

MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL

Definiciones y consideraciones a observar
para su aplicación en México



UNIDAD DE ESPECTRO RADIOELÉCTRICO

Dirección de Ingeniería y Tecnología

Ricardo Castañeda Álvarez
Director General de Ingeniería del Espectro y Estudios Técnicos
ricardo.castaneda@ift.org.mx

Roberto Carlos Castro Jaramillo
Director de Ingeniería y Tecnología
roberto.castro@ift.org.mx

Gerardo Martínez Cruz
Subdirector de Ingeniería del Espectro
gerardo.martinezc@ift.org.mx

A través de la presente investigación, la Dirección General de Ingeniería del Espectro y Estudios Técnicos y la Dirección de Ingeniería y Tecnología definen el concepto de *eficiencia espectral*, así como la forma de su medición, denominada *Métrica Integral de Eficiencia Espectral* (MIDEE), la cual será de observancia obligatoria para todos los concesionarios. Sin embargo, debido a que en la MIDEE considera aspectos económicos, sociales y regulatorios, el presente estudio busca que la industria, la academia y la sociedad civil contribuyan en el análisis de los elementos a incluir en la MIDEE.

Para tal finalidad, la presente investigación expone un panorama integral de la *eficiencia espectral*, a partir del análisis del estado de la técnica, para después definir la *eficiencia espectral*, la cual será adoptada por el IFT. Posteriormente, se define el concepto de MIDEE y las submétricas que la componen; y finalmente se analizan aquellos considerandos tanto técnicos como regulatorios implicados en el cumplimiento de las métricas de eficiencia espectral por parte de los concesionarios.

El contenido del presente documento y las opiniones vertidas en el mismo, no representa un posicionamiento definitivo por parte del Pleno del instituto respecto a regulación lineamiento o normatividad alguna. El único fin de este trabajo es el contextualizar las preguntas que se encuentran contenidas en el formato de participación de la "Consulta Pública de Integración Acerca de los Elementos a Valorarse en el Desarrollo de las Métricas de Eficiencia Espectral"



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
ACRÓNIMOS	3
GLOSARIO	4
I. ANTECEDENTES DEL PROYECTO DE MÉTRICAS DE EFICIENCIA ESPECTRAL	6
1.1 El Espectro radioeléctrico en México. Estudio y acciones. Más y mejor espectro para Banda Ancha.....	6
1.2 Legislación y regulación mexicana en materia de Eficiencia Espectral	7
1.2.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos	7
1.2.2 Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión	8
1.2.3 Programa Nacional de Espectro Radioeléctrico	9
1.3 Comentarios	10
II. ESTADO DE LA TÉCNICA SOBRE LA EFICIENCIA ESPECTRAL.....	11
2.1 Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos: IEEE.....	11
2.1.1 “Mediciones de Eficiencia Espectral Orientadas a la Salida”, Leslie A. Berry.....	12
2.1.1.1 La definición de la fórmula “relación salida/entrada”	12
2.1.1.2 Sobre la fórmula de relación ideal/entrada	12
2.1.1.3 “Problemas en la utilización del espectro”, Serge S. Sviridenko.....	13
2.1.2. Discusión de la eficiencia espectral y los factores que la afectan, Shila Heeralall.....	14
2.1.2.1 Parámetros para incrementar la eficiencia espectral	15
2.1.2.2 Principales factores y parámetros que afectan la eficiencia espectral.....	16
2.1.2.3 Comentarios del autor.....	16
2.2 Unión Internacional de Telecomunicaciones: Rec. UIT-R SM.1046 “Definición de la Eficacia en la utilización del espectro por un sistema de radiocomunicaciones”	17
2.2.1 Factor de utilización del espectro	17
2.2.2 Eficiencia en el uso del espectro.....	18
2.2.3 Eficiencia relativa de utilización del espectro	18
2.3 FCC, Grupo de Trabajo de Regulación del Espectro: Reporte del Grupo de trabajo de eficiencia espectral.....	19
III. DEFINICIÓN DE MÉTRICA DE EFICIENCIA ESPECTRAL POR LA UNIDAD DE ESPECTRO RADIOELÉCTRICO	22
3.1 Propuesta de definición de eficiencia espectral	22
3.1.1 El marco regulatorio	23
3.1.2 Aspectos socioeconómicos.....	24
3.1.3 Aspectos de calidad	25
3.2 Definición de la Métrica Integral de Eficiencia Espectral (MIDEE).....	25

IV. CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN DE LA MÉTRICA INTEGRAL DE EFICIENCIA ESPECTRAL.....	28
4.1 Sobre la reserva de espectro de los concesionarios	28
4.2 Sobre la protección del principio de neutralidad tecnológica en el momento de la aplicación de las métricas	28
4.3 Sobre la consideración del GoS en las métricas.....	29
4.4 Sobre la implementación de las métricas en los títulos de concesión	29
4.5 Sobre la consideración de los servicios finales en el cálculo de las métricas	30
4.6 Sobre la obtención de información necesaria para el cálculo de las métricas.....	30
4.7 Sobre la aplicación de las métricas en la figura de los OMV.....	31
4.8 Sobre la aplicación de las métricas de eficiencia espectral para concesionarios que implementen tecnologías oportunistas del espectro	32
4.9 Sobre la viabilidad de definir las métricas.....	32
4.10 Sobre la aplicación de las métricas para los concesionarios públicos, sociales y privados	32
4.11 Sobre la consideración de la multiprogramación como factor en la métrica de eficiencia espectral de los servicios de radiodifusión	33
REFERENCIAS.....	34

INTRODUCCIÓN

- 1 El espectro radioeléctrico (en adelante “espectro”) es un recurso natural limitado de gran valor económico y social, cuya demanda crece rápidamente. Es tanta la demanda, así como su diversificación de utilización (telefonía móvil, banda ancha móvil, comunicaciones de seguridad, Internet de las Cosas, comunicaciones por satélite, etc.), que hoy en día su utilización tiene un impacto transversal en prácticamente todos los aspectos de la actividad humana.
- 2 En este sentido, el Reglamento de Radiocomunicaciones, instrumento por el cual los Estados Miembros¹ de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (en adelante “UIT”) regulan los servicios de radiocomunicaciones, establece en su preámbulo lo siguiente:

“0.2 Los Miembros procurarán limitar las frecuencias y el espectro utilizado al mínimo indispensable para obtener el funcionamiento satisfactorio de los servicios necesarios. A tal fin, **se esforzarán por aplicar, a la mayor brevedad, los últimos adelantos de la técnica [...]***

*0.3 En la utilización de bandas de frecuencias para las radiocomunicaciones, los Miembros tendrán en cuenta que **las frecuencias y las órbitas correspondientes, comprendida la órbita de los satélites geoestacionarios son recursos naturales limitados que **deben utilizarse de forma racional, eficaz y económica, de conformidad con lo establecido en el presente Reglamento [...]*****

0.5 Con el objeto de cumplir con los objetivos de la Unión Internacional de Telecomunicaciones indicados en el Artículo 1 de la Constitución, el presente Reglamento tendrá los objetivos siguientes: [...]

*0.6 **facilitar el acceso equitativo y la utilización racional de los recursos naturales constituidos por el espectro de frecuencias y la órbita de satélites geoestacionarios; [...]***

*0.9 **facilitar el funcionamiento efectivo y eficaz de todos los servicios de radiocomunicaciones;**”²*

(Énfasis añadido).

- 3 En este orden de ideas, uno de los objetivos de los reguladores³ es el maximizar el bien social a partir de la explotación del espectro radioeléctrico. En consecuencia, el espectro radioeléctrico debe ser administrado por los reguladores de forma racional y velando en todo momento por que no exista un desperdicio de dicho recurso por parte de los concesionarios⁴. De esta forma, es necesario contar con mecanismos que permitan a los reguladores

¹ Países pertenecientes a la Unión Internacional de Telecomunicaciones, referidos en el Reglamento de Radiocomunicaciones únicamente como “Miembros”.

² UIT, *Reglamento de Radiocomunicaciones. Artículos*, Suiza, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Vol. I, 2016, p. 3.

³ Aquellas entidades/organismos de cada país encargados de administrar el espectro radioeléctrico.

⁴ Persona física o moral, titular de una concesión que le confiere el derecho para usar, aprovechar o explotar bandas de frecuencia del espectro radioeléctrico o recursos orbitales, en los términos y modalidades establecidas en la Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión.

identificar no sólo el grado de utilización del espectro por parte de los concesionarios, sino qué tan “benéfica” es esa utilización para la sociedad.

- 4 Sin embargo, existen diversos factores que influyen directamente en qué tanto los concesionarios pueden aprovechar al máximo el espectro que tienen autorizado. Entre estos factores se encuentran las propiedades físicas de propagación de unas bandas de frecuencias respecto de otras para la prestación de un determinado servicio de radiocomunicaciones; las características técnicas de las redes desplegadas (antenas, transmisores, receptores, técnicas de acceso al medio, tecnología empleada, etc.), y las condiciones regulatorias bajo las cuales los tenedores del espectro están habilitados a prestar sus servicios.
- 5 Bajo este contexto, un posible mecanismo para verificar la utilización del espectro radioeléctrico es mediante el uso de *Métricas de Eficiencia Espectral* (en adelante “MEE”). De forma general, las MEE se componen de fórmulas, a partir de las cuales se obtienen indicadores numéricos que se utilizan para evaluar qué tanto los concesionarios están utilizando de forma eficiente el espectro respecto a los servicios de radiocomunicaciones que prestan. Pero, ¿cuál es la definición de *eficiencia* cuando ésta es referida al espectro radioeléctrico? ¿Cómo medir la *eficiencia espectral*? ¿Qué parámetros deben contemplar las métricas? ¿Cómo se debería parametrizar el resultado de las métricas?
- 6 Así, el presente documento busca brindar un panorama integral de la eficiencia espectral a partir del análisis del estado de la técnica, para después proponer una definición de eficiencia espectral y posteriormente analizar aquellos considerandos tanto técnicos como regulatorios que se deben observar para su implementación en México.

ACRÓNIMOS

CMM	Concesionario Mayorista Móvil
Cofetel	Comisión Federal de Telecomunicaciones
DOF	Diario Oficial de la Federación
EE	Eficiencia Espectral
EUE	Eficacia de utilización del espectro
GoS	<i>Grade of Service</i>
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
IFT	Instituto Federal de Telecomunicaciones
IMT	<i>International Mobile Telecommunications</i>
LFTR	Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MC	Métrica de Calidad
MEE	Métrica de Eficiencia Espectral
MEEc	Métrica de Eficiencia Económica
MEET-R	Métrica de Eficiencia Espectral Técnico-Regulatoria
MIDEE	Métrica Integral de Eficiencia Espectral
OMV	Operador Móvil Virtual
PNER	Programa Nacional de Espectro Radioeléctrico
SPTF	<i>Spectrum Policy Task Force</i>
TDT	Televisión Digital Terrestre
UER	Unidad de Espectro Radioeléctrico
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones

GLOSARIO

Banda ancha móvil	Servicio de acceso de alta capacidad que permite ofrecer diversos servicios móviles convergentes a través de infraestructura de red fiable, con independencia de las tecnologías empleadas.
Codificación	Acción realizada por el transmisor, la cual consiste en la conversión de la señal de información en signos, símbolos, letras, números, etc., para que puedan ser recibidos y entendidos por el receptor.
Compresión de datos	Reducción en el número de bits utilizados para representar uno o más datos.
Concesionario Mayorista Móvil	Titular de una concesión para uso comercial que le permite la prestación del servicio móvil y ofrece servicios mayoristas de telecomunicaciones móviles.
Desvanecimiento de la señal	Reducción de la potencia o energía de una señal debido a pérdidas en la trayectoria de su propagación.
Directividad	Característica de una antena que indica la concentración de la radiación emitida por una antena transmisora en cierta dirección, o el énfasis de la radiación recibida por una antena transmisora desde una cierta dirección.
Erlang	Unidad de densidad de tráfico en un sistema de telecomunicaciones.
Espectro Radioeléctrico	Espacio que permite la propagación, sin guía artificial, de ondas electromagnéticas cuyas bandas de frecuencias se fijan convencionalmente por debajo de los 3,000 GHz.
International Mobile Telecommunications	Término genérico para designar a los sistemas móviles de banda ancha en todo el mundo.
Internet de las Cosas	Infraestructura global de la sociedad de la información, que permite ofrecer servicios avanzados mediante la interconexión de objetos (físicos y virtuales) gracias a la interoperabilidad de tecnologías de la información y la comunicación presentes y futuras.
LTE	Siglas en inglés de "Evolución de Largo Plazo". Tecnología utilizada para el despliegue de redes 4G. Esta tecnología utiliza en su totalidad el protocolo de Internet para todos los servicios (datos y voz) y las conexiones entre todos los puntos de su red.

