

El despacho y la curva de duración de carga del sistema eléctrico interconectado, en el contexto hipotético del escenario 450ppm de la IEA

M. en Ing. Carlos Villanueva Moreno
CVMConsultor
Jubilado de la CFE y de la UNAM

Resumen

Se presenta el concepto de curva anual de duración de carga del sistema interconectado nacional, que mediante un procedimiento de cuadratura se convierte en un diagrama de 3 bloques: uno para la carga base que se presenta en las 8,760 horas del año; otro para la carga de intermedia, arriba de la mínima que ocurre en un número variable de horas del año; y otro para la demanda de punta que solo ocurre unas pocas horas del año.

Los datos de la tabla de la capacidad y generación de energía eléctrica en el año 2014, según el Anexo A del documento "**Mexico Energy Outlook**" de la Agencia Internacional de Energía (IEA), se convierten en un diagrama de bloques ajustados a la curva anual de duración de carga de ese año.

Se repite el procedimiento con los datos de la capacidad y generación de energía eléctrica proyectados por la IEA al año 2030 y al año 2040, según el **escenario 450ppm**, que es el que considera necesario alcanzar para estabilizar la concentración de CO₂ en la atmósfera en 450 partes por millón y lograr que el incremento de la temperatura global del planeta no exceda de 2°C, respecto a los niveles preindustriales.

A continuación, se tabulan por tipo de tecnología los mismos datos de capacidad y generación proyectados por la IEA al año 2040, agrupadas ahora dentro de los bloques de base, intermedia y punta de la curva anual de duración carga de ese año, y ordenadas de acuerdo con su factor de planta, indicativo de su disponibilidad para ser despachadas.

Lo anterior, con el objeto de estimar el resultado agregado del despacho anual que podría realizar horariamente el CENACE, si se dieran las proyecciones de generación de energía eléctrica al año 2040 previstas en el ambicioso **escenario 450ppm**.

Finalmente, se realiza un ejercicio para estimar a precios del año 2015, los costos unitarios de generación de las tecnologías en el año 2040, expresados en USD₂₀₁₅/MWh y desglosados en costos de referencia fijos y variables.

1. ANTECEDENTES DEL AÑO 2014

En el **Anexo A** del documento de la IEA “**Mexico Energy Outlook**” ^[1] se tabulan las cifras de la capacidad de generación de energía eléctrica en el sistema eléctrico nacional y en la **Tabla 1.-** se consignan los datos del año 2014 desglosados en energéticos fósiles y en tecnologías limpias.

Tabla 1.- Capacidad y generación de energía eléctrica en el sistema eléctrico nacional

IEA: Mexico Energy Outlook; Annex A					
año 2014					
energéticos	GW	TWh	fp	Mt CO ₂	Mt CO ₂ /TWh
gas natural	29	172	67.7%	75	0.436
carbón	5	34	77.6%	34	1.000
petróleo	17	33	22.2%	29	0.879
fósiles	51	239	53.5%	138	0.577
hidro	12	39	37.1%		
nuclear	2	10	57.1%		
viento	3	6	22.8%		
geotermia	1	6	68.5%		
bioenergía	1	1	11.4%		
solar FV	0	0			
CSP					
limpios	19	62	37.3%	0	0.000
TOTAL	70	301	49.1%	0	0.458

La generación total fue de 301 TWh, de los cuales el 79.4% correspondió a centrales que usan energéticos fósiles, que emitieron a la atmósfera 139 Mt CO₂.

El otro 20.6% fue generado por centrales con tecnologías limpias, que no emiten CO₂ a la atmósfera.

