

TERCERA SECCIÓN
GENERACIÓN Y SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

INDUSTRIA ELÉCTRICA: GENERACIÓN Y SUMINISTRO DE ELECTRICIDAD. AGENDA PARA EL SEXENIO 2024-2030

POST SCRIPTUM*

JOSÉ LUIS APODACA VILLARREAL**

Ahora que el mundo se propone sustituir los combustibles fósiles con electricidad limpia, el principal reto futuro para los próximos gobiernos de México es la *transición energética soberana*, la cual representa un compromiso del sector eléctrico nacional para atender el crecimiento de la demanda y reducir gradualmente las emisiones de CO₂, sin sacrificar la seguridad nacional, ni afectar la continuidad y la estabilidad del sistema interconectado nacional en constante expansión, y sin depender de la importación de gas natural de Estados Unidos. Con la transición energética, la economía y la seguridad nacional dependerán continuamente y más que nunca del suministro de electricidad.

Se han revertido parcialmente por la actual administración los avances privatizadores de la reforma energética de 2013, incrementándose la participación competitiva de CFE en la generación de electricidad con nuevas centrales de ciclo combinado y capacidad suficiente para atender el crecimiento normal de la demanda hasta el año 2030. Se incorporó nuevamente la planeación a mediano y largo plazo por CFE; se contrarrestó la intención de desechar el parque de generación antiguo de plantas duales; no hay escasez en la oferta, y se ha enfrentado la disminución temporal en el suministro de gas natural; se soporta frecuentemente la confiabilidad; se adquirió por el sector público un grupo de centrales privadas de ciclo combinado de productores externos; y se optimizaron las finanzas de CFE integrada, para hacer frente a estas inversiones sin endeudamiento. Se ha

* Post scriptum al capítulo “Industria eléctrica: generación y suministro de electricidad” (Apodaca, 2018).

** Observatorio Ciudadano de la Energía, A.C.

retomado hasta donde ha sido posible el servicio público de electricidad sin incrementar tarifas y evitando la especulación extrema del mercado eléctrico legalmente vigente; y se atienden exitosamente contingencias de manera coordinada entre el CENACE y las empresas subsidiarias de CFE, sin afectar la estricta separación legal.

En el corto plazo, la dependencia del gas natural importado para las centrales de ciclo combinado seguirá incrementándose, significando un riesgo importante para la seguridad nacional, porque a futuro los intereses de Estados Unidos y su vulnerable autonomía energética, podrían limitar el suministro a México como ya ocurrió en febrero de 2021 por el frente frío en Texas.

El principal reto a mediano plazo es utilizar otras fuentes primarias de energía limpia que además constituyan generación base disponible para todas las horas del año. Como única opción técnicamente factible actual habrá de considerarse seriamente ampliar la central nucleoelectrónica Laguna Verde y construir otras más en las costas de México. Las nuevas centrales de generación fotovoltaica (FV) y eólica (EO), a mediano y largo plazo, por limitaciones técnicas, seguirán aportando a lo más un 30% de la energía total nacional futura, y solamente podrán interconectarse complementándolas con baterías de respaldo para controlar su intermitencia y variabilidad, porque ya está agotada la capacidad hidroeléctrica disponible de CFE que respalda los 14,000 Megawatts de generación privada FV y EO, instalados actualmente.

En los próximos diez años, cientos de miles de empresas de todos tamaños y millones de usuarios residenciales, participarán ampliamente en la generación verde distribuida privada (hasta alcanzar el 46% del total nacional), principalmente con tecnología fotovoltaica con baterías, en sus propios centros de consumo, aprovechando el potencial de radiación solar en casi todo el territorio nacional. La CRE actualizará los reglamentos para las baterías de almacenamiento que permitirán modificar las curvas de generación en concordancia con las curvas de consumo, para no afectar la estabilidad del sistema eléctrico interconectado. En los sistemas FV y EO grandes, actuales y futuros, disponer de 4 horas de almacenamiento en las baterías, permitirá además de modificar las curvas de generación, relevar más de la mitad de la capacidad de los enlaces de transmisión existentes actualmente utilizados.

Mientras se avanza en la transición energética seguirán predominando las tecnologías de generación eléctrica de combustibles fósiles. Afortunadamente México cuenta con mayor participación de generación con ciclos combinados y gas natural, de menores costos (0.46 \$/KWH) y menor emisión de CO₂

(0.357 Kg CO₂/KWH), respecto de combustóleo y carbón, utilizados por excepción para confiabilidad en el suministro (tabla 1).