Modulación	Proceso de cambiar una o más propiedades de una frecuencia portadora en proporción con la señal de información.
Multiplexaje	Transmisión de la información de una o más fuentes hacia uno o más destinos sobre el mismo medio de propagación. A pesar de que la transmisión se realiza sobre el mismo medio, no necesariamente ocurre al mismo tiempo u ocupa el mismo ancho de banda.
Multiprogramación	Distribución de más de un canal de programación en el mismo canal de transmisión de radiodifusión.
Operador Móvil Virtual	Concesionario o autorizado que preste, comercialice o revenda servicios móviles o capacidades que previamente haya contratado con algún concesionario mayorista móvil.
Ruido térmico	Ruido generado por la agitación térmica de los electrones dentro de un conductor. También conocido como ruido blanco o de Johnson.
Satélite geoestacionario	Satélite cuya órbita circular y directa se encuentra en el plano ecuatorial de la Tierra y cuyo periodo de traslación es igual al periodo de rotación terrestre. Por consiguiente, la posición relativa del satélite se encuentra fija respecto de un punto fijo en la superficie terrestre.
Servicios de radiocomunicaciones	Servicio que implica la transmisión, la emisión o la recepción de ondas radioeléctricas para fines específicos de telecomunicación.
Técnica de acceso al medio	Técnica utilizada para acceder y compartir un mismo medio de transmisión entre dos o más equipos de radiocomunicaciones.
Uso ortogonal de frecuencias	Técnica de modulación digital que transmite la información en varias frecuencias portadoras que son ortogonales entre sí. Esta ortogonalidad consiste en que en el punto de máxima intensidad de una portadora, las demás tienen una intensidad nula.

I. ANTECEDENTES DEL PROYECTO DE MÉTRICAS DE EFICIENCIA ESPECTRAL

1.1 El Espectro radioeléctrico en México. Estudio y acciones. Más y mejor espectro para Banda Ancha.

- 7 A principios del año 2013, la extinta Comisión Federal de Telecomunicaciones (Cofetel), con la finalidad de brindar insumos para poder cumplir los objetivos 41 (red Troncal de Telecomunicaciones) y 44 (Competencia en telefonía y servicios de datos) del “Pacto por México”⁵, publicó el estudio “EL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO EN MÉXICO. ESTUDIO Y ACCIONES. Más y mejor espectro para Banda Ancha” (en adelante “el Estudio”). A grandes rasgos, el Estudio analizó más de 600 MHz identificables como espectro IMT (*International Mobile Telecommunications*) y logró identificar 124 MHz de espectro adicionales por debajo de la banda de los 4 GHz que podrían ser susceptibles para la prestación de servicios de banda ancha; haciendo especial énfasis en aquellas bandas identificadas como IMT por la UIT.
- 8 Bajo este contexto, parte del Estudio buscó ejemplificar de una forma simple la utilización del espectro por parte de los concesionarios, tomando como referencia su cantidad de usuarios y la cantidad de espectro concesionada. Así, se definió la “intensidad de uso”, cuya medición fue obtenida al dividir la cantidad de usuarios entre la cantidad de espectro (usuarios/MHz) por concesionario.
- 9 Aunado a lo anterior, dentro del Estudio se abordó de manera básica un análisis sobre el “Uso Eficiente del Espectro”, así como una propuesta de acción para el “Diseño e Implementación de una Metodología de Estimación de Eficiencia Espectral”, donde este último concluyó lo siguiente:

“Situación actual”

- *La eficiencia en el uso del espectro no es un concepto que cuente con una métrica establecida.*
- *Existen asignaciones en bandas del espectro cuya intensidad de uso es baja.*
- *En algunos casos, las asignaciones de espectro han derivado en un elemento especulativo que busca encarecer dicho recurso.*
- *Hoy día no existen obligaciones para los regulados relacionadas con el uso eficiente del espectro que les es asignado o concesionado.*

Problemática

- *No se cuenta con una metodología ni con criterios mínimos para efectuar mediciones sobre el grado de eficiencia en el uso de bandas del espectro.*

⁵ Presidencia de la República, “Pacto por México”, México, 2012. Consultado el 15 de febrero de 2012, disponible en: <http://pactopormexico.org/PACTO-POR-MEXICO-25.pdf>

- *No existen lineamientos, criterios o procedimientos para medir el grado de eficiencia en el uso del espectro.*
- *No se ha encontrado experiencia internacional relevante relacionada con aplicación de métodos para determinar la eficiencia espectral de bandas en uso.*
- *Al no contar con una metodología, se desconocen las afectaciones económicas y sociales causadas por el uso ineficiente del espectro.*
- *Hoy en día las autoridades del sector no cuentan con instrumentos normativos para establecer obligaciones a los regulados relacionadas con el uso eficiente de los recursos del espectro”.⁶*

10 Bajo el análisis anterior, el Estudio propone llevar a cabo siete acciones que podrían dar solución a la problemática antes mencionada, las cuales son enumeradas a continuación:

“Acciones propuestas.

1. *Realizar estudio que compile la experiencia internacional sobre determinación de métodos para evaluar la eficiencia en el uso del espectro.*
2. *Realizar estudios encaminados al desarrollo de metodologías y obtención de métricas sobre el uso eficiente del espectro.*
3. *Con base en los estudios realizados definir una metodología de medición de la eficiencia espectral aplicable a México, considerando las características particulares del sector nacional de las telecomunicaciones.*
4. *Definir formalmente la metodología que se adoptará para su aplicación en los procesos de la medición de la eficiencia del espectro.*
5. *Ejecución continua de los mecanismos y procedimientos mediante los cuales se efectuará la medición del grado de eficiencia en el uso del espectro.*
6. *Adeuar los equipamientos y aplicaciones utilizados por la Red Nacional de Monitoreo para la ejecución técnica de las mediciones relacionadas con la metodología de eficiencia espectral.*
7. *Emisión de las disposiciones de carácter general que definan las condiciones, lineamientos y aplicabilidad bajo las cuales se realizarán las mediciones, reportes y medidas correctivas para mejorar la eficiencia en el uso del espectro”.⁷*

11 Cabe destacar que el Estudio en ningún momento definió el término de “eficiencia espectral”, pero sí la orientó hacia un enfoque de reorganización del espectro para la introducción de nuevos servicios de radiocomunicaciones y nuevas tecnologías (*rebanding*).

1.2 Legislación y regulación mexicana en materia de Eficiencia Espectral

1.2.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

12 El 11 de junio de 2013 se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el “Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de los artículos 6o., 7o., 27, 28, 73, 78, 94

⁶ Cofetel, “EL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO EN MÉXICO. ESTUDIO Y ACCIONES. Más y mejor espectro para Banda Ancha”, Instituto Federal de Telecomunicaciones, México, 2013. Consultado el 15 de febrero de 2012, disponible en: <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/espectro-radioelectrico/el-espectro-radioel-ctrico-en-mexico.estudio-y-acciones-final-consulta.pdf>

⁷ *Idem.*

y 105 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”, mediante el cual se da origen al Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT o “el Instituto”). En este sentido, el Artículo 28 de la Constitución establece que

“En los Estados Unidos Mexicanos quedan prohibidos los monopolios, la (sic) prácticas monopólicas [...]

*El Instituto Federal de Telecomunicaciones es un órgano autónomo, con personalidad jurídica y patrimonio propio, que tiene por objeto el **desarrollo eficiente de la radiodifusión y las telecomunicaciones**, conforme a lo dispuesto en esta Constitución y en los términos que fijan las leyes. Para tal efecto, tendrá a su cargo la regulación, promoción y supervisión del uso, aprovechamiento y explotación del espectro radioeléctrico, las redes y la prestación de los servicios de radiodifusión y telecomunicaciones [...]*”.

(Énfasis añadido).

1.2.2 Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión

13 En virtud de lo anterior, el 14 de julio de 2014 se publicó en el DOF la Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión (LFTR). Cabe señalar que dicha Ley no contempla una definición concreta sobre el *uso eficiente del espectro* o *eficiencia espectral*. Sin embargo, sí contempla cómo se puede desarrollar y promover el uso eficiente del espectro radioeléctrico, así como la prestación eficiente de servicios de telecomunicaciones y radiodifusión bajo el entendimiento colectivo de la palabra *eficiencia*.

14 Lo anterior se refuerza con el **Artículo 54** de la LFTR, la cual señala que:

“El espectro radioeléctrico y los recursos orbitales son bienes del dominio público de la Nación, cuya titularidad y administración corresponden al Estado [...]

Al administrar el espectro, el Instituto perseguirá los siguientes objetivos generales en beneficio de los usuarios: [...]

***IV. El uso eficaz del espectro y su protección; [...]*”**

15 Respecto a las MEE, objeto de este documento, la LFTR menciona en su Título Segundo, Capítulo I, Sección I “*De las Atribuciones del Instituto y de su Composición*” lo siguiente:

Artículo 15. *Para el ejercicio de sus atribuciones corresponde al Instituto: [...]*

XLVIII. *Establecer las **métricas de eficiencia espectral** que serán de observancia obligatoria, así como las metodologías de medición que permitan cuantificarlas”.*

(Énfasis añadido)

16 Así mismo, dentro del Título Décimo Quinto, Régimen de Sanciones, se incluyó la consideración de una sanción a todo aquel tenedor del espectro que no observe los niveles de eficiencia espectral establecidos. Así, el Capítulo II, Sanciones en materia de Telecomunicaciones y Radiodifusión, contempla que:

Artículo 298. *Las infracciones a lo dispuesto en esta Ley y a las disposiciones que deriven de ella, se sancionarán por el Instituto de conformidad con lo siguiente: [...]*

D) 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 radioeléctrico establecidos por el Instituto”.

(Énfasis añadido).

1.2.3 Programa Nacional de Espectro Radioeléctrico

- 17 En la Reforma Constitucional en materia de Telecomunicaciones (“la Reforma”), publicada en el DOF el 11 de junio de 2013⁸, consideró dentro de sus principales objetivos el permitir el acceso de la población a las tecnologías de la información y la comunicación, incluida la banda ancha, así como establecer condiciones de competencia y libre concurrencia en los servicios de telecomunicaciones y radiodifusión. De esta forma, se permitiría a un mayor número de usuarios acceder a dichos servicios en mejores términos de calidad y precio.
- 18 En consistencia con lo anterior, y dada la relevancia del espectro radioeléctrico en la prestación de servicios de telecomunicaciones y radiodifusión, el artículo décimo séptimo transitorio de la Reforma estableció que, dentro del marco del Sistema Nacional de Planeación Democrática, el Ejecutivo Federal debía incluir en el Programa Nacional de Desarrollo y en los programas sectoriales, institucionales y especiales conducentes un Programa Nacional de Espectro Radioeléctrico (PNER), el cual establecería dos programas de trabajo: uno para las bandas de frecuencias de 700 MHz y 2.5 GHz, y el otro para reorganizar el espectro a estaciones de radio y televisión.
- 19 Así, el 29 de septiembre de 2017, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes publicó en el DOF el PNER⁹. Dentro de los elementos incluidos en el PNER se plantearon los objetivos generales con sus respectivas estrategias y líneas de acción. Las líneas de acción están asociadas al desarrollo e implementación de mecanismos de mercado, los cuales promueven una asignación óptima del espectro y garantizan el proceso de competencia y libre concurrencia. En virtud de lo anterior, en el Objetivo 3 se estableció lo siguiente:

