

Revista de Administración Pública

INAP

INSTITUTO NACIONAL DE
ADMINISTRACIÓN PÚBLICA, A.C.

Un escenario sustentable de expansión del sistema eléctrico nacional para la transición energética de México (2022 -2036)

José Luis Apodaca Villarreal*

“Lo más prioritario nunca debe estar supeditado a lo menos prioritario”¹

Resumen: Se presenta un escenario sustentable de expansión del sistema eléctrico nacional para la transición energética de México (2022 -2036), que asegure el abastecimiento de electricidad futuro sin restricciones, para un crecimiento de la demanda del 4% anual. Se plantea no depender ilimitadamente del suministro del gas natural estadounidense, compromiso a generar por lo menos un 70 % de energías limpias en el año 2036, lograr un costo medio de la energía eléctrica sustentable mediante el autofinanciamiento nacional de la infraestructura eléctrica, y evitar especulación privada.

Se contempla también: Atender el 100 % de electrificación de áreas aisladas del país con sistemas autónomos pequeños; medición por Internet y administración de la demanda en 45 millones de usuarios; uso eficiente de la energía en empresas y domicilios; promoción y apoyo para la instalación de paneles solares, baterías y generación de respaldo en 30 millones de domicilios para alimentar carros eléctricos.

* Ingeniero en Mecánica Industrial por la Universidad de Nuevo León. Maestría para la Administración de la Calidad por la Universidad Autónoma de Nuevo León. Entre otros cargos ha sido Director General de la Empresa: Sistemas de Monitoreo y Control para Ahorro de Energía; Maestro de Cátedra, Asesor en el Centro de Estudios de Energía, Asesor Certificación ISO, Consultor en el ITESM; Asesor de la Dirección General de CFE; Asesor de Legisladores en temas energéticos en el Congreso de la Unión.

¹ “Generar energía eléctrica al menor costo posible para lograr seguridad energética y mantener en marcha la economía del país”

Palabras clave: Transición energética, sistema eléctrico, sustentabilidad, prospectiva, crecimiento sistema eléctrico

A sustainable scenario of expansion of the national electricity system for the energy transition of Mexico (2022 - 2036)

Abstract: A sustainable scenario of expansion of the national electricity system for the energy transition of Mexico (2022 -2036) is presented, which ensures the supply of future electricity without restrictions, for a growth in demand of 4% per year. It is proposed not to depend unlimitedly on the supply of natural gas from the United States, a commitment to generate at least 70% of clean energy by year 2036, to achieve an average cost of sustainable electrical energy through national self-financing of electrical infrastructure, and to avoid speculation.

Private generation is also considered to fully supply electricity to rural isolated areas of the country with small autonomous systems; Internet based billing and demand management to 45 million users; efficient use of energy in businesses and homes; promotion and support for the installation of solar panels, batteries and backup generation in 30 million homes to power electric cars.

Keywords: Energy transition, electric system, sustentability, prospective, electric power system.

Fecha de recepción del artículo: 30 mayo 2022

Fecha de aceptación: 27 junio 2022

Introducción.

De 1940 a 1980 el Producto Interno Bruto (PIB) mexicano creció a una tasa promedio anual del 5% y el consumo de electricidad al 7%; la expansión del sector eléctrico nacional a cargo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) resultó exitosa atendiendo todo el mercado nacional. (Referencias 1 y 2)

En los últimos 40 años de economía globalizada el crecimiento de nuestro PIB disminuyó radicalmente y el consumo eléctrico presentó un incremento promedio menor de 3% anual (Referencias 1 y 2). La CFE fue perdiendo