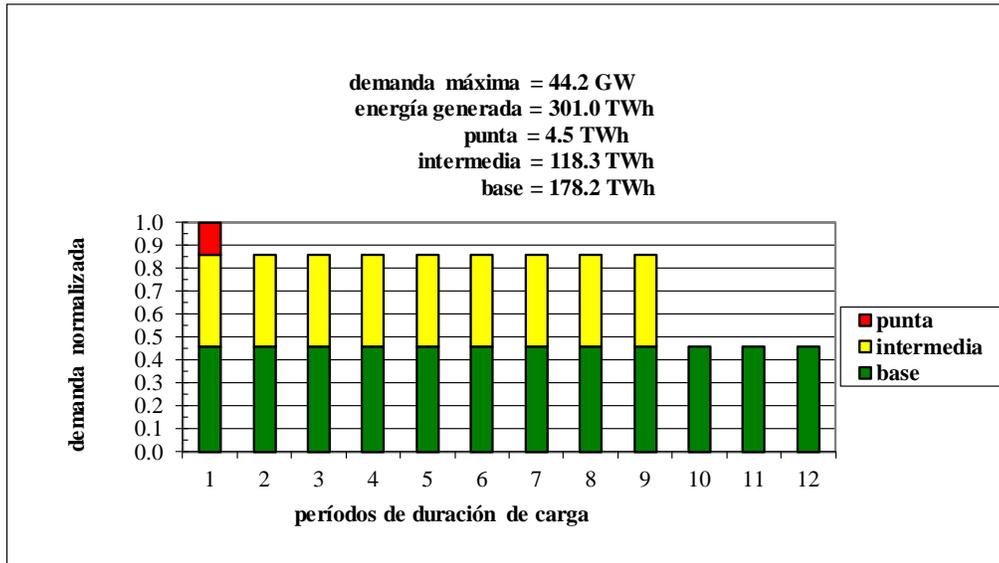
2. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA CURVA ANUAL DE DURACIÓN DE CARGA

La demanda de potencia en un sistema interconectado se caracteriza por la curva de duración de carga, que registra el número de horas del año en que la demanda excede un cierto valor, que varía entre la demanda mínima y la demanda máxima.

Mediante un procedimiento de cuadratura, la curva se puede convertir en un diagrama de bloques: uno para la demanda base, la cual se presenta en las 8,760 horas del año; otro para la demanda de intermedia, arriba de la mínima que ocurre en un número variable de horas del año; y otro para la demanda de punta que sólo ocurre unas pocas horas del año.

En el **Diagrama 1.-** se muestran los bloques equivalentes de la curva anual de duración de carga del sistema eléctrico nacional en el año 2014 ^[2], en el que la demanda máxima fue de 44.2 GW y la energía generada fue 301.0 TWh.

Diagrama 1.- Bloques equivalentes de la curva anual de duración de carga en 2014 del sistema eléctrico nacional



La energía generada en el bloque de la carga base se muestra en verde y fue de 178.2 TWh, suministrada principalmente por centrales carboeléctricas, geotérmicas y la nuclear, así como algunas centrales de gas natural e hidroeléctricas.

La energía generada en la carga intermedia se muestra en amarillo y fue de 118.3 TWh, suministrada principalmente por centrales de ciclo combinado, termoeléctricas de combustóleo y gas natural, así como centrales hidroeléctricas y eólicas.

La energía generada en la carga de punta se muestra en rojo y fue de 4.5 TWh, suministrada principalmente por centrales hidroeléctricas, termoeléctricas de combustóleo, así como centrales de combustión interna y turbogás.

En el **Cuadro 1.-** se resumen los parámetros de la demanda de potencia y energía generada de los bloques equivalentes de la curva de duración de carga en 2014.

Cuadro 1.-Parámetros de la curva de duración de carga del sistema interconectado nacional en 2014

CVMConsultor. Cálculos propios.							
demanda de potencia			bloques equivalentes de energía generada				
unitaria		MW	GWh		horas	contribución	
100%	demanda máxima	44,229	4,454	energía de punta	719	1.5%	
86%	demanda intermedia	38,037	118,323	energía de intermedia	6,688	39.3%	
46%	demanda base	20,345	178,223	energía de base	8,760	59.2%	
	factor de carga del SIN	77.7%	301,000	energía total		100.0%	

3. AÑO 2030 EN EL ESCENARIO 450ppm DE LA IEA

El ambicioso **escenario 450ppm** de la IEA [3] es el que considera necesario alcanzar para estabilizar la concentración del CO₂ en la atmósfera en 450 partes por millón y lograr que el incremento de la temperatura global del planeta no exceda de 2°C, respecto a los niveles preindustriales.