Objetivo 3	
<i>Desarrollar acciones para determinar y fomentar el uso eficiente del espectro radioeléctrico en el país.</i>	
<i>Descripción</i>	<i>El espectro radioeléctrico es un recurso escaso y en consecuencia es necesario que las políticas públicas y medidas regulatorias que se dictan busquen hacer más eficiente su uso.</i> <i>Toda vez que el uso eficiente del espectro involucra diferentes enfoques, este objetivo plantea la elaboración y ejecución de diversas estrategias y líneas de acción que tienen como fin determinar el grado de eficiencia con que se utiliza el espectro radioeléctrico, así como desarrollar medidas que permitan reorganizar el espectro.</i>

⁸ Para mayor información consúltese en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5301941&fecha=11/06/2013

⁹ “Programa Nacional de Espectro Radioeléctrico 2017-2018”, disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5498528&fecha=26/09/2017

<i>Estrategia 3.1. Evaluar el uso eficiente del espectro radioeléctrico.</i>	
<i>Líneas de Acción</i>	
<i>3.1.1.</i>	<i>Elaborar métricas de eficiencia espectral de observancia obligatoria.</i>
<i>3.1.2.</i>	<i>Elaborar las metodologías de medición que permitan la aplicación de las métricas de eficiencia espectral.</i>

1.3 Comentarios

- 20 A pesar de que en México a lo largo del tiempo se ha hablado de la *eficiencia espectral* (desde la etapa final de la extinta Cofetel hasta el día de hoy en el IFT) y del cómo ésta podría impactar al desarrollo de las telecomunicaciones y la radiodifusión, **al día de hoy no existe una definición precisa que atienda concretamente el significado de “eficiencia espectral”**, incluso por parte de la misma UIT.
- 21 Aunado a lo anterior, tal y como se mencionó en el punto 2.2.2, a lo largo de la LFTR se mencionan indistintamente los términos *eficiencia* y *eficacia* en materia de espectro radioeléctrico que incluso, haciendo una lectura rigurosa, se podría interpretar que la eficiencia/eficacia está compuesta de diferentes factores tales como la calidad en la prestación de los servicios, implementaciones técnicas dentro de la infraestructura de las redes de telecomunicaciones y radiodifusión, aspectos de competencia económica en los mercados, entre otros.
- 22 Adicionalmente, se prevé que la existencia de las MEE no sólo formará parte de un marco regulatorio que promueva el uso eficiente del espectro, sino que el ejercicio de su cumplimiento implica un posible impacto a los tenedores de espectro. En este sentido, el Artículo 298 de la LFTR menciona la aplicación de una sanción para los concesionarios que no cumplan con los *niveles* de eficiencia espectral establecidos por el Instituto.
- 23 Así, de lo anterior se puede establecer que:
1. A nivel internacional, no se cuenta con una definición de *eficiencia espectral*.
 2. Para evaluar a la *eficiencia espectral* es necesario considerar varios factores, ya que ésta puede ser abordada desde diferentes ámbitos: el económico, el regulatorio y el técnico.
 3. La *eficiencia espectral* debe ser medible, de tal manera que permita una parametrización para poder definir “niveles” y así dar cumplimiento al Artículo 298 de la LFTR.
 4. Aunado al punto 3, la inobservancia de los niveles de eficiencia espectral recae en una sanción administrativa.
- 24 Como se puede observar, el no contar con una definición sobre lo que significa la *eficiencia espectral*, imposibilita la existencia de “métricas” que permitan su cuantificación. En consecuencia, en el siguiente numeral se analizará el estado de la técnica sobre las definiciones de *eficiencia espectral* y las implicaciones que conlleva su medición, las cuales han sido elaboradas por diferentes agentes involucrados tales como la industria, la academia, los organismos internacionales y los reguladores.

II. ESTADO DE LA TÉCNICA SOBRE LA EFICIENCIA ESPECTRAL

- 25 A principios de los años setenta se comenzó a discutir a nivel internacional, a través de conferencias internacionales o en revistas científicas, cómo la *eficiencia espectral* impacta en el uso y aprovechamiento del espectro, tanto para los tenedores del espectro como para los usuarios finales. En ese entonces fue cuando aparecieron las primeras definiciones o aproximaciones de lo que debería ser (o debería contemplar) la eficiencia espectral; ideas que han perdurado hasta la actualidad. Por consiguiente, el presente capítulo expone el estado de la técnica sobre las definiciones de eficiencia espectral, así como de forma general las diferentes aproximaciones para definir las métricas que se han conceptualizado para cuantificar la *eficiencia*.
- 26 Cabe destacar que existen varios artículos de investigación cuyo objetivo es el abordar el concepto de *eficiencia espectral*, pero enfocados únicamente en aspectos técnicos específicos, por ejemplo: *eficiencia* entre técnicas de codificación de señales, *eficiencia* en los patrones de radiación de las antenas, *eficiencia* del ruido térmico en los sistemas de transmisión, y *eficiencia* entre técnicas de multiplexaje, entre otros. En suma, existe un sinnúmero de *eficiencias* las cuales, de forma general, buscan “mostrar” qué tanto es mejor un método/técnica/tecnología respecto a otro. Así, aunque todas estas *eficiencias* de cierto modo inciden en la *eficiencia espectral*, ninguna de ellas logra unificar aquellos factores que debería involucrar la parametrización de la *eficiencia espectral*. Por lo anterior, el estado de la técnica que aquí es mostrado no considera aquellas definiciones aisladas de *eficiencia*.

2.1 Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos: IEEE

- 27 En la biblioteca digital del IEEE¹⁰ existen dos artículos clave que son los pilares conceptuales en los intentos de definir la *eficiencia espectral* y el cómo medirla. El primer documento en el que se hace referencia de forma *unificada* a la *eficiencia espectral* fue publicado en 1976 por Leslie A. Berry y se titula “*Output Oriented Measures of Spectrum Efficiency*”¹¹. Posteriormente, en 1992, Shila Heeralall publicó el artículo que lleva por nombre “*Discussion of Spectrum Efficiency and Factors that Affect it*”¹².
- 28 A pesar de que estos artículos podrían ser considerados “obsoletos” por la fecha de su elaboración, la conceptualización y las fórmulas propuestas en dichos artículos no llegan a caducar pese a los avances tecnológicos que se han desarrollado hasta hoy. Tan es así, que artículos posteriores a los citados retoman estos trabajos para profundizar en las fórmulas propuestas en estos dos artículos, sin brindar innovación alguna. Por lo tanto, a continuación,

¹⁰ El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, mejor conocido por sus siglas en inglés como el “IEEE”, es una asociación mundial de ingenieros dedicada a la estandarización y al desarrollo de tecnologías para el beneficio de la humanidad y en aras de divulgar los desarrollos tecnológicos, este instituto cuenta con una biblioteca digital famosa a nivel mundial por su prestigio y profesionalismo, conocida como *IEEE Xplore Digital Library*, disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>

¹¹ Berry, Leslie A., “Output Oriented Measures of Spectrum Efficiency”, *IEEE 1976 International Symposium in Electromagnetic Compatibility*, Estados Unidos, 1976, pp. 1-3.

¹² Heeralall, Shila, “Discussion of spectrum efficiency and the factors that affect it”, *1992 IEEE International Conference in Selected Topics in Wireless Communications*, Canadá, 1992, pp. 413-416.

se aborda y explica de forma general el contenido de ambos artículos, así como la conclusión a la que llegan sus autores.

2.1.1 “Mediciones de Eficiencia Espectral Orientadas a la Salida”, Leslie A. Berry

- 29 El objetivo de este documento fue proponer una definición de eficiencia, así como establecer procedimientos que pudieran incrementar la efectividad y el uso *eficiente del espectro*. Así, el artículo propone medir la eficiencia espectral vista como una *relación salida/entrada* de un sistema cualquiera de telecomunicaciones y, además, hace una comparación con otro tipo de forma (homóloga) de medir la *eficiencia*, la cual es la *relación ideal/entrada*. A pesar de que este documento no define de forma precisa lo que significa *eficiencia espectral*, sí la establece a través de las relaciones antes mencionadas, las cuales se explican a continuación.

2.1.1.1 La definición de la fórmula “relación salida/entrada”

- 30 En la relación *salida/entrada*, el numerador es el producto que se obtiene a la salida de un sistema de telecomunicaciones y el denominador es el factor (o los factores) utilizados para producir la salida. De forma general, ésta puede ser representada como sigue:

$$\frac{\text{información entregada}}{\text{espectro espacio}}$$

donde el “*espectro espacio*” es el producto, generalmente, de tres factores: la *cantidad de espectro utilizado*, el *área geográfica “cubierta”* por ese espectro y el *tiempo* de dicha utilización. La fórmula anterior es tan versátil que puede ser adaptada para diferentes tipos de servicios de radiocomunicaciones, de los cuales cuatro de éstos son ejemplificados en el artículo en mención y son los siguientes:

Servicio	Fórmula
Comunicaciones por satélite geoestacionario con modulación digital	$\frac{\text{bits}}{(\text{ancho de banda})(\text{arco orbital})(\text{tiempo})}$
Comunicaciones satelitales analógicas	$\frac{\text{ancho de banda de información}}{(\text{ancho de banda})(\text{arco orbital})}$
Enlaces de microondas punto a punto	$\frac{(\text{no. de canales usados})(\text{ancho de banda del canal de información})}{(\text{ancho de banda requerido})}$
Sistemas de radiocomunicaciones móviles	$\frac{\text{tráfico}}{(\text{ancho de banda})(\text{área})(\text{tiempo})}$

2.1.1.2 Sobre la fórmula de relación ideal/entrada

- 31 En relación con la fórmula antes mencionada, existe otro tipo de definición de *eficiencia especial* que es la *relación ideal/entrada*, expresada como sigue:

$$\frac{\text{espectro espacio de un sistema "ideal"}}{\text{espectro espacio del sistema evaluado}}$$

en donde el denominador es el mismo que tiene la *relación salida/entrada* y el numerador tiene los mismos factores que el denominador, pero obtenidos a partir de un sistema "ideal" o "perfecto".

32 Así, la autora argumenta lo siguiente:

"Suponga que se debe calcular la eficiencia espectral de un enlace de microondas punto a punto. El enlace debe llevar un número fijo de circuitos telefónicos a "m" millas en un determinado porcentaje de tiempo. Lo anterior constituye la "salida", la cual es el numerador de la relación salida/entrada [...]"

*Considere ahora el cálculo de una medida de eficiencia ideal [...] ¿Cómo se puede determinar con confiabilidad la salida de un sistema ideal? y **¿Cuál es la cantidad de espectro usado por un sistema "ideal"?** La transmisión podría ser vía coaxial o guía de onda, los cuales no utilizan espectro. ¿Esto representaría un sistema ideal? El sistema podría usar antenas con lóbulos principales estrechos y lóbulos laterales muy pequeños ¿Cuál es el patrón ideal de una antena? Tendrían que ser especificados otros parámetros los cuales reducirían el espectro espacio, por ejemplo, la figura del ruido del receptor, el índice de modulación, y el tipo de modulación. **Es necesario responder estas preguntas que hacen difícil y algo subjetivo de calcular la medición "ideal" de la eficiencia espectral**"¹³.*

(Énfasis añadido).

33 Posteriormente en el año de 1977, Leslie A. Berry publicó otro artículo titulado "*Spectrum Metrics and Spectrum Efficiency: Proposed Definitions*"¹⁴, en donde nuevamente retoma la definición de *relación salida/entrada* para cuantificar la *eficiencia espectral* tal y como lo hizo con su artículo previo. Sin embargo, a pesar que este artículo pudiera parecer idéntico al anterior, el valor agregado aquí es que la *relación salida/entrada* es caracterizada como una *métrica* para comparar la *eficiencia* entre los sistemas de telecomunicaciones. Además, la autora reitera que considerar una métrica que incluya parámetros "ideales" dificultaría el cálculo de la métrica y la haría parecer "subjetiva".