mercado y actualmente los productores privados entregan un 25% de la electricidad directamente a los usuarios más grandes utilizando la red nacional, y generan el 66% de la energía total; se endeudó a la CFE con 50,000 millones de dólares en su mayor parte con arrendamientos (generación PIDIREGAS² y sistema de gasoductos), y se pagarán durante 25 años 200,000 millones de dólares a causa de tasas de financiamiento muy altas. También se heredó alta dependencia energética y la expansión de la generación desde el año 2000 y a largo plazo “se planeó” siguiendo un criterio de mercado: con ineficiente ubicación de centrales; tecnología preponderante de ciclo combinado con gas natural importado³; y generación intermitente Fotovoltaica (FV) y Eólica (EO) sin respaldo. El Mercado Eléctrico Mayorista adoptado con la Reforma Energética de 2013 propició la especulación de los generadores privados a costa de CFE, no contempla la seguridad energética del sistema interconectado nacional actual y futuro, y derivó en energía cara para las empresas productores de bienes y servicios. En síntesis, se eliminó la planeación del sistema eléctrico nacional a mediano y largo plazo, que reclama criterios técnicos de confiabilidad, optimización de costos y sustentabilidad.

La orientación nacionalista del gobierno actual busca sentar las bases para retomar el crecimiento de la economía, planeando como infraestructura básica la seguridad e independencia energética en el suministro de electricidad: Generación limpia, –incorporación de renovables EO, FV e Hidroeléctricas, hasta el máximo factible– cumpliendo con metas globales de menor emisión de CO², asegurando la confiabilidad del suministro, 100% de electrificación del país, el uso eficiente de la energía y atendiendo el incremento en la demanda de los vehículos eléctricos para sustituir los combustibles fósiles en el transporte.

² Es el acrónimo de “Proyecto de Inversión de Infraestructura Productiva con Registro Diferido en el Gasto Público” el cual es la denominación genérica con la cual se hace referencia a los proyectos de obra pública financiada por el sector privado o social y construidos por un privado o un tercero.

³ Francia es el país de la Unión Europea con mayor independencia energética en materia de electricidad: En la segunda mitad del siglo pasado logró consolidar un bloque de generación nuclear con apoyo gubernamental en el financiamiento, y ha exportado a sus países vecinos a precios altos, con costo casi cero por su parque de generación ya amortizado.

Se presenta un escenario de planeación conceptual de transición energética a 15 años para cumplir con estos objetivos estratégicos, atender un pronóstico de crecimiento anual de 4% para alcanzar una demanda máxima en 2036 de 90 Gigawatts (GW)⁴ y 585 Terawattshora (TWH)⁵ de energía suministrada anual (casi el doble que el actual), y generación distribuida autónoma FV para 30 millones de usuarios, con una opción de infraestructura eléctrica futura factible, sustentable⁶, y libre de especulación.

Si se logra integrar una planeación de la transición energética nacional en materia de electricidad similar a este escenario, se logrará una infraestructura confiable de suministro que atraerá capitales internacionales productivos que detonen el crecimiento económico de México.

Desarrollo de un Escenario Estratégico para suministro eléctrico de transición.

El PIB actual de México es de 1.2 billones de dólares⁷ y los presupuestos anuales actuales del gobierno federal y del sector eléctrico nacional, son respectivamente 300,000 y 37,000 millones de dólares: La producción de bienes y servicios de un país depende del suministro de energía eléctrica, y debe ser abastecida continuamente con absoluta seguridad energética y sin depender del extranjero. El Gobierno Federal respaldaría el financiamiento sustentable de la infraestructura eléctrica, por ser columna vertebral del desarrollo económico nacional.

¿Puede hacer frente nuestro país a un crecimiento de la demanda de electricidad hasta casi el doble del actual, en los próximos 15 años? ¿Podrá reducir sustancialmente la emisión de CO²? ¿Puede el gobierno federal programar las inversiones requeridas de manera sustentable y sin acudir a inversión privada nacional o extranjera especulativa? ¿Se mantendrán las tarifas similares a las actuales? **Se presenta un escenario en el que es factible lograrlo.**

⁴ Un Gigawatts (GW) es un millón de kilowatts (KW).

⁵ Un Terawattshora (TWH) es mil millones de kilowatt horas (KWH)

⁶ Sustentable significa que los costos totales son amortizados por la tarifa de