En la **Tabla 2.-** se consignan los datos del año 2030, desglosados en energéticos fósiles y en tecnologías limpias, según el **escenario 450ppm** del “**Mexico Energy Outlook**” del IEA.

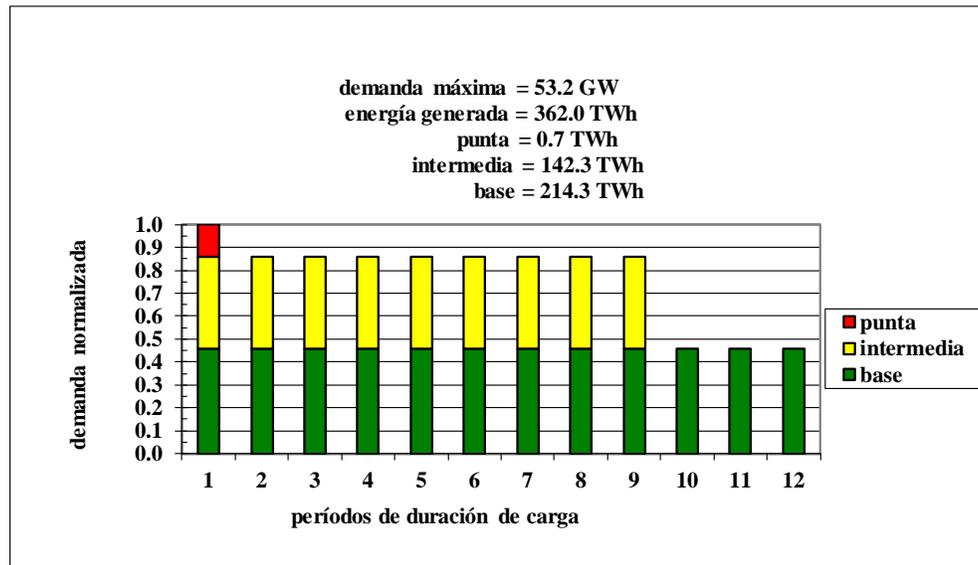
La generación total sería de 362 TWh, de los cuales el 47.5% correspondería a centrales que usan energéticos fósiles, que emitirían a la atmósfera 71 Mt CO₂. En este escenario, habría un considerable beneficio ambiental, ya que el otro 52.5% sería generado por centrales con tecnologías limpias, que no emiten CO₂ a la atmósfera.

Tabla 2.- Capacidad y generación de energía eléctrica en el sistema eléctrico nacional

IEA: Mexico Energy Outlook; Annex A						
año 2030; escenario 450 ppm						
energéticos	GW	TWh	fp	Mt CO ₂	Mt CO ₂ /TWh	
gas natural	42	161	43.8%	60	0.373	
carbón	5	9	20.5%	9	1.000	
petróleo	5	2	4.6%	2	1.000	
fósiles	52	172	37.8%	71	0.413	
viento	19	58	34.8%			
hidro	18	50	31.7%			
solar FV	22	40	20.8%			
nuclear	4	26	74.2%			
geotermia	1	7	79.9%			
bioenergía	2	6	34.2%			
CSP	1	3	34.2%			
limpios	67	190	32.4%	0	0	0.000
TOTAL	119	362	34.7%	0	71	0.196

En el **Diagrama 2.-** se muestran los bloques equivalentes de la curva anual hipotética de duración de carga del sistema eléctrico nacional en el año 2030, con una demanda máxima de 53.2 GW y energía a ser generada de 362.0 TWh.