2.1.1.3 "Problemas en la utilización del espectro", Serge S. Sviridenko

34 De igual forma en el año 1977, y dentro de la misma publicación que el segundo artículo de Leslie A. Berry, fue publicado el artículo "*Spectrum Utilization Problems*"¹⁵, de Serge S. Sviridenko, en el cual se analizan y discuten varios problemas en la utilización del espectro incluido el *uso eficiente del espectro*. A pesar de que este artículo no define ni propone el concepto de *eficiencia espectral* o algo relacionado con una medida para cuantificar a la eficiencia, éste hace notar que la *eficiencia espectral* no debe ser considerada "exclusivamente" menester de la técnica ni de la tecnología, si no que involucra otros factores como los económicos. Bajo este contexto, Serge argumenta que:

¹³ Berry, Leslie A., "Output Oriented Measures of Spectrum Efficiency", *IEEE 1976 International Symposium in Electromagnetic Compatibility*, Estados Unidos, 1976, pp. 1-3.

¹⁴ Berry, Leslie A., "Spectrum Metrics and Spectrum Efficiency: Proposed Definitions", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-19, no. 3, Estados Unidos, 1977, pp. 254-260.

¹⁵ Sviridenko, Serge S., "Spectrum Utilization Problems", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-19, no. 3, Suiza, 1977, pp. 260-265.

*"A un nivel nacional, el espectro es usado para la gestión de la industria y los recursos nacionales, fuerzas de defensa y seguridad, radiodifusión, comunicaciones de radio, meteorología, astronomía, investigación del espacio y otros propósitos. A nivel internacional, el papel del espectro en el intercambio de información no necesita ser evidenciado. Es claro que la relevancia del espectro no solo es técnica, sino que económica y social"*¹⁶.

(Énfasis añadido).

- 35 De lo anterior se desprende que la evaluación del uso eficiente del espectro no únicamente depende de factores técnicos (como se podría intuir en primera instancia), sino que dicho uso tiene impacto en otros aspectos de gran importancia como lo son el económico y el social. Por esto, la evaluación de la eficiencia en el uso del espectro debería, en principio, ir más allá de los factores técnicos:

"Para evaluar la eficiencia de la utilización del espectro es necesario tener criterios técnicos para su cuantificación y medición..."

*Además de tener un criterio para la medición cuantitativa de la utilización del espectro, será útil tener un criterio para el análisis económico del espectro como un recurso"*¹⁷.

(Énfasis añadido).

2.1.2. Discusión de la eficiencia espectral y los factores que la afectan, Shila Heeralall

- 36 El primer objetivo de este documento es *"desarrollar un método unificado para evaluar la eficiencia espectral (Erlangs/km²/MHz) y discutir los principales factores que la afectan"*. El segundo objetivo es el de *"considerar sistemas prácticos: identificar algunos de los principales parámetros y factores que afectan la eficiencia espectral y discutir las ponderaciones con otros requerimientos del sistema"*. Cabe señalar que el lenguaje en el cual se escribe el artículo es primordialmente técnico, cuyos conceptos mencionados implican un conocimiento avanzado en telecomunicaciones. Por lo anterior, en esta sección únicamente se busca abordar los principales hallazgos mencionados por la autora y no así ahondar en su particularidad.
- 37 El artículo no define de forma explícita a la *eficiencia espectral*, pero sí lo hace por medio de una ecuación. Ésta define a la *eficiencia espectral* como el producto de tres componentes principales: *tiempo, espacio y frecuencia*, los cuales son expresados en términos de densidad de tráfico, área de cobertura y espectro utilizado, respectivamente, como se detalla a continuación:

"La eficiencia espectral, 'Ef. total', es el producto de tres componentes. Estos tres componentes son: eficiencia del tiempo 'Ef. tiempo', eficiencia espacial 'Ef. espacial' y eficiencia en frecuencia 'Ef. freq'."^{18 19}

¹⁶ *Ibidem*.

¹⁷ *Idem*.

¹⁸ Heeralall, Shila, "Discussion of spectrum efficiency and the factors that affect it", 1992 IEEE International Conference in Selected Topics in Wireless Communications, Canadá, 1992, pp. 413-416.

¹⁹ Para la comodidad del lector, la terminología implementada en las ecuaciones fue traducida al español.

$$Ef_{total} = Ef_{tiempo} * Ef_{espacial} * Ef_{freq}$$

(...)

$$Ef_{total} = \frac{\text{Erlangs/célula}}{\text{área de la célula} * \text{espectro disponible}}$$

Donde:

- Erlangs/célula = cantidad de tráfico que existe en una célula de telefonía móvil, en Erlangs.
 - área de la célula = área geográfica de cobertura de la célula, en km².
 - espectro disponible = cantidad de espectro que se tiene configurado en la célula, en MHz.
- 38 De la fórmula se obtiene que la eficiencia espectral es representada por Ef_{total} , la cual es inversamente proporcional al área de la célula y a la cantidad de espectro disponible, y directamente proporcional a la cantidad de tráfico soportado por la célula. En vista de esto, es posible observar que la *eficiencia espectral* puede ser incrementada o disminuida variando los factores antes mencionados.
- 39 Cabe mencionar que, a pesar de que la autora enfoca la fórmula de *eficiencia espectral* al servicio de telefonía móvil celular, la conceptualización de la *eficiencia espectral* no es objeto de modificación alguna si ésta es aplicada a otros servicios de telecomunicaciones o radiodifusión. Esto es debido a que las consideraciones técnicas que emplea la fórmula (área geográfica del servicio, cantidad de espectro implementado y total de tráfico en la red) están presentes en la mayoría de los servicios de radiocomunicaciones.

2.1.2.1 Parámetros para incrementar la eficiencia espectral

- 40 Derivado de la ecuación anterior, dado que Ef_{total} es el producto de las eficiencias espacial, en tiempo y en frecuencia, es posible incrementar la Ef_{total} al modificar alguno de estos parámetros, por ejemplo:
- Para incrementar la Ef_{tiempo} :
Utilizando una asignación dinámica de canales, la cual permita incrementar la cantidad de éstos en la célula, sin menoscabo en la cantidad de espectro previamente asignado. Por lo anterior, se logra aumentar la cantidad de tráfico en la célula.
 - Para incrementar la Ef_{freq} :
Reduciendo la cantidad de espectro al utilizar mejores técnicas de codificación, modulación y compresión de datos.
 - Para incrementar la $Ef_{espacial}$:
Reduciendo la distancia de reutilización de frecuencias entre las células.

2.1.2.2 Principales factores y parámetros que afectan la eficiencia espectral

- 41 A pesar de que en un entendimiento general se pueda pensar que la eficiencia espectral puede ser mejorada, el hecho de implementar mejoras puede conllevar a un impacto secundario en otros factores e incluso en otras eficiencias. Por ejemplo, al implementar mejores técnicas de compresión en las señales de audio se puede transmitir mayor cantidad de señales en cierto ancho de banda, sin embargo, esto provoca una disminución en la calidad de audio debido al poco ancho de banda dedicado para la transmisión de señales.
- 42 El artículo hace mención de los siguientes factores que afectan la eficiencia espectral:
- la cantidad de canales disponibles para una región específica,
 - el desvanecimiento de la señal,
 - las características del entorno (terreno),
 - la relación portadora-interferencia,
 - la interferencia por transposición de coberturas,
 - el tráfico no homogéneo entre células,
 - las características de las antenas,
 - el control de potencia,
 - las transmisiones no continuas,
 - la selección de patrones celulares,
 - el tamaño del sistema/red, y
 - la cantidad de veces que se reúsan las frecuencias.

2.1.2.3 Comentarios del autor

- 43 Como conclusión, el artículo hace mención a lo siguiente:

“De forma general, son necesarias muchas ponderaciones en el diseño de un sistema... bajo costo, de menor tamaño, con equipos terminales ligeros, confiabilidad, universalidad y que sean escalables. Éstas pueden influenciar en la elección de las técnicas para mejorar la eficiencia espectral u otros aspectos del diseño del sistema o incluso imponer simplicidad. Las mejoras no deben imponer sofisticaciones costosas y ponderaciones indeseadas... Idealmente éstas [mejoras] deben ser opciones que los proveedores de servicio puedan adquirirlas sólo cuando sea necesario”²⁰.

(Énfasis añadido).

- 44 En otras palabras, la eficiencia espectral es consecuencia de que el concesionario ejecute mejoras tecnológicas en su infraestructura de red acordes a su plan de negocios y no así como una imposición regulatoria.

²⁰ Heeralall, Shila, "Discussion of spectrum efficiency and the factors that affect it", 1992 IEEE International Conference in Selected Topics in Wireless Communications, Canadá, 1992, pp. 413-416.

2.2 Unión Internacional de Telecomunicaciones: Rec. UIT-R SM.1046 “Definición de la Eficacia en la utilización del espectro por un sistema de radiocomunicaciones”

- 45 En virtud de “*garantizar la utilización racional, equitativa, eficiente y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones*” y considerando que “*es necesario definir el grado y la eficiencia de utilización del espectro como método de comparación y análisis para evaluar las ventajas obtenidas con el empleo de tecnologías nuevas o mejoradas, especialmente por las administraciones en la planificación nacional a largo plazo de la utilización del espectro y el desarrollo de las radiocomunicaciones*”, la UIT publicó por primera vez en 1994 la Recomendación UIT-R SM.1046-3 “*Definition of spectrum use and efficiency of a radio system*”²¹ (“la Recomendación”).

- 46 En esta recomendación se incluyen como piezas clave tres conceptos: *el factor de utilización del espectro, la eficacia de utilización del espectro (EUE) y la eficiencia relativa de utilización del espectro*, las cuales están basados en los artículos del IEEE antes mencionados. Entonces, es de esperarse que dentro de la definición de *eficiencia espectral* propuesta en la recomendación siga estando presente el concepto *espectro espacio*.

2.2.1 Factor de utilización del espectro

- 47 Debido a que el uso eficiente del espectro se logra (entre otros métodos) mediante implementaciones técnicas, por ejemplo, la directividad de la antena, la separación geográfica, la compartición de frecuencias o el uso ortogonal de frecuencias y la compartición en tiempo, la medida (factor) de utilización del espectro “U” se define como “*el producto de la anchura de banda de frecuencia por el espacio geométrico (geográfico) y por el tiempo denegado*”²² a otros usuarios potenciales”, tal y como se define a continuación:

$$U = B \cdot S \cdot T$$

Donde²³:

B: ancho de banda.

S: espacio geométrico (normalmente la superficie); puede ser un volumen, una línea o un sector angular alrededor de un punto. La cantidad de espacio depende de la densidad espectral de potencia.

T: tiempo.

²¹ UIT-R, “Recommendation UIT-R SM.1046-3 (09/2017). Definition of spectrum use and efficiency of a radio system”, *Series SM Spectrum Management*, Suiza, 2006. Consultado el 15 de febrero de 2018, disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1046-3-201709-!!!PDF-E.pdf

²² Puede expresarse también como el tiempo en el que el canal es usado.

²³ En la Recomendación no se hace mención específicamente de las unidades de la fórmula del factor de utilización. Así, queda a discreción de quien la aplique la selección de las unidades de los coeficientes, por ejemplo, establecer el ancho de banda medido en MHz, el espacio geométrico en kilómetros cuadrados, y el tiempo en días.

2.2.2 Eficiencia en el uso del espectro

- 48 La eficiencia en el uso del espectro, o *eficiencia espectral*, de un sistema de radiocomunicaciones se puede entender como una relación entre el efecto útil y el factor de utilización del espectro, el cual está dado a partir de la siguiente expresión:

$$EUE = \frac{M}{U} = \frac{M}{B \cdot S \cdot T}$$

Donde:

M: efecto útil que se consigue con el sistema de radiocomunicaciones considerado.

U: factor de utilización del espectro con dicho sistema.

2.2.3 Eficiencia relativa de utilización del espectro

- 49 Es posible comparar las eficiencias espectrales de dos sistemas similares de telecomunicaciones (que proporcionen los mismos servicios) a partir de la eficiencia de un sistema "patrón" que sirva como base de comparación. Lo anterior se define como *eficiencia relativa* y se define a partir de la siguiente expresión:

$$ERE = \frac{EUE_r}{EUE_p}$$

Donde:

ERE: eficiencia relativa del espectro, es decir, la relación entre las EUE.

EUE_p: eficiencia en el uso del espectro de un sistema *patrón*.

EUE_r: eficiencia en el uso del espectro de un sistema real.

