para el usuario por servicio ofrecido



Es decir, la función del valor que el usuario otorga a la red y que equivalentemente representa el ingreso del proveedor  $K$ , es una función de la eficiencia de la energía de tal manera que el máximo de  $K$  se alcanza se mejora la tasa de transmisión al usuario  $R_u$ , la cual a su vez mejora conforme las redes de telecomunicaciones inalámbricas avanzan en términos de tecnología. Los autores hicieron las pruebas de la fórmula en el Reino Unido con estadísticas de la GSM usando mejoras de 30, 60 y 90% en la eficiencia energética. En aquel momento, 2009, la mayor eficiencia se obtuvo con la tecnología celular 2G, pues el supuesto de un incremento de 90% en la eficiencia de la energía no era realísticamente posible. Aún más, demostraron que no se podían obtener ganancias económicas significativas al incrementar simplemente la eficiencia del ancho de banda bps/Hz. Sin embargo, la utilidad de usuario o el valor que le otorga a la red, si se ve sustancialmente incrementada cuando la calidad de servicios (QoS) se combina con la eficiencia energética y la expansión del ancho de banda. Finalmente, los autores especulan que con la gradual transición hacia redes móviles que emplean tecnología en bandas ultra anchas con

poca energía y baja complejidad de configuración de las redes operativas sí se vería incrementada la eficiencia económica de la red.

Más recientemente, Li., et al. (2018) propusieron una métrica de la eficiencia económica del uso del espectro haciendo un balance entre la eficiencia técnica espectral (MEET-R) y la eficiencia de la energía utilizada. Es importante señalar que los autores, al igual que la UER en su Estudio de Métrica de Eficiencia Espectral aclaran que las métricas que integran la eficiencia espectral en su integridad se deben componer de varias complementarias, en este caso, de la de eficiencia energética y la de eficiencia técnica regulatoria. Estas se basan en sistemas de comunicación con interferencia mutua causada por la reutilización del recurso (el espectro) cuando se brindan servicios D2D (por las siglas en inglés de *Device to Device*) en el uso de las tecnologías 5G. Los autores proponen como eficiencia económica, la MEEc, la ganancia en unidad monetaria por segundo de los sistemas de comunicación, esto es, el ingreso que generan menos el costo de los proveedores por producir los servicios. Esta medida toma en cuenta tanto la capacidad de una red como la energía utilizada en ella, en bits y Joules<sup>29</sup>, respectivamente, convertidos a valor monetario. En resumen, al igual que Atkhman y Hanzo (2019), la MEEc se define en función de la MEET-R y a la eficiencia de energía. La eficiencia energía se define como la tasa de consumo de energía en el instante medido sobre el total de la energía consumida y se expresa como:  $\theta_{EE} = \frac{\theta_{SE}}{P}$ , donde  $P = \varepsilon P_D + P_0$  es el total de la energía consumida en watts y  $P_D$  es la energía consumida en el punto de partida (es decir, del usuario de origen que envía la comunicación al usuario destinatario). Para un determinado ancho de banda  $W$ , la eficiencia energética es una función de la MEET-R, la cual se define como la capacidad de la red,  $C$ , y de la tasa de [señal/(interferencia+ruido)] del usuario destinatario representada por  $\gamma$ , ésta a su vez, está en función de  $P_D$  y  $P_C$ , la energía de transmisión del usuario celular desde el punto de partida hasta la recepción del usuario final, respectivamente. Con las anteriores definiciones, los autores proponen medir la de eficiencia económica del espectro como sigue:

$$\theta_{MEEc} = k_r R^{ref} \log_2 \left( 1 + \frac{W}{R^{ref}} \log_2 \left( 1 + \frac{P_D^*(\gamma_i) |h_{sd}|^2}{N_0 + P_C |h_{cd}|^2} \right) \right) - (C_0 + k_c P_D^*(\gamma_i))$$