Diagrama 2.- Bloques equivalentes de la curva anual de duración de carga en 2030 del sistema eléctrico nacional



La curva es hipotética porque se supone que entre 2014 y 2030 su perfil no cambiaría y los patrones relativos de la demanda base, intermedia y punta se mantendrían constantes, lo cual puede no suceder debido a la evolución de los sistemas eléctricos por cambios tecnológicos y a cambios en los patrones en la demanda y la oferta.

La energía de 214.3 TWh, a ser generada en el bloque de la carga base se muestra en verde y sería suministrada principalmente por centrales de ciclo combinado, geotérmicas y la nuclear, así como algunas hidroeléctricas.

La energía de 142.3 TWh, a ser generada en la carga intermedia se muestra en amarillo y sería, suministrada principalmente por centrales de ciclo combinado, así como centrales hidroeléctricas, eólicas y solares FV.

La energía de 5.4 TWh, a ser generada en la carga de punta se muestra en rojo y sería, suministrada principalmente por hidroeléctricas, termoeléctricas de combustóleo y carbón, así como centrales de combustión interna y turbogás.

En el **Cuadro 2.-** se resumen los parámetros de la demanda de potencia y energía generada de los bloques equivalentes de la curva de duración de carga en 2030.

Cuadro 2.-Parámetros de la curva de duración de carga del sistema interconectado nacional en 2030

CVMConsultor. Cálculos propios.							
demanda de potencia				bloques equivalentes de energía generada			
unitaria		MW	GWh		horas	contribución	
100%	demanda máxima	53,192	5,357	energía de punta	719	1.5%	
86%	demanda intermedia	45,745	142,302	energía de intermedia	6,688	39.3%	
46%	demanda base	24,468	214,341	energía de base	8,760	59.2%	
	factor de carga del SIN	77.7%	362,000	energía total		100.0%	

4. AÑO 2040 EN EL ESCENARIO 450ppm DE LA IEA

En la **Tabla 3.-** se consignan los datos del año 2040, desglosados en energéticos fósiles y en tecnologías limpias, según el ambicioso **escenario 450ppm** del “**Mexico Energy Outlook**” del IEA.

Tabla 3.- Capacidad y generación de energía eléctrica en el sistema eléctrico nacional

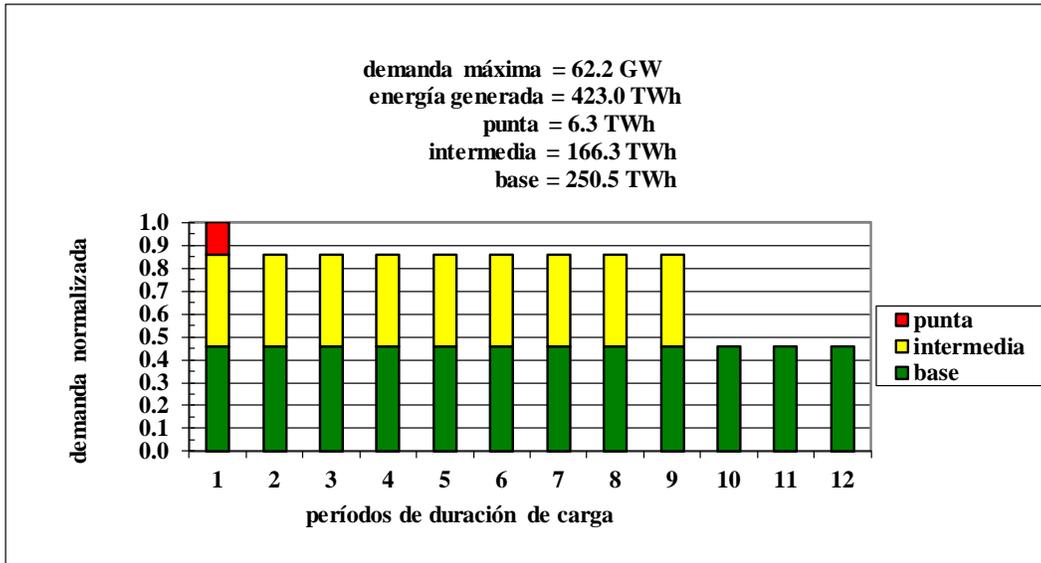
IEA: Mexico Energy Outlook; Annex A					
año 2040; escenario 450 ppm					
energéticos	GW	TWh	fp	Mt CO ₂	Mt CO ₂ /TWh
gas natural	51	122	27.3%	46	0.377
carbón	4	5	14.3%	4	0.800
petróleo	3	1	3.8%	1	1.000
fósiles	58	128	25.2%	51	0.398
viento	31	102	37.6%		
solar FV	36	66	20.9%		
hidro	21	58	31.5%		
nuclear	6	44	83.7%		
geotermia	1	9	99.1%		
bioenergía	2	8	45.7%		
CSP	3	8	30.4%		
limpios	100	295	33.7%	0	0.000
TOTAL	158	423	30.6%	51	0.121