- 50 En este caso, un modelo de sistema patrón adecuado sería aquel que fuera más eficaz teóricamente, aquel que sea definido y comprendido fácilmente o aquel que sea considerado un patrón para la industria. Si el sistema patrón elegido es el sistema más eficiente teóricamente, la ERE variará entre 0 y 1.
- 51 Expuesto lo anterior, la Recomendación sugiere lo siguiente:

1. "que, como concepto básico, se utilice el dominio combinado anchura de banda-espacio-tiempo como medida de la utilización del espectro, el factor de utilización del espectro [...] para los equipos radioeléctricos de transmisión y recepción;
2. que la base para calcular la eficiencia en el uso del espectro (EUE), o eficiencia espectral, sea la determinación del efecto útil que consiguen los sistemas de radiocomunicación mediante la utilización del espectro y factor del espectro [...]
3. que para comparar las eficiencias espectrales entre diversos sistemas de radiocomunicaciones se utilice el concepto básico de eficiencia relativa del espectro [...]
4. que las comparaciones entre las eficiencias espectrales se lleven a cabo únicamente entre tipos similares de sistemas radioeléctricos que proporcionan servicios de radiocomunicaciones [...]

5. que para determinar la EUE se consideren las interacciones de diversos sistemas y redes de radiocomunicaciones dentro de un entorno electromagnético particular”²⁴.

52 Sin embargo, la recomendación hace los siguientes contrastes respecto a lo que debe considerarse para la evaluación de la *eficiencia espectral*:

“[...] los valores de la EUE pueden calcularse para diversos sistemas y, a continuación, compararse para obtener las eficiencias relativas de dichos sistemas. Sin embargo, esas comparaciones deben realizarse con precaución. Por ejemplo, las EUE calculadas para un sistema de radiocomunicaciones móviles terrestres y un sistema de radar son muy distintas. La velocidad de transferencia de información, los receptores y los transmisores de estos dos sistemas son tan diferentes que ambas EUE no son comparables y, por consiguiente, no sería especialmente útil hacerlo. **En consecuencia, la comparación de la eficiencia en el uso del espectro debe realizarse únicamente entre sistemas similares y que proporcionen servicios de radiocomunicaciones idénticos.** Sería conveniente efectuar la comparación de la eficiencia en el uso del espectro del mismo sistema a lo largo del tiempo para observar si se produce una mejora en la zona específica estudiada.

Cabe señalar igualmente que, **aunque la EUE es un factor importante**, porque permite obtener la máxima cantidad de servicios a partir del espectro radioeléctrico, **no es el único factor que debe considerarse. Entre otros factores que deben incluirse en la elección de una tecnología están los costos del sistema, la disponibilidad de los equipos, la compatibilidad con los equipos y las técnicas existentes, la fiabilidad del sistema y las características de explotación**”²⁵.

(Énfasis añadido).

2.3 FCC, Grupo de Trabajo de Regulación del Espectro: Reporte del Grupo de trabajo de eficiencia espectral

53 A nivel internacional, las agencias encargadas de regular el Espectro poco han dicho sobre la *eficiencia espectral* y sus métodos de cuantificación, y mucho menos existe una pronunciación pública de las Administraciones sobre la adopción de normatividad que evalúe la eficiencia espectral de los servicios de radiocomunicaciones. Cabe aclarar que no es lo mismo promover el uso eficiente del espectro (derivado de un entendimiento colectivo de la palabra *eficiencia*) a que se adopte una definición concreta de *eficiencia espectral* y se establezca una metodología para cuantificar, evaluar y comparar la eficiencia espectral de los servicios de radiocomunicaciones.

54 En los Estados Unidos de América, el Grupo de Trabajo de Política Espectral (*Spectrum Policy Task Force, SPTF*) de la FCC²⁶ emitió una iniciativa pública a fin de considerar métodos para cuantificar o evaluar la eficiencia espectral de tal forma que permitieran una comparación

²⁴ UIT-R, “Recommendation UIT-R SM.1046-3 (09/2017). Definition of spectrum use and efficiency of a radio system”, *Series SM Spectrum Management*, Suiza, 2006. Consultado el 15 de febrero de 2018, disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1046-3-201709-!!!PDF-E.pdf

²⁵ *Idem*.

²⁶ FCC se refiere a la *Federal Communications Commission* de los Estados Unidos de América.

justa y significativa de los diferentes servicios de radiocomunicaciones, así como la definición y cuantificación de la *eficiencia espectral*. En noviembre de 2012 el SPTF publicó el “Reporte del Grupo de Trabajo de Eficiencia Espectral”²⁷ (el Reporte). Este Reporte expone y compara diferentes definiciones de *eficiencia espectral*, exponiendo sus ventajas y desventajas, así como recomendaciones técnicas y regulatorias a la FCC para mejorar la *eficiencia espectral*.

- 55 Dentro de este reporte, al igual que Leslie A. Berry, el SPTF consideró que la eficiencia espectral debería ser evaluada como la relación salida/entrada de un sistema que, en términos de espectro, pudiera ser expresada considerando la cantidad de información transmitida y la cantidad de espectro utilizado para obtener la salida. Sin embargo, el SPTF argumentó que (al igual que las posturas anteriormente expuestas) la *eficiencia espectral* no solamente debe involucrar la cuestión técnica, sino que además deben considerarse otras características, tales como el costo para mejorar dicha eficiencia, la cantidad de personas que son beneficiadas por el servicio y el valor del servicio mismo. En consecuencia, el SPTF desarrolló tres definiciones relacionadas con la eficiencia, las cuales se citan a continuación:

“La EFICIENCIA ESPECTRAL ocurre cuando la máxima cantidad de información (la salida) es transmitida dentro de una cantidad de espectro (la entrada), es decir, cuando la mínima cantidad de espectro es usada para transmitir una cantidad de información dada. Esto puede ser expresado como

$$\text{Eficiencia Espectral} = \frac{\text{Salida}}{\text{Espectro utilizado}}$$

La EFICIENCIA TÉCNICA ocurre cuando todas las entradas están desplegadas de cierta forma que generan la mayor salida con la mínima inversión de costo en recursos, incluyendo no solo el espectro sino también el equipo, otro capital y la mano de obra (es decir, todas las entradas). Esto puede ser expresado como

$$\text{Eficiencia Técnica} = \frac{\text{Salida}}{\text{Costo de todas las entradas}}$$

[...]

La EFICIENCIA ECONÓMICA ocurre cuando todas las entradas están desplegadas de cierta forma que generan el mayor valor para los consumidores [...] La eficiencia económica puede ser expresada como

$$\text{Eficiencia Económica} = \frac{\text{Valor de las salidas}}{\text{Costo de todas las entradas}}$$

[...] Mientras que la eficiencia espectral crea la mayor salida con la mínima cantidad de espectro y la eficiencia técnica crea la mayor salida con la mínima cantidad [sic] de todas las entradas, la eficiencia económica crea el mayor valor con la mínima cantidad [sic] de todas las entradas”²⁸.

²⁷ SPTF, “Report of the Spectrum Efficiency Working Group”, *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 15 de noviembre de 2002. Consultado el 15 de febrero de 2018, disponible en: https://transition.fcc.gov/sptf/files/SEWGFfinalReport_1.pdf

²⁸ *Idem*.

56 Para comprender la interacción entre las eficiencias, es posible citar el siguiente ejemplo:

“Un gerente de la línea de producción está enfocado en obtener la mayor cantidad de dispositivos producidos en cada cambio de turno (es decir, maximizando la salida de una entrada dada). Sin embargo, el encargado de la planta debe velar por obtener la mayor cantidad de dispositivos producidos en con el menor costo, variando el número de trabajadores, utilizando horas extra y comprando las partes más baratas para los dispositivos (es decir, maximizando la salida minimizando todos los costos). Por otro lado, el presidente de la compañía debe pensar si la línea de producción podría ser utilizada de mejor forma para hacer otro tipo de cosas en lugar de hacer dispositivos (es decir, maximizando el valor de las salidas mientras se minimizan todos los costos)”²⁹.

57 En este contexto, la eficiencia espectral, técnica y económica no solo son eficiencias que evalúan de forma separada el mayor beneficio de un sistema de radiocomunicaciones, si no que las tres forman parte de un engranaje en el cual se complementan entre sí. Inclusive, la evaluación de la eficiencia económica puede llegar a ser muy relevante, teniendo importante influencia en la eficiencia espectral y la técnica.

58 Bajo el entendimiento anterior y después de analizar algunas fórmulas de eficiencia espectral³⁰, el SPTF dedujo lo siguiente:

*“El Grupo de trabajo concluye que **no es posible ni apropiado seleccionar una métrica objetiva que pueda ser usada para comparar las eficiencias a través de los diferentes servicios de radiocomunicaciones**. Cualquier métrica proveería, inherente a sus suposiciones, ventajas para ciertos servicios y tecnologías, y desventajas para otras. Realmente el Grupo de Trabajo concluye que a pesar de las estimaciones aproximadas de la eficiencia espectral, éstas pueden ser útiles para ciertas situaciones, ya que podrían permitir hacer algunas comparaciones entre tecnologías. **Aunque no se esté adoptando una métrica, el Grupo de Trabajo sigue creyendo que es posible y prudente promover el acceso y uso eficiente del espectro**”³¹.*

(Énfasis añadido).

²⁹ SPTF, “Report of the Spectrum Efficiency Working Group”, *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 15 de noviembre de 2002. Consultado el 15 de febrero de 2018, disponible en:

https://transition.fcc.gov/sptf/files/SEWGFfinalReport_1.pdf

³⁰ *Idem*.

³¹ *Idem*.

III. DEFINICIÓN DE MÉTRICA DE EFICIENCIA ESPECTRAL POR LA UNIDAD DE ESPECTRO RADIOELÉCTRICO

3.1 Propuesta de definición de eficiencia espectral

59 Una vez analizados los puntos relevantes del Estado de la Técnica en la sección anterior, es posible notar que los conceptos de *eficiencia* y *eficacia* son usados indistintamente por muchos autores (incluso por la misma UIT); por lo anterior, es conveniente antes definir y distinguir dichos términos con claridad. Con base en la Real Academia Española, en las definiciones que establece *Oxford Reference*³² en las diferentes áreas de estudio (economía, ingeniería, ciencias sociales, etc.), así como en las fuentes mencionadas en el capítulo anterior, es posible acotar las definiciones de *eficiencia* y *eficacia* como sigue:

Eficacia: lograr un objetivo sin importar los recursos invertidos.

Eficiencia: la capacidad de obtener el máximo resultado utilizando los menos recursos posibles.

60 En consecuencia, la Unidad de Espectro Radioeléctrico (UER) considera que el término apropiado para hacer referencia al uso máximo del espectro es **eficiencia**, debido a que, por un lado, la *eficacia* busca lograr cierta finalidad sin importar la cantidad de recursos invertidos (pudiendo optimizarlos o desperdiciarlos), y, por otro lado, la *eficiencia* busca **maximizar la finalidad** valiéndose de una optimización en los recursos invertidos: tratándose de cualquier recurso escaso, como lo es el espectro, éste se debe racionar y optimizar como condición fundamental para maximizar la eficiencia.

61 Para poder explicar lo anterior y sin necesidad de citar expresiones matemáticas, el término *eficiencia* puede ser entendido como una relación simple entre la salida y la entrada de un sistema: a partir de una cierta cantidad de entrada, es posible obtener una cierta cantidad de salida. Así, un sistema será eficiente si es posible obtener la mayor cantidad de salida a partir de la menor cantidad de entrada. En el contexto del espectro radioeléctrico, el sistema es cualquier red de telecomunicaciones y/o radiodifusión; la entrada es la cantidad de espectro con el que cuenta la red para su operación y la salida, es aquella información transmitida. Más adelante se abordará y detallará que no sólo 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.