Donde el primer término de la ecuación representa el ingreso por la prestación del servicio y el segundo, el costo. A mayor abundamiento,  $k_r$  y  $k_c$ , representan el ingreso por bit y el costo por Joule por la provisión del servicio,  $R^{ref}$  la tasa de transmisión en un momento dado en el tiempo,  $W$  es un determinado ancho de banda,  $P_D^*(\gamma_i) |h_{sd}|$  se refiere al nivel óptimo de energía que maximiza la transmisión de la misma, pues  $\gamma_i$  es la función que toma el valor de eficiencia técnica, y de eficiencia energética, según varíe  $i$  que puede tomar valores de tráfico alto o bajo, mientras que  $P_C |h_{cd}|$  representa la función creciente de transmisión de energía sujeta a un cierto

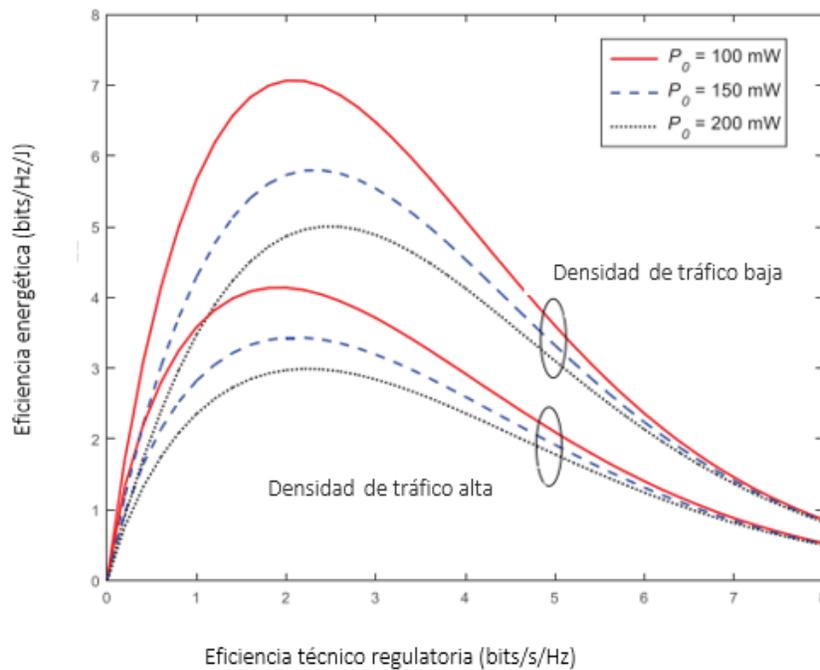
<sup>29</sup> El julio o joule es la unidad derivada del Sistema Internacional utilizada para medir energía, trabajo y calor. Como unidad de trabajo, el julio se define como la cantidad de trabajo realizado por una fuerza constante de un newton en un metro de longitud en la misma dirección de la fuerza. Por ejemplo 1 kWh (kilovatio-hora) = 3,6·10<sup>6</sup> J = 3,6 MJ.

nivel de transmisión  $C$  con cero ruido, representado por  $N_0$ . El término  $C_0$  representa otros costos adicionales a los de transmisión en bit y en Joules;  $P_D^*$  es la tasa de transmisión de energía óptima.

La ecuación indica que el ingreso por la provisión del servicio D2D en bits y en Joules, incrementa hasta llegar a un nivel máximo en el que una cantidad adicional de espectro (bits) o de energía (Joules) hace que el ingreso empiece a decrecer. Es decir, es una función con rendimientos decrecientes lo que se representa en la relación logarítmica entre el ingreso alcanzable y la tasa de transmisión objetivo. El balance entre la eficiencia técnico regulatoria y la eficiencia energética juega un rol tanto en la determinación de ingresos como en los costos en diferentes escenarios de densidad de tráfico  $i$ . La función entonces maximiza la eficiencia económica del uso del espectro sujeta el balance óptimo entre la eficiencia técnico regulatoria y la eficiencia energética de espectro.