De la generación total de 423 TWh, solo el 30.3% correspondería a centrales que usan energéticos fósiles, que aún emitirían a la atmósfera 51 Mt CO₂, fundamentalmente por la contribución de los ciclos combinados que usan gas natural.

En este escenario, aumentaría muy significativamente el beneficio ambiental, ya que el otro 69.7% sería generado por centrales con tecnologías limpias que no emiten CO₂ a la atmósfera, como son las eólicas, solares FV, hidráulicas y nucleares.

En el **Diagrama 3.-** se muestran los bloques equivalentes de la curva anual hipotética de duración de carga del sistema eléctrico nacional en el año 2040, con una demanda máxima de 62.2 GW y energía a ser generada de 423.0 TWh.

Diagrama 3.- Bloques equivalentes de la curva anual de duración de carga en 2040 del sistema eléctrico nacional



La energía de 250.5 TWh, a ser generada en el bloque de la carga base se muestra en verde y sería suministrada principalmente por centrales de ciclo combinado, nucleares y por algunas eólicas soportadas con hidroeléctricas, así como geotérmicas y de bioenergía.

La energía de 166.3 TWh, a ser generada en la carga intermedia se muestra en amarillo y sería suministrada principalmente por centrales hidroeléctricas, eólicas y solares FV.

Finalmente, la energía de 6.3 TWh, a ser generada en la carga de punta se muestra en rojo y sería suministrada por termoeléctricas de combustóleo y carbón, así como centrales de combustión interna y turbogás.

Cuadro 3.-Parámetros de la curva de duración de carga del sistema interconectado nacional en 2040

CVMConsultor. Cálculos propios.						
demanda de potencia			bloques equivalentes de energía generada			
unitaria		MW	GWh		horas	contribución
100%	demanda máxima	62,155	6,259	energía de punta	719	1.5%
86%	demanda intermedia	53,453	166,281	energía de intermedia	6,688	39.3%
46%	demanda base	28,591	250,459	energía de base	8,760	59.2%
	factor de carga del SIN	77.7%	423,000	energía total		100.0%

En el **Cuadro 3.-** se resumen los parámetros de la demanda de potencia y energía generada de los bloques equivalentes de la curva de duración de carga en 2040.

5. DESPACHO DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL

En el documento “**Reglas de operación y despacho del sistema eléctrico nacional**” [4], publicado por la CFE, se estipula que:

Artículo 6.- *El despacho y operación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) tiene como finalidad hacer eficiente el suministro de energía eléctrica y que se cumpla con los siguientes objetivos básicos:*