TABLA 1
IMPACTO DE LOS PRECIOS DE COMBUSTIBLES Y TECNOLOGÍAS, 2023

Concepto	Costo Unitario de combustible			Generación de CFE: Costo por combustible y tecnología, \$/KWH			
	Unidad de compra	Costo	Dls/ MBTU	Planta de Vapor (eficiencia)	Planta de Vapor (eficiencia)	Ciclo combinado antiguo (eficiencia)	Ciclo combinado moderno (eficiencia)
				0.34	0.40	0.42	0.52
Combustóleo	\$/litro	6.22	8.41	1.70			
Carbón de importación	Dls/Ton	218.75	8.74	1.77	1.50		
Carbón de Sabinas	Dls/Ton	53.65	2.77	0.56			
Gas natural continental	Dls/ MBTU	3.48	3.48	0.70		0.57	0.46
Gas natural licuado	Dls/ MBTU	12.00	12.00	2.43		1.97	1.59
Diésel	\$/litro	22.70	33.57				4.44

FUENTE: Elaboración propia.

La transición energética soberana de México representa un compromiso del sector eléctrico para atender el crecimiento de la demanda y reducir gradualmente las emisiones de CO₂, sin sacrificar la seguridad nacional, ni afectar la continuidad y la estabilidad del sistema interconectado nacional, y sin depender de la importación de gas natural de Estados Unidos.

Con el objetivo principal de no depender de la importación de gas natural, se plantea un escenario estratégico ambicioso y factible para suministro eléctrico de la transición para un futuro a 15 años, con crecimientos de 3% de la economía y 4% de la demanda de electricidad (tabla 2). Se lograría 78% de energías limpias y mínimo consumo de gas natural, costo medio de la energía eléctrica sustentable similar a la tarifa actual, y el autofinanciamiento nacional de la infraestructura eléctrica robusta para atender el crecimiento sostenido de la economía.¹

TABLA 2
ESCENARIO ESTRATÉGICO PARA LOGRAR SEGURIDAD
EN EL SUMINISTRO DE ELECTRICIDAD

Concepto/ Año	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
PIB en billones de dólares	1.11	1.14	1.18	1.21	1.25	1.29	1.33
Demanda Maxima anual GW	56	58	61	63	66	68	71
Energía anual TWH	366	381	396	412	428	445	463

FUENTE: Elaboración propia con base en: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023–2037.

En el periodo de 15 años considerado se estiman 118 GW de generación adicional de energía verde renovable: hidroeléctrica, fotovoltaica y eólica (estas dos últimas ubicadas en los centros de consumo y con baterías de respaldo total); y 33 GW de plantas base nucleares para soportar la estabilidad del sistema eléctrico mexicano, también con energía limpia.

Se incluyen 10 nuevas centrales nucleares repartidas en las costas del territorio nacional con unidades de 1,400 MW. Se iniciaría la expansión nuclear con la ampliación de Laguna Verde y otra central nueva en la costa del Pacífico, para entrar en operación en 6 años, aprovechando la amplia experiencia de CFE; y se emprenderían licitaciones internacionales para proyectos llave en mano.

Balance de potencia con la capacidad instalada en las actuales centrales generadoras en operación y las futuras consideradas en este escenario (tabla 3):

TABLA 3
GW, DEMANDA MÁXIMA Y CAPACIDAD INSTALADA.
ESCENARIO GENERACIÓN LIMPIA
(BAJA DEPENDENCIA ENERGÉTICA Y MÍNIMO CO₂)

Concepto/ Año	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Demanda Maxima anual GW	56	58	61	63	66	68	71
HIDRO CFE actual (GW)	12	12	12	12	12	12	12
Total Ciclos Combinados actual (GW)	47	48	48	48	48	48	48
Vapor Dual actual (GW)	15	15	15	15	15	15	15
Nuclear Actual (GW)	2	2	2	2	2	2	2
Eólicos actual (GW)	9	10	10	10	10	10	10
Fotovoltaicos actual (GW)	9	10	10	10	10	10	10
Nuclear nueva (GW)							3
Hidro nueva (GW)							6
Eólicos Nuevos con baterías (GW)			1	2	3	4	5
Fotovoltaicos Nuevos con baterías (GW)		5	10	15	20	25	30
Total capacidad GW	94	102	108	114	120	126	141

NOTA: por razones de espacio se eliminaron las columnas intermedias de 2031 a 2034 y 2036 a 2038.