Los autores realizan un ejercicio de simulación en el que incluyen distintos valores para las diferentes variables de la ecuación. A pesar de la complejidad de la ecuación, los resultados son intuitivos, esto es, a mayor interferencia, menor eficiencia económica; la eficiencia técnica regulatoria disminuye conforme aumenta la eficiencia energética para un determinado ancho de banda; entre mayor es la distancia entre el transmisor y el receptor del D2D, menor es la eficiencia técnico regulatoria que se puede alcanzar.

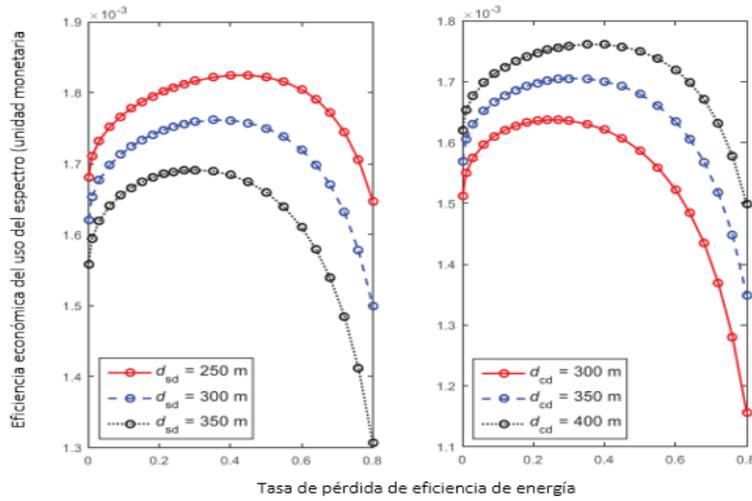
Gráfica 3. Relación entre eficiencia técnica y eficiencia energética del uso del espectro



Nota:  $P_0$  representa la energía consumida por los circuitos de radiofrecuencia cuando se excluye el amplificador.

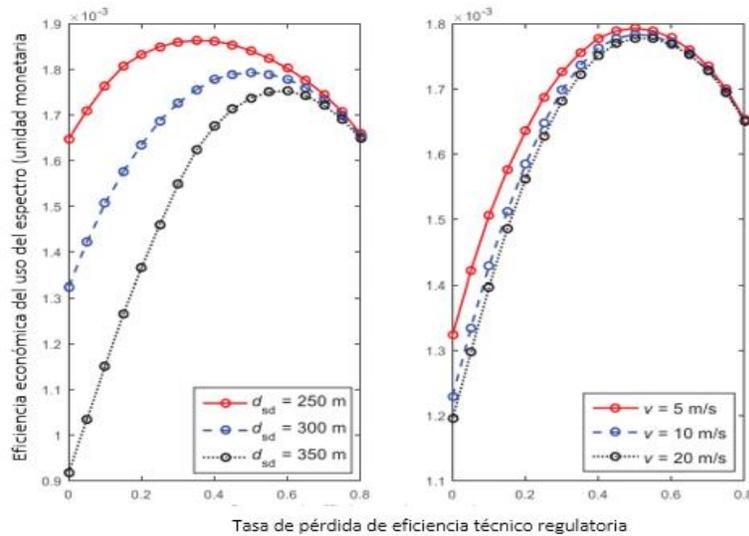
En este sentido, la relación directa entre la eficiencia económica del espectro y las eficiencias técnico regulatoria y de energía se puede ver con mayor claridad en las gráficas siguientes:

Gráfica 4. Relación entre eficiencia de energía y eficiencia económica del uso del espectro



Nota:  $d_{sd}$  y  $d_{cd}$  representan la distancia entre el usuario emisor y el usuario destinatarios cuando se trata de D2D, así como entre el usuario emisor y el usuario destinatario cuando el origen proviene de un dispositivo móvil, respectivamente.