62 Ahora bien, la UER además considera que, para poder cuantificar la *eficiencia* del uso del espectro es necesario observar aquellos factores que son externos a la tecnología, tales como el marco regulatorio, el entorno socioeconómico en el cual los servicios son prestados y la calidad con la que éstos son ofertados. Entre los aspectos distintos a los tecnológicos, se encuentran aquellos que intervienen en la valuación socioeconómica del espectro; considerando, por ejemplo, las diferentes alternativas para la atribución y asignación de frecuencias a determinados servicios, tipos de concesiones y modalidades de uso; así como

³² OXFORD University Press, "Oxford Reference", Reino Unido, 2017. Consultado el 15 de febrero de 2018, disponible en: <http://www.oxfordreference.com/>

la ponderación de los objetivos de política pública en la provisión de servicios de telecomunicaciones y radiodifusión. Asimismo, desde el punto de vista de la teoría económica, podrían abarcarse otras dimensiones de eficiencia, tales como la eficiencia productiva, asignativa, distributiva y dinámica, entre otras; por lo que es necesario que la eventual regulación sobre las métricas de eficiencia espectral que se emita en el futuro, se acoten claramente qué aspectos, tanto técnicos como de otra índole, formarán parte de dichas métricas. En los siguientes numerales se explica el porqué de la consideración de dichos factores.

3.1.1 El marco regulatorio

- 63 De forma general, para poder hacer un uso, aprovechamiento y explotación del espectro, es necesario que los tenedores del espectro cuenten con un título de concesión el cual les otorga el derecho para utilizar una cierta cantidad de espectro para la prestación de sus servicios durante un tiempo determinado (vigencia de la concesión) y dentro de un área geográfica delimitada (cobertura autorizada en el título habilitante). Dicho título de concesión no sólo faculta al concesionario para la utilización del espectro, sino que además contiene las características técnicas del cómo éste debe operar sus servicios y otras obligaciones de carácter administrativo y regulatorio a las cuales se deberá sujetar.
- 64 Cabe mencionar que los títulos habilitantes que otorgan derechos para el uso del espectro han sido otorgados al amparo de marcos jurídicos distintos a lo largo de los años, lo que ha derivado en la existencia de diferentes tipos de títulos habilitantes bajo figuras tales como como permisos, autorizaciones, asignaciones o concesiones, los cuales contienen condiciones de operación y obligaciones diversas. Algunas de estas condiciones pudieran interpretarse como *limitantes* para maximizar la explotación del espectro, imposibilitando al concesionario a explotar el espectro incluso aún más. Por ejemplo, es común encontrar que un concesionario sólo estuviese habilitado para prestar un servicio (de entre varios posibles) a través de las bandas de frecuencias concesionadas (por ejemplo, explotar el servicio fijo pero no el móvil) o bien, tener impuestas ciertas limitantes regulatorias para poder migrar hacia tecnologías o servicios más eficientes (por ejemplo, el caso de servicios MMDS³³ contra los servicios de banda ancha en la banda de 2.5 GHz).
- 65 Adicionalmente, algunas disposiciones administrativas de carácter general (como las Normas Oficiales Mexicanas o las Disposiciones Técnicas) influyen en cómo los concesionarios prestan sus servicios, dado que en éstas frecuentemente se establecen parámetros técnicos de operación de los servicios³⁴ o los equipos y dispositivos. Por lo anterior, existe una estrecha relación en qué tanto un concesionario puede hacer un uso eficiente del espectro y las especificaciones técnicas contenidas en las disposiciones administrativas de carácter general.

66

³³ MMDS. - Acrónimo para el Servicio de Distribución Multipunto por Microondas (del inglés *Microwave Multipoint Distribution Services*); servicio que fue ampliamente utilizado para la prestación de servicios de televisión restringida en la banda de 2.5 GHz. Dicha banda posteriormente fue más útil para la prestación de servicios de banda ancha.

³⁴ Por ejemplo, véase la "Disposición Técnica IFT-013-2016: Especificaciones y requerimientos mínimos para la instalación y operación de estaciones de televisión, equipos auxiliares y equipos complementarios", disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5468230&fecha=30/12/2016

Por otro lado, existen disposiciones administrativas de carácter general de nueva creación, publicadas posteriormente a la emisión de ciertos títulos de concesión que habilitan al concesionario, a través de condiciones técnico-operativas, para realizar un uso más *eficiente* del espectro. Dicho de otra forma, existen instrumentos regulatorios de diversa índole que, de forma directa, afectan en cómo los concesionarios utilizan el espectro. Entre otros, se pueden citar, por ejemplo, los Lineamientos Generales sobre la Autorización de Arrendamiento de Espectro Radioeléctrico, los Lineamientos Generales para el Acceso a la Multiprogramación, o la Política para la Transición a la Televisión Digital Terrestre.

3.1.2 Aspectos socioeconómicos

- 67 Previamente a la obtención de su título de concesión y considerando el análisis de la competencia en el mercado, el concesionario debe tener establecido un proyecto de negocios a corto, mediano y largo plazo, el cual podría, de forma intrínseca y no intencionada, mermar o mejorar el uso eficiente del espectro, dependiendo de los tiempos para el despliegue de la infraestructura, la tecnología a desplegar y los cambios, mejoras o actualizaciones tecnológicas que desarrolle a lo largo de la vida de la concesión.
- 68 Además, por cuestiones de rentabilidad de negocio, los concesionarios generalmente despliegan sus redes únicamente en una porción del área total de cobertura que tienen asignada en sus títulos de concesión, dado que en esa porción es donde se encuentra concentrada la mayor cantidad de suscriptores o audiencia potenciales, lo que les permitirá recuperar la inversión en su red y obtener una renta por la prestación de los servicios. Desde el punto de vista de maximizar las utilidades, los concesionarios tienen pocos o nulos incentivos para atender el resto de su cobertura. Esto se traduce en el despliegue de infraestructura en los núcleos poblacionales económicamente atractivos (regiones urbanas generalmente), dejando a un lado otras zonas, las cuales en su mayoría se encuentran ubicadas en regiones geográficas de difícil acceso y con población altamente dispersa. Por otro lado, por cuestiones de capital, el concesionario podría preferir desplegar tecnologías de bajo costo, las cuales no necesariamente son espectralmente más eficientes, pero sí las que les permiten desplegar de forma “suficiente” sus servicios y que les garantiza cierta rentabilidad.
- 69 Bajo este orden de ideas, también es posible que existan ciertos concesionarios que brinden cobertura en zonas de difícil acceso; para estos casos, el valor de la conectividad que proveen los concesionarios a la población ante el regulador cobra una mayor relevancia, ya que éstos brindan la única forma de conectividad que cuentan las comunidades para poder acceder a la prestación de los servicios de telecomunicaciones y/o radiodifusión. Un reflejo de esta problemática está presente en las condiciones de cobertura en los actuales títulos de concesión, así como en las bases de diversas licitaciones.
- 70 En el mismo sentido, es frecuente que en zonas y poblaciones rurales o de difícil acceso, no exista una oferta amplia de servicios inalámbricos, encontrándose solo un proveedor disponible en muchos casos; por lo que este proveedor, al no tener competidores en esos mercados, no tendrá incentivos para implementar mejoras tecnológicas en su red o para brindar servicios de mayor calidad, lo que contribuiría a un uso más eficiente del espectro.

3.1.3 Aspectos de calidad

- 71 Debido a la mejora y evolución de las características técnicas en la interfaz de aire (métodos de compresión de señales, técnicas de acceso al medio, esquemas de modulación, etc.), es posible transmitir cada vez mayor cantidad de información por canal espectral, logrando así aumentar la eficiencia en el uso del espectro. Sin embargo, existe un umbral (dependiente del sistema de radiocomunicaciones) en el cual es posible delimitar hasta dónde se deben implementar dichos parámetros técnicos. De no observar este umbral, las señales transmitidas (y con ellas la información que se transmite), pueden experimentar problemas
- 72 en su recepción y/o en la decodificación de la información, provocando así desde la degradación en el enlace radioeléctrico hasta el “corte de la señal”. En este sentido, el receptor percibe la señal con una “baja” calidad, información con errores, ilegible, o simplemente no percibe señal alguna. Por lo anterior, el hacer un uso eficiente del espectro mediante las técnicas antes expuestas no es sinónimo de degradar la calidad de las señales, sino que se debe proponer un umbral en el cual esté equilibrada la relación del uso eficiente del espectro y la calidad de la señal en la transmisión.

En este sentido, por ejemplo, en los “Lineamientos Generales para el Acceso a la Multiprogramación”³⁵ 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 multiprogramar.

- 73 Dicho lo anterior, la UER propone definir a la a 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.

*Dicha capacidad es dependiente de las características tecnológicas, regulatorias y del entorno socioeconómico relacionadas con el servicio de telecomunicaciones o radiodifusión de que se trate.

3.2 Definición de la Métrica Integral de Eficiencia Espectral (MIDEE)

- 74 Para poder utilizar a la Eficiencia Espectral (EE) como una herramienta útil que permita cuantificar y evaluar el uso eficiente del espectro entre diversos tipos de servicios, es

³⁵ 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

necesario que las métricas atiendan los siguientes principios: *objetividad, precisión, verificación y temporalidad*. Así, la métrica debe ser:

- *Objetiva*: aquellos factores que contemple la fórmula deben estar basados en los hechos y en la lógica, y no así en argumentos subjetivos y/o arbitrarios;
- *Precisa*: para lograr la cuantificación de la eficiencia espectral debe existir una fórmula para tal propósito, la cual sea obtenida a través de una metodología clara, cuya aplicación no dé lugar a confusión, discrecionalidad o ambigüedad tanto para el Instituto como para los regulados;
- *Verificable*: debe existir un mecanismo por parte del Instituto que permita al concesionario verificar que el cálculo de la fórmula se haya realizado de forma transparente y, sobre todo, que la información proporcionada por el concesionario para el cálculo de la métrica pueda ser corroborada o verificada por el Instituto.
- *Temporal*: debido al dinamismo de la tecnología, la sociedad y los mercados, así como a la constante evolución de los servicios de radiocomunicaciones, una métrica nunca será perpetua, por lo que ésta debe revisarse periódicamente y, en su caso, modificarse para evitar que se vuelva obsoleta.

75 Bajo este tenor, la UER propone las siguientes definiciones:

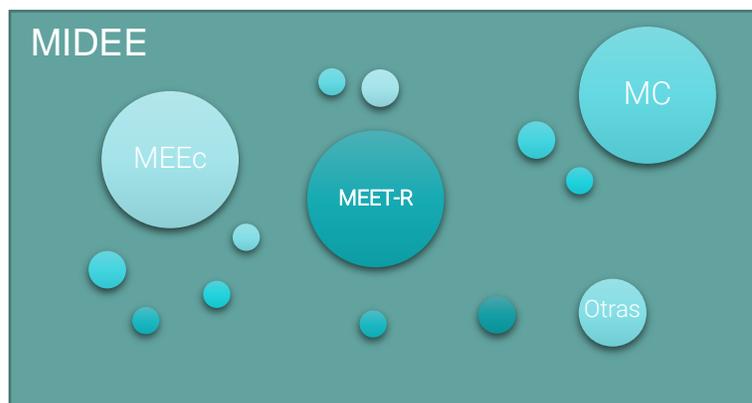
***Métrica:** conjunto de consideraciones cualitativas y/o cuantitativas, utilizadas para medir, comparar y/o dar seguimiento a un objetivo.*

***Metodología:** el procedimiento para lograr un objetivo.*

76 Ahora bien, la EE, como ya se ha mencionado, se ve influenciada por tres factores: el marco regulatorio aplicable, el entorno socioeconómico y la calidad en las comunicaciones. Por lo anterior, aquella métrica que mida de forma unificada los factores antes descritos será una métrica integral. En tal sentido, la UER propone la siguiente definición:

Métrica Integral de Eficiencia Espectral (MIDEE): conjunto de submétricas, compuestas de consideraciones cualitativas y/o cuantitativas, utilizadas para medir, comparar y dar seguimiento a la eficiencia espectral.

77 Adicionalmente, la UER contempla que la MIDEE, a su vez, esté compuesta por al menos tres submétricas, las cuales son: la Métrica de Eficiencia Espectral Técnico-Regulatoria (MEET-R), la Métrica de Eficiencia Económica (MEEc) y la Métrica de Calidad (MC), ejemplificado en la siguiente figura:



78 Dentro del ámbito de atribuciones de la UER, es posible definir la siguiente submétrica:

Métrica de Eficiencia Espectral Técnico-Regulatoria: es un 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.