- **SEGURIDAD:** *Es la habilidad del SEN para soportar la ocurrencia de perturbaciones. Aplicada al SEN, el sistema se considera en operación segura, cuando sea capaz de soportar la ocurrencia de la contingencia sencilla más severa sin la acción de esquemas de control suplementarios.*
- **CONTINUIDAD:** *Es el suministro ininterrumpido del servicio de energía eléctrica a los usuarios, de acuerdo a las normas y reglamentos aplicables.*
- **CALIDAD:** *Es la condición de voltaje, frecuencia y forma de onda del servicio de energía eléctrica, suministrada a los usuarios, cumpliendo con lo establecido en el Reglamento de la Ley.*
- **ECONOMIA:** *Implica el menor costo global de producción del kWh, resultante del uso óptimo de los recursos energéticos, de generación y de red, considerando las unidades generadoras más eficientes y la asignación de potencia más adecuada, según la disponibilidad, las restricciones ambientales, el costo y consumo de energéticos, las pérdidas en transmisión, las restricciones de red y los contratos existentes.*

Artículo 141.- *El despacho se elaborará tomando en consideración la estimación de la demanda, el área geográfica del productor y las restricciones de red; la disponibilidad hidráulica; la disponibilidad de todas las unidades generadoras; las cargas interrumpibles; y los costos totales de corto plazo de la energía eléctrica o precios ofertados por todos los productores.*

De acuerdo con estos objetivos, el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) realiza el despacho de las centrales del sistema eléctrico nacional para satisfacer la demanda durante las 8,760 horas del año, de acuerdo con la distribución geográfica de las centrales y de la demanda, la topología de la red interconectada y la capacidad y disponibilidad de las líneas de transmisión, las potencias disponibles de las centrales, su confiabilidad y sus costos marginales de generación, así como otros parámetros relacionados con la inyección y flujos de potencia y energía en la red interconectada, los voltajes en los nodos y la frecuencia.

Dicho lo anterior, como un ejercicio prospectivo, en la **Tabla 4.-** se consignan los mismos datos de la **Tabla 3.-** de la energía a ser generada en el año 2040 por cada tipo de tecnología, agrupadas ahora dentro de los bloques del **Diagrama 3.-** y ordenadas de acuerdo a su factor de planta, indicativo de su disponibilidad.

Lo anterior tiene por objeto estimar el resultado agregado del despacho anual que podría realizar horariamente el CENACE, si se dieran las proyecciones de generación de energía eléctrica según el ambicioso **escenario 450ppm** del **"Mexico Energy Outlook"** del IEA.

Tabla 4.-Despacho anual de la capacidad y generación de energía eléctrica en el sistema eléctrico nacional

IEA: Mexico Energy Outlook; Annex A					
año 2040; escenario 450 ppm					
energéticos	GW	TWh	fp	Mt CO ₂	Mt CO ₂ /TWh
geotermia	1	9	99.1%		
nuclear	6	44	83.7%		
bioenergía	2	8	45.7%		
viento 1	12	38	37.6%		
hidro 1	8	21	31.5%		
CSP	3	8	30.4%		
gas natural	51	122	27.3%	46	0.377
base	82	250	34.7%	46	0.184
viento 2	19	64	37.5%		
hidro 2	13	37	31.5%		
solar FV	36	66	20.9%		
intermedia	69	167	27.7%	0	0
carbón	4	5	14.3%	4	0.800
petróleo	3	1	3.8%	1	1.000
punta	7	6	9.8%	5	0.833
TOTAL	158	423	30.6%	51	0.121

En el bloque de base, la capacidad conjunta de las centrales geotérmicas, nucleares, bioenergéticas, eólicas, hidráulicas, CSP y de gas natural sería de 82 GW, y con un factor de planta conjunto de 34.7% su generación sería 250 TWh. Las centrales de gas natural emitirían a la atmósfera 41 Mt CO₂.

Las centrales eólicas, hidráulicas y solares FV agrupadas en el bloque de carga intermedia tendrían una capacidad conjunta de 69 GW y generarían 167 TWh, con un factor de planta conjunto de 27.7%, sin emitir CO₂ a la atmósfera.

Por último, las centrales de carbón y petróleo (combustóleo y diésel) con una capacidad conjunta de 7 GW, generarían en el bloque de carga de punta 6 TWh, con bajo factor de planta de 9.8%.