Gráfica 5. Relación entre eficiencia técnica y eficiencia económica del uso del espectro



Nota:  $d_{sd}$  y  $d_{cd}$  representan la distancia entre el usuario emisor y el usuario destinatarios cuando se trata de D2D y  $v$  es la velocidad de la red del usuario emisor en m/s.

Las gráficas 4 y 5 indican que, cuando los usuarios se ven afectados por una disminución en la eficiencia energética es deseable “sacrificar” eficiencia técnico regulatoria para alcanzar un nivel óptimo de eficiencia económica.

Aggoune et al. (2016), también proponen una métrica de eficiencia económica del uso del espectro, incorporando como factores a ponderar, la eficiencia técnico regulatoria y la eficiencia energética en el segmento específico de redes móviles provistas con tecnología 5G. Los autores proponen medir la eficiencia económica del uso del espectro en términos monetarios por segundo. La ecuación para estimar es relativamente menos compleja que la propuesta por Li et al. (2018) pero también es validada con ejercicios de simulación en lugar de con observaciones reales. En este caso, los factores relevantes a incorporar están relacionados con las condiciones técnicas<sup>30</sup> de los canales, la correlación de las antenas (señales con ruidos o señales débiles con espectros parecidos a los espectros del ruido) y la contaminación de la energía<sup>31</sup>. Los autores encuentran que con una sola antena por usuario se alcanza la mayor eficiencia energética en virtud de que se reduce la interferencia entre canales. Por su parte, la eficiencia técnico regulatoria se reduce conforme aumenta la duración de las pruebas (del balance óptimo entre la eficiencia técnico regulatoria, MEET-R y la eficiencia energética) para un determinado canal, lo que finalmente demuestra poder transmitir menos información en un tiempo limitado. Al igual que Akhtman et. al (2009) y Li., et al. (2018) los autores encuentran que, la estimación de la eficiencia económica del uso del espectro es dependiente del balance entre la eficiencia técnico regulatoria y la energética.

Ahora bien, en un contexto pragmático de mercado, los prestadores de servicios de telecomunicaciones y/o radiodifusión, como cualquier otro oferente de bienes o servicios, diseñan sus planes de negocio a corto, mediano y largo plazo lo que implica, en principio, una intensidad de uso variante del espectro de acuerdo con la etapa de maduración del negocio, del despliegue de infraestructura, de cambios o actualizaciones tecnológicos, etc. En este mismo sentido, los concesionarios de servicios de telecomunicación y radiodifusión, generalmente despliegan sus redes en una porción del área total de cobertura que tienen asignada, pues en ella se encuentra la masa crítica de usuarios que permiten que el negocio empiece a generar rentabilidad. Lo anterior implica que al tiempo que se realiza la prueba, pueden existir otros concesionarios que se encuentran en una etapa más madura del negocio brindando servicios por ejemplo en regiones del área de cobertura menos atractivas económicamente y que implican por tanto menor rentabilidad donde probablemente el espectro y la infraestructura desplegada se usa con menor intensidad. Por lo anterior, es importante que al implementar una MEEc se haga en un universo con elementos lo más homogéneos posible, esto es no únicamente en cuánto al servicio y cobertura en cuestión sino también en cuanto a la etapa de madurez del modelo de negocio del prestador de servicios de telecomunicaciones.

---

<sup>30</sup> Por ejemplo, para el acceso a la multiprogramación, los “Lineamientos Generales para el Acceso a la Multiprogramación” se refieren a la transmisión de señales como son el formato de compresión y las tasas de transferencia para contenido en alta definición y en definición estándar.

<sup>31</sup> Se entiende como contaminación electromagnética, también conocida como electrosmog, a la presencia de diversas formas de energía electromagnética en el ambiente, que por su magnitud y tiempo de exposición pueden producir riesgo, daño o molestia a las personas, ecosistemas o bienes en determinadas circunstancias.