- 79 En cuanto a la MC, al ser ésta afectada de forma directa por los aspectos técnicos de la red del concesionario, podría estar incluida dentro de la MEET-R. Por otro lado, la MC también podría incorporar aspectos subjetivos de percepción del usuario final, siempre que cuenten con una metodología de medición establecida. Por ejemplo, la "Recomendación UIT-R BS.1387-1. Método para mediciones objetivas de la calidad de audio percibida"³⁶ establece todo 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.
- 80 Por otro lado, la MEEc pudiera considerar aspectos que relacionen cuestiones sociodemográficas e indicadores económicos de las áreas que son servidas por un determinado servicio, incluyendo la cantidad de oferentes del mismo tipo servicio en esa área, para con ello establecer una métrica que revele, desde el punto de vista económico, la eficiencia con la que se utiliza el espectro radioeléctrico, posiblemente privilegiando otros aspectos tales como el beneficio que se aporta en regiones o en zonas con un mayor índice de marginación o con carencia de oferta de servicios, en aras de promover la existencia de servicios en aquellas zonas geográficas en las que actualmente no cuentan con éstos. Otro ejemplo sería que la MEEc evaluara de forma diferente a los concesionarios del mismo servicio con base en la región³⁷ en la que tengan desplegada su infraestructura. Lo anterior, debido a las diferencias socioeconómicas que existen entre las entidades federativas que integran las regiones celulares.

³⁶ Para mayor información, consúltese en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1387-1-200111-!!!PDF-S.pdf

³⁷ Para la asignación de concesiones de algunos servicios de telecomunicaciones, el país fue dividido en 9 regiones, conocidas como regiones celulares o regiones PCS.

IV. CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN DE LA MÉTRICA INTEGRAL DE EFICIENCIA ESPECTRAL

81 En esta sección se abordan varios aspectos que es necesario considerar en la definición y evaluación de una métrica de eficiencia espectral.

4.1 Sobre la reserva de espectro de los concesionarios

82 Tal y como se mencionó anteriormente, antes de la obtención del título habilitante, los concesionarios cuentan con un modelo de negocio diseñado a corto, mediano y largo plazo para el despliegue de su red. Por lo anterior, existe la posibilidad de que el concesionario no utilice todo el ancho de banda asignado desde el inicio de la vigencia de su concesión; toda vez que, dependiendo de tipo de servicio, los objetivos de cobertura y el tiempo que conlleva el despliegue de sitios, desde la adquisición o arrendamiento de predios, obtención de permisos, suministro e instalación de equipos, etc.; la ocupación efectiva del ancho de banda asignado dentro de la cobertura concesionada se daría de forma paulatina, conforme se va desarrollando el despliegue de las redes.

83 Por otra parte, existe la posibilidad de que en el modelo de negocios del concesionario se contemple reservar capacidad espectral disponible, ya sea para futuras implementaciones en su propia red, para un negocio basado en el arrendamiento de espectro o, incluso, para un servicio distinto (dentro de los que tiene habilitados en la concesión de espectro). Así, al valorar la eficiencia espectral asociada a este concesionario, es posible que haya diferencias importantes respecto de otros concesionarios que oferten el mismo tipo de servicio, debido a que tiene una porción de espectro “sin utilizar”. Asimismo, existen concesiones de espectro cuyo servicio es la “provisión de capacidad” para que terceros acudan al concesionario y le contraten canales o ancho de banda de manera individual, por lo que el concesionario proveedor de capacidad tendrá espectro sin utilizar hasta en tanto un tercero acuda a él para aprovechar dicho recurso.

4.2 Sobre la protección del principio de neutralidad tecnológica en el momento de la aplicación de las métricas

84 Como es sabido, uno de los ejes rectores que tiene el Instituto es el de velar por el principio de neutralidad tecnológica, es decir, que el Instituto no imponga que los concesionarios adopten una tecnología o estándar específico para el despliegue de sus servicios. Bajo este principio, es posible que, para la prestación de un servicio, los concesionarios utilicen diferentes tecnologías entre ellos mismos e incluso utilicen diferentes tecnologías dentro de su propia red, siempre y cuando garanticen la interoperabilidad de las comunicaciones y los niveles de calidad definidos. Lo anterior con base en la planeación del modelo de negocio y los costos de inversión destinados para el despliegue del servicio que los concesionarios hayan determinado. Así, por ejemplo, dentro de una banda en específico pueden existir dos concesionarios los cuales presten los mismos servicios a través de dos tecnologías diferentes, cada una con diferentes eficiencias espectrales.

85 En un caso más concreto, para el servicio de acceso inalámbrico móvil en la banda de 850 MHz, los concesionarios pueden proporcionar servicios a través de diferentes tecnologías celulares: 2G, 3G y 4G; donde estas tres pueden converger en una misma región geográfica

o estar divididas de acuerdo a la localidad en la que el concesionario presta el servicio. Debido a las técnicas de acceso al medio, así como el ancho de banda ocupado, la tecnología 4G (LTE) es espectralmente más eficiente que el resto (2G y 3G). Sin embargo, en qué grado está desplegada una tecnología u otra por cada concesionario, depende de sus modelos de negocios, su capacidad de inversión y sus planes a corto, mediano y largo plazo.

4.3 Sobre la consideración del GoS en las métricas

- 86 Existen algunos servicios de telecomunicaciones que están diseñados para operar con un determinado Grado de Servicio (GoS, por sus siglas en inglés). Este GoS define un nivel de conectividad al usuario final. Por ejemplo, para redes de seguridad pública y misión crítica, el GoS debe ser al menos de 95%, lo cual significa que cuando un equipo terminal busque acceder a la red, ésta deberá estar disponible al menos el 95% del tiempo. Así, mientras mayor sea el GoS, menor tiempo tendrá que esperar el usuario final para poder entablar una comunicación. Además, las redes deben estar diseñadas para soportar eventualidades que demanden grandes cantidades de tráfico en situaciones de emergencia.
- 87 Sin embargo, para poder lograr un alto GoS y además brindar robustez a la red contra una alta demanda de tráfico, es necesario que ésta cuente con una mayor cantidad de espectro (en comparación con una red diseñada para un fin comercial). Bajo este contexto, se tiene el caso del segmento 806-814/851-859 MHz, el cual es utilizado por sistemas de radiocomunicaciones destinados a las aplicaciones de seguridad pública y misión crítica, pertenecientes a las entidades federales, estatales y municipales³⁸. Algunos de los usuarios de esta banda de frecuencias están habilitados para operar a nivel local y otros a nivel nacional. Bajo este contexto, ciertas bandas del espectro son reservadas a nivel nacional para la prestación de este tipo de servicios, sin embargo, no siempre existen casos de emergencia. Además, no en todas las entidades federativas se tienen desplegados efectivamente este tipo de sistemas de radiocomunicaciones y la probabilidad de su congestión de tráfico es baja.

4.4 Sobre la implementación de las métricas en los títulos de concesión

- 88 Como se ha mencionado anteriormente, las métricas de eficiencia espectral pudieran comenzar a aplicarse en un determinado momento después de que el concesionario haya obtenido su título de concesión. De igual forma, es posible que se establezcan umbrales mínimos de referencia que los concesionarios deberían observar para los servicios que el Instituto determine.
- 89 Para el caso de concesiones de bandas de frecuencias que implican la instalación o despliegue de nuevas redes o estaciones, el Instituto debe determinar cuáles serán los mecanismos a través de los cuales se establecerá la observancia de las métricas, donde una de las vías podría ser mediante la inclusión de una obligación *ex profeso* en los títulos de concesión. De ser este el caso, el regulador deberá especificar con claridad cual es el umbral mínimo de eficiencia espectral a cumplir por parte de los concesionarios y ser establecido a través de una obligación dentro de los nuevos títulos de concesión, a fin de observar su

³⁸ IFT, "ACUERDO MEDIANTE EL CUAL EL PLENO DEL INSTITUTO FEDERAL DE TELECOMUNICACIONES APRUEBA EL PLAN DE LA BANDA 806-824/851-869 MHz Y APRUEBA LA PROPUESTA DE CAMBIO DE BANDAS DE FRECUENCIAS A LAS PERSONAS FÍSICAS O MORALES, QUE SEAN TITULARES DE DERECHOS SOBRE EL USO, APROVECHAMIENTO Y EXPLOTACIÓN DE LA BANDA DE FRECUENCIAS 806-824/851-869 MHz", *Diario Oficial de la Federación*, México, 2016. Consultado el 15 de febrero de 2018, disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5452357&fecha=13/09/2016

cumplimiento a partir de un plazo determinado previamente, posterior al cual el Instituto procedería a verificar la eficiencia espectral del concesionario.

4.5 Sobre la consideración de los servicios finales en el cálculo de las métricas

- 90 Como se expuso en el capítulo II, entre los factores que pudieran ser incluidos en las métricas involucran el área de cobertura, la cantidad de usuarios que utilizan el servicio, la cantidad de espectro utilizado, etc. Sin embargo, en el caso de los servicios de acceso inalámbrico móvil, además de brindar al usuario final el servicio de voz, también prestan el servicio de datos y de mensajes cortos. Por lo anterior, este cúmulo de servicios prestados a través del servicio de acceso inalámbrico móvil resultan en un uso más eficiente dado que se está explotando el espectro concesionado con más servicios para el usuario final. Por otra parte, el nicho de mercado del servicio *trunking* está basado en comercializar principalmente el servicio de voz; sin embargo, actualmente existen concesionarios ofertando también el servicio de datos (mensajes cortos, transferencia de imágenes y descarga y carga de videos de baja resolución), logrando así explotar y diversificar la utilización del espectro.
- 91 Al crear una métrica que esté formulada con la cantidad de servicios que cuenta el concesionario para el usuario final, podría tener efectos negativos en el libre desarrollo de los mercados de las telecomunicaciones y la radiodifusión debido a que, de cierta forma, se estaría sesgando el rumbo de la oferta de los servicios de telecomunicaciones y radiodifusión, sin contar que, incluso paralelamente también se estaría en riesgo de sesgar qué tecnologías deberían adquirir los concesionarios para poder brindar los servicios establecidos en las métricas.
- 92 Además, aunque los concesionarios presten el mismo servicio de radiocomunicaciones dentro de una banda de frecuencias en común, sus nichos de mercado podrían ser totalmente diferentes entre sí. Por ejemplo, un concesionario "A" podría dar únicamente el servicio de voz en una zona rural, y el concesionario "B" dar servicio de voz y datos en una zona metropolitana. Entonces, si el Instituto establece que la métrica está compuesta de la evaluación del servicio de voz y datos, en aras de cumplir con los servicios establecidos en la métrica, el concesionario "A" tendría que desplegar nueva tecnología para poder ofrecer también el servicio de datos, aunque éste no sea su nicho de mercado y cuyo retorno de inversión difícilmente se recuperaría dentro del tiempo que dure su concesión.

4.6 Sobre la obtención de información necesaria para el cálculo de las métricas

- 93 Como se explicó en el capítulo II, los factores que pueden estar incluidos en las métricas pueden ser diversos entre los servicios a medir. Para estar en condiciones de poner en marcha la evaluación de las MEE y proceder a sus cálculos, el Instituto debe contar con los insumos de información necesarios para tal propósito (por ejemplo, cantidad de usuarios servidos, cobertura por unidad de área, cantidad de espectro concesionado, cantidad de espectro concesionado no utilizado, tecnología(s) implementada(s), etc.).
- 94 Sin embargo, mucha de la información necesaria para el cálculo de las métricas es desconocida por el Instituto y, a pesar de que el Instituto tiene atribuciones para solicitar información a los concesionarios sobre su red, se debe establecer un mecanismo de recolección de información para asegurar certidumbre, comparabilidad y transparencia en la evaluación de las métricas, tanto para los concesionarios como para el Instituto y cuya

obtención, organización, procesamiento y forma de reportar, sea lo menos onerosa y compleja posible, de manera tal que los mecanismos de obtención de información no signifiquen un esfuerzo que resulte en altos costos para los regulados, o se solicite información y datos que no contribuyan de forma directa a la cuantificación de la eficiencia espectral.