Finalmente, en la **Tabla 5.-** se listan los costos hipotéticos unitarios y anuales, variables y fijos, de la generación de las centrales agrupadas en cada bloque del despacho en el año 2040, expresados en USD₂₀₁₅.

Tabla 5.- Costos y parámetros de referencia para el despacho económico del sistema eléctrico nacional en 2040, en el escenario 450ppm de la IEA

Costos y parámetros de referencia para el despacho económico del sistema eléctrico nacional en 2040 en el escenario 450ppm de la IEA									
		costos unitarios			costos anuales				
		variables	fijos	total			variables	fijos	total
energéticos	fp	USD ₂₀₁₅ /MWh			MUSD ₂₀₁₅				
geotermia	85.0%	33.67	43.27	76.94		303	389	692	
nuclear	90.0%	5.44	96.74	102.18		239	4,256	4,496	
bioenergía	45.0%	30.06	17.21	47.27		240	138	378	
viento 1	35.0%	0.00	68.96	68.96		0	2,621	2,621	
hidro 2	21.6%	3.86	70.80	74.66		81	1,487	1,568	
CSP	30.0%	0.00	143.37	143.37		0	1,147	1,147	
gas natural	80.0%	30.06	51.15	81.21		3,667	6,240	9,908	
bloque de base		18.12	65.11	83.24	base	4,531	16,278	20,810	
viento 1	35.0%	0.00	69.04	69.04		0	4,419	4,419	
hidro 2	21.6%	3.86	70.68	74.54		143	2,615	2,758	
solar FV	20.0%	0.00	139.03	139.03		0	9,176	9,176	
bloque de intermedia		0.86	97.06	97.92	intermedia	143	16,209	16,352	
carbón	80.0%	29.50	216.58	246.08		148	1,083	1,230	
petróleo	75.0%	79.11	593.27	672.38		79	593	672	
bloque de punta		37.77	279.36	317.13	punta	227	1,676	1,903	
MEDIA		11.59	80.77	92.35	TOTAL	4,901	34,164	39,064	

Los costos variables representarían solo el 12.5% del total anual de 39,064 MUSD₂₀₁₅, mientras que los costos fijos serían 87.5% del total.

Del total anual de costos variables por 4,901 MUSD₂₀₁₅, el 74.8% correspondería a costos por el gas natural. Del total anual de costos fijos por 34,164 MUSD₂₀₁₅, el 26.9% correspondería a centrales solares FV, el 20.6% a eólicas, el 12.5% a nucleares y el 12.0% a hidráulicas.

6. CONCLUSIÓN

El ambicioso **escenario 450ppm** del “**Mexico Energy Outlook**” del IEA, proyecta una penetración agresiva de las energías limpias en el sistema eléctrico nacional de manera que el 69.7% de la generación en el año 2040 tendría su origen en estas tecnologías y habría una reducción muy significativa en las emisiones de CO₂ a la atmosfera.

Adicionalmente, el costo marginal de las tecnologías limpias, que es uno de los factores que determinan la prioridad en el despacho del CENACE, es el costo variable y representaría el 20.5% del subtotal de este costo. Esto es un gran incentivo para despachar las tecnologías limpias cuando están disponibles, lo que no siempre sucede dada la intermitencia de algunas de ellas como la eólica y la solar FV.

Sin embargo, el costo fijo de las tecnologías limpias representaría el 76.8% del subtotal de este costo, que como vimos anteriormente sería el costo dominante dada la elevada inversión unitaria que requieren.

Finalmente, combinando costos fijos y variables, el costo total de generación de las tecnologías limpias sería el 69.8% del total anual en el año 2040.

7. REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency, Mexico Energy Outlook, OECD, París, Francia (2016).
- [2] M. en Ing. Carlos Villanueva Moreno, Elaboración propia, 2017.
- [3] International Energy Agency, World Energy Outlook, OECD, París, Francia (2016).
- [4] Comisión Federal de Electricidad, Reglas de operación y despacho del sistema eléctrico nacional, Diario Oficial de la Federación del 3 de noviembre de 2005.