La energía anual generada ya balanceada, acorde con la tecnología y factor de planta anual de cada grupo de centrales sería (tabla 4):

TABLA 4
TWH ENERGÍA ANUAL: ESCENARIO GENERACIÓN LIMPIA
(BAJA DEPENDENCIA ENERGÉTICA Y MÍNIMO CO2)

<i>Concepto/ Año</i>	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Energía anual TWH	366	381	396	412	428	445	463
HIDRO CFE actual	25	25	25	25	25	25	25
Total Ciclos Combinados actual	228	253	258	272	287	293	260
Vapor Dual actual	62	52	42	32	22	22	22
Nuclear Actual	12	12	12	12	12	12	12
Eólicos actual	18	18	18	18	18	18	18
Fotovoltaicos actual	21	21	21	21	21	21	21
Nuclear nueva	0	0	0	0	0	0	24
Hidro nueva			0	0	0	0	16
Eólicos Nuevos			3	5	8	11	13
Fotovoltaicos Nuevos Gen Distribuida			18	26	35	44	53
Total generado TWH	366	381	396	412	428	445	463

FUENTE: Elaboración propia.

Se presenta un balance de energía anual generada por cada tecnología de central, considerando factores de planta históricos promedio. La demanda máxima se atiende sin restricciones con la capacidad instalada base, ciclos combinados y de respaldo para centrales intermitentes con generación hidroeléctrica, baterías, y de C.I. de arranque rápido.

En la tabla 5 se indica la disminución que se lograría –con este escenario– de la dependencia del gas natural importado y la reducción de emisión de CO2, con un 78% de generación limpia:

TABLA 5
REDUCCIÓN DE LA EMISIÓN DE CO2
Y DE LA DEPENDENCIA DEL GAS NATURAL IMPORTADO

<i>Concepto/ Año</i>	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Total gas natural TWH	290	305	300	304	309	315	282
%	79	80	76	74	72	71	61
Energía limpia TWH	76	76	96	108	119	130	181
%	21	20	24	26	28	29	39

FUENTE: Elaboración propia.

Producir electricidad limpia a base de generación nuclear, hidroeléctrica, eólica y fotovoltaica, implica costos de inversión muy altos. Obtener bajas tasas de interés y financiamiento directo con empresas fabricantes de centrales, logrando apoyos de promoción de exportaciones de sus propios

países de origen e impulsando la instalación de sus empresas en México con participación nacional, significa asegurar infraestructura eléctrica para el crecimiento industrial y económico, para una transición energética con mínimas dependencia y emisión de CO₂. En este escenario se está considerando un financiamiento de centrales generadoras para un periodo de 15 años, con 3% de tasa anual de interés.

TABLA 6
INVERSIÓN TOTAL Y COSTO NIVELADO DE LA ELECTRICIDAD

Concepto	Tecnología	Costo Dls/Kw	Capacidad instalada GW	Energía anual TWH/año	Costo total Miles de Millones de dólares	Costo total unitario \$/ KWH
Generación	Nuclear	6,502	33	260	215	1.38
	Hidro	3,600	24	63	86	2.30
	Eólica	2,900	11	29	32	1.85
	Fotovoltaica	2,100	50	88	105	2.01
	Total		118	440	438	1.67
Transmisión - Distribución					45	0.18
Total					483	1.86

NOTA: Inversión financiada a 15 años con interés de 3% anual.

Juntamente con las diez nuevas centrales nucleares, que estarían ubicadas en las costas del Golfo de México y del Océano Pacífico, se implementaría una red de líneas de transmisión de corriente directa de aproximadamente 10,000 kilómetros de longitud, para interconectar los principales centros de carga conforme entren en operación las nuevas plantas nucleares; se respaldará la generación intermitente y se logrará mayor robustez del sistema interconectado nacional.

Para aprovechar 40,000 MW de plantas ya existentes relativamente modernas de ciclo combinado, y acceder al gas natural estadounidense cuando su precio sea bajo (sin depender de ellos), también se dispondrá de estaciones de licuefacción para exportación de GNL a países europeos, y se habilitarán cavernas de almacenaje de gas natural, juntamente con Pemex y la SENER. La capacidad de estas instalaciones permitiría conservar el flujo constante, agregando el GNL importado por buque, en periodos de disminución del suministro del gas natural de importación.