4.7 Sobre la aplicación de las métricas en la figura de los OMV

- 95 Dentro de los “Lineamientos para la Comercialización de Servicios Móviles por Parte de Operadores Móviles Virtuales”³⁹ se establecen los términos y condiciones del cómo los Concesionarios Mayoristas Móviles (CMM) podrán prestar los servicios mayoristas⁴⁰ a los Operadores Móviles Virtuales (OMV). De forma general, el CMM debe garantizar al OMV lo siguiente:
1. Brindar la infraestructura técnica necesaria al OMV para la prestación de los servicios.
 2. Mantener informado al OMV acerca de las medidas y acciones implementadas para la gestión de tráfico y administración de la red.
 3. Proporcionar aquella información generada por los usuarios relativa al tráfico, así como todos los datos e indicadores de desempeño y mediciones necesarias para que el OMV pueda cumplir con la prestación eficiente de los servicios móviles.
- 96 Además, el CMM y el OMV podrán acordar aspectos adicionales o complementarios que permitan la prestación eficiente de los servicios móviles⁴¹. Asimismo, los lineamientos en mención contemplan que los OMV serán responsables ante el usuario final por la prestación de los servicios ofertados.
- 97 Por otro lado, dichos lineamientos contemplan que el contrato que se celebre entre el CMM y el OMV deberá establecer los esquemas de responsabilidad que determinen al sujeto responsable frente a una de las acciones o mecanismos comprendidos que impliquen las obligaciones frente a la autoridad (el Instituto). De igual modo, en el contrato se deberá establecer una cláusula en la cual el CMM garantice la calidad contratada por el OMV, por lo menos, bajo las mismas condiciones que ofrece a sus usuarios finales, asegurando el cumplimiento de los parámetros de calidad establecidos en las disposiciones aplicables en la materia.
- 98 Con base en lo anteriormente descrito, puede inferirse que los OMV contribuyen de manera positiva al uso eficiente del espectro. Si bien el CMM es el encargado de proporcionar los recursos de infraestructura al OMV, éste último es el responsable de la calidad de la prestación del servicio ante el usuario final, lo que implica que el OMV es co-responsable de la calidad en la prestación de los servicios y por ende, en el uso eficiente del espectro.

³⁹ IFT, “ACUERDO mediante el cual el Pleno del Instituto Federal de Telecomunicaciones emite los Lineamientos para la comercialización de servicios móviles por parte de operadores móviles virtuales”, *Diario Oficial de la Federación*, México, 2016. Consultado el 15 de febrero de 2018, disponible en:

http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5429202&fecha=09/03/2016

⁴⁰ Servicio Móvil que consiste en el suministro de acceso a elementos individuales, a capacidades técnicas, económicas, operativas y comerciales de una red o servicios, incluyendo los de interconexión, que son utilizados por Operadores Móviles Virtuales para proveer dichos servicios a los usuarios finales móviles.

⁴¹ Servicio de telecomunicaciones prestado a usuarios finales móviles, que de acuerdo a los títulos de concesión y autorizaciones correspondientes se presta a través de Equipos Terminales Móviles que no tienen una ubicación geográfica determinada.

- 99 Tal como lo indican los lineamientos, la cláusula en la cual se determine el sujeto responsable ante la autoridad debe estar convenida entre el CMM y el OMV. En este orden de ideas, las MEE serán de observancia obligatoria, lo cual las hace parte de lo que el CMM y OMV deban estipular en su contrato.

4.8 Sobre la aplicación de las métricas de eficiencia espectral para concesionarios que implementen tecnologías oportunistas del espectro

- 100 Actualmente se están desarrollando tecnologías para ofertar servicios de banda ancha, las cuales se caracterizan por transmitir en segmentos de espectro “disponibles”, es decir, segmentos sobre los que no se está prestando ningún servicio en determinado espacio y/o tiempo. Este tipo de tecnologías generalmente operan con apoyo de una base de datos dinámica (con un software específico que procesa los datos), que permita al dispositivo transmisor y receptor conocer con qué potencia y en qué frecuencia se pueden comunicar. El periodo de transmisión/recepción puede ser muy corto (del orden de milisegundos) o constante (como tradicionalmente se hace).
- 101 Debido a que este tipo de tecnologías pueden abarcar un amplio rango de espectro, transmitir y recibir información en espectro libre, e inclusive transmitir en bandas concesionadas bajo un esquema de no interferencia, resulta necesario analizar si este tipo de tecnologías y esquemas de uso compartido del espectro pueden incidir en la determinación de la métrica y en qué medida. Asimismo, es conveniente delimitar la responsabilidad de los concesionarios en cuanto al posible uso del espectro por parte de usuarios que no necesariamente forman parte de su red, y por ende, el concesionario no tiene control alguno sobre la calidad y continuidad de servicios proporcionados mediante técnicas de acceso oportunista al espectro.

4.9 Sobre la viabilidad de definir las métricas

- 102 Como ya se ha mencionado anteriormente, el cálculo de la EE es logrado a partir de la aplicación de una fórmula y su metodología relacionada, cuyos parámetros no están hasta ahora definidos. En este orden de ideas, el Instituto deberá considerar que para la definición de los factores que formarán parte de las métricas, éstos no deberán ser en extremo complejos y/o costosos de obtener por parte de los concesionarios. Además, actualmente existen concesionarios del mismo tipo de servicio que operan bajo condiciones y obligaciones regulatorias diferentes entre sí. Por lo tanto, cuando se desee aplicar la métrica para evaluar determinados servicios, el valor de la métrica podría no arrojar resultados comparables entre algunos de los concesionarios, además de que posiblemente la métrica no estaría diseñada para evaluar a todos los concesionarios del servicio por igual.

4.10 Sobre la aplicación de las métricas para los concesionarios públicos, sociales y privados

- 103 Los concesionarios de uso público, social y privado pueden enfrentar un panorama de escases de recursos económicos, dado que no les es permitido prestar servicios con fines de lucro, ni compartir el espectro radioeléctrico con terceros⁴². En este orden de ideas, la LFTR no excluye a los concesionarios de uso social, público o privado de la aplicación de las métricas de uso eficiente del espectro. Como se ha explicado anteriormente, una forma de

⁴² Con excepción de lo previsto en el segundo párrafo del Artículo del Artículo 83 de la LFTR.

mejorar la EE por parte de los concesionarios es por medio de la actualización tecnológica de su infraestructura de red, la cual pudiera traducirse en una cuantiosa inversión económica y llegar a ser muy difícil de cubrir por parte de los concesionarios de uso público y social. Asimismo, existen pocos o nulos incentivos para que un concesionario de uso privado actualice la tecnología de su red, además de que en este tipo de concesiones no se prestan servicios al público, sino que atienden a necesidades particulares y específicas de este tipo de usuarios.

4.11 Sobre la consideración de la multiprogramación como factor en la métrica de eficiencia espectral de los servicios de radiodifusión

- 104 Como resultado del proceso de la transición a la Televisión Digital Terrestre (TDT), actualmente los concesionarios pueden implementar la multiprogramación, la cual consiste en poder transmitir más de un canal de programación (contenido audiovisual) en un ancho de banda de 6 MHz, la cual es definida en los *“Lineamientos Generales para el Acceso a la Multiprogramación”*⁴³. Cabe señalar que el acceso a la multiprogramación para los concesionarios es opcional para quienes deseen implementarla, siempre que se cumpla con las condiciones técnicas para la transmisión de señales como son el formato de compresión y las tasas de transferencia (para contenido en alta definición y en definición estándar).

- 105 De manera similar, para el caso del servicio de radiodifusión sonora en FM, existe la posibilidad para los concesionarios de implementar la radio digital híbrida mediante la tecnología IBOC⁴⁴, lo cual habilita que en una estación de radio FM que ocupa 400 kHz de ancho de banda, se puedan multiprogramar hasta 4 canales digitales de alta definición adicionales al canal analógico. Sin embargo, a pesar de que tanto la multiprogramación para el servicio de televisión radiodifundida como el utilizar la tecnología IBOC para el servicio de radiodifusión sonora son de carácter opcional para los concesionarios, es evidente que su implementación en las estaciones de radiodifusión de los concesionarios incide en un uso más eficiente del espectro.

⁴³ 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

⁴⁴ IBOC: Acrónimo del inglés “*In Band On Channel*”, estándar adoptado en México para la radio digital, de conformidad con el “ACUERDO por el que se adopta el estándar para la radio digital terrestre y se establece la política para que los concesionarios y permisionarios de radiodifusión en las bandas 535-1705 kHz y 88-108 MHz, lleven a cabo la transición a la tecnología digital en forma voluntaria”, *Diario Oficial de la Federación*, México, 2011. Consultado el 15 de febrero de 2018, disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5196204&fecha=16/06/2011

REFERENCIAS

1. Berry, Leslie A., "Output Oriented Measures of Spectrum Efficiency", *IEEE 1976 International Symposium in Electromagnetic Compatibility*, Estados Unidos, 1976.
2. Berry, Leslie A., "Spectrum Metrics and Spectrum Efficiency: Proposed Definitions", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-19, no. 3, Estados Unidos, 1977.
3. Cofetel, "EL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO EN MÉXICO. ESTUDIO Y ACCIONES. Más y mejor espectro para Banda Ancha", *Instituto Federal de Telecomunicaciones*, México, 2013. Consultado el 15 de febrero de 2012, disponible en: <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/espectro-radioelectrico/el-espectro-radioel-ctrico-en-mexico.estudio-y-acciones-final-consulta.pdf>
4. Heeralall. Shila, "Discussion of spectrum efficiency and the factors that affect it", *1992 IEEE International Conference in Selected Topics in Wireless Communications*, Canadá, 1992.
5. IFT, "ACUERDO MEDIANTE EL CUAL EL PLENO DEL INSTITUTO FEDERAL DE TELECOMUNICACIONES APRUEBA EL PLAN DE LA BANDA 806-824/851-869 MHz Y APRUEBA LA PROPUESTA DE CAMBIO DE BANDAS DE FRECUENCIAS A LAS PERSONAS FÍSICAS O MORALES, QUE SEAN TITULARES DE DERECHOS SOBRE EL USO, APROVECHAMIENTO Y EXPLOTACIÓN DE LA BANDA DE FRECUENCIAS 806-824/851-869 MHz", *Diario Oficial de la Federación*, México, 2016. Consultado el 15 de febrero de 2018, disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5452357&fecha=13/09/2016
6. IFT, "ACUERDO mediante el cual el Pleno del Instituto Federal de Telecomunicaciones emite los Lineamientos para la comercialización de servicios móviles por parte de operadores móviles virtuales", *Diario Oficial de la Federación*, México, 2016. Consultado el 15 de febrero de 2018, disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5429202&fecha=09/03/2016
7. IFT, "ACUERDO por el que se adopta el estándar para la radio digital terrestre y se establece la política para que los concesionarios y permisionarios de radiodifusión en las bandas 535-1705 kHz y 88-108 MHz, lleven a cabo la transición a la tecnología digital en forma voluntaria", *Diario Oficial de la Federación*, México, 2011. Consultado el 15 de febrero de 2018, disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5196204&fecha=16/06/2011
8. 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
9. OXFORD University Press, "Oxford Reference", Reino Unido, 2017. Consultado el 15 de febrero de 2018, disponible en: <http://www.oxfordreference.com/>
10. Presidencia de la República, "Pacto por México", México, 2012. Consultado el 15 de febrero de 2012, disponible en: <http://pactopormexico.org/PACTO-POR-MEXICO-25.pdf>
11. SPTF, "Report of the Spectrum Efficiency Working Group", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 15 de noviembre de 2002. Consultado el 15 de febrero de 2018, disponible en: https://transition.fcc.gov/sptf/files/SEWGFinalReport_1.pdf

12. Sviridenko, Serge S., "Spectrum Utilization Problems", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-19, no. 3, Suiza, 1977.
13. UIT, *Reglamento de Radiocomunicaciones. Artículos*, Suiza, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Vol. I, 2016.
14. UIT-R, "Recommendation UIT-R SM.1046-3 (09/2017). Definition of spectrum use and efficiency of a radio system", *Series SM Spectrum Management*, Suiza, 2006. Consultado el 15 de febrero de 2018, disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1046-3-201709-I!!PDF-E.pdf



Insurgentes Sur #1143, Col. Nochebuena,
CP. 03720. Delegación Benito Juárez,
Ciudad de México, México.