Si los ingresos por ventas en el periodo considerado de 15 años serían de 755 miles de millones de dólares (MMD), es factible amortizar la inversión en centrales y el sistema de transmisión de 486 MMD. Este escenario presenta un desarrollo de infraestructura muy rentable, que podría significar

para el gobierno federal inyectar recursos para financiar proyectos de interés social, y mantener tarifas eléctricas bajas sin subsidios para promover el desarrollo económico nacional internamente competitivo.

Los efectos multiplicadores sobre las cadenas productivas nacionales causados por estos montos de inversión de infraestructura energética sustentable, independiente, y ecológicamente sostenible, serían un detonador para el avance de México hacia un sitio de país desarrollado.

Otra aportación muy importante en la transición energética nacional será implantar una *cultura de eficiencia en el uso de la electricidad* de 50 millones de usuarios actuales y los futuros, porque se optimiza la producción de bienes y servicios por unidad de energía consumida; se reduce la contaminación y también los costos. Los consumidores grandes, medianos y pequeños, invertirían en sus propios sistemas eléctricos interiores y equipos para convertir la electricidad en transporte, fuerza motriz, compresión, refrigeración, calefacción, ventilación, iluminación, bombeo de agua, comunicaciones, etc. La generación distribuida fotovoltaica estará al alcance de todos los usuarios independientemente de su tamaño, y con eficiencia en el uso de la electricidad se optimizará la inversión. Se presentarán múltiples áreas de oportunidad: variadores de velocidad para regular los flujos de agua o aire, y optimizar motores; calefacción con bombas de calor; únicamente iluminación LED; aislamiento térmico. Se avanzará también en: seleccionar dimensión justa de motores y transformadores; ventilación de áreas de trabajo y descanso; dimensionamiento óptimo de redes, líneas y subestaciones; ubicación adecuada de centrales de generación y privilegiar la distribuida; bombeos de agua potable y riego; sistema hidrónicos; etc.

La incursión en redes automáticas se inicia con las mediciones de KWH inteligentes de cada usuario conectadas por Internet y sus sistemas de monitoreo y control derivarán en sistemas también inteligentes. En el año 2036 habrá en México 60 millones de usuarios eléctricos conectados a Internet generando exponencialmente “Big Data” en tiempo real a partir de sus medidores de KWH, sensores, y plataformas IOT (Internet of Things) que representarán valor muy relevante. La explotación de esos datos mediante inteligencia artificial y sistemas aprendientes permitirá predicciones de demanda, de fallas y balanceo predictivo de cargas. La utilización de PLC’s con algoritmos de solución para optimizar la generación distribuida, serán parte del sistema interconectado nacional y un sistema integral inteligente para administrar la demanda eléctrica de todos los usuarios empresariales y domésticos.

México dispone de los recursos para lograr su camino de transición energética independiente y puede definir su propio modelo de expansión del

sistema eléctrico nacional con energías limpias, cumpliendo estrictamente con los compromisos mundiales de reducción radical de emisiones de CO₂, incorporando a todas las tecnologías limpias disponibles y asegurando el suministro del crecimiento alto de la demanda de electricidad derivado de la sustitución de los combustibles fósiles. Hay enormes oportunidades para ingenieros y técnicos mexicanos, y empresas nacionales para explotar el litio, fabricar baterías, electrónica de potencia, paneles FV, equipos eléctricos, sistemas de control, y desarrollos propios para automatizar redes inteligentes, sin acudir a tecnologías extranjeras que pretendan especular o crear dependencia tecnológica.

NOTAS

1 Información de referencia sobre capacidad de generación y energía anual base para 2022, obtenida del “PRODESEN 2023-2037” de la SENER y “Programa de Ampliación y Modernización de la RNT y de la RGD 2023-2037” del CENACE.

BIBLIOGRAFÍA

- Apodaca Villarreal, José Luis (2018), “Industria eléctrica: generación y suministro de electricidad”, en Calva, José Luis (coord.), *Futuro de la energía en México*, México: Juan Pablos Editor y Consejo Nacional de Universitarios, en: <https://www.consejo-nacionaldeuniversitarios.mx/futuro-de-la-energia-en-mexico/>
- Programa de Ampliación y Modernización de la RNT y de la RGD, en: https://www.cenace.gob.mx/Paginas/SIM/ProgramaRNT_RDG.aspx
- Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023–2037, en: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2023/CD008843.pdf>
- Video de las variables involucradas en la generación FV y almacenamiento con baterías, en: <https://www.dropbox.com/scl/fi/hrp8zbhzyrmwa9b8yuvfr/Generaci-n-Fotovoltaica.mp4?rlkey=8zhbhr8n53ajmylq55l5r1qys&rdl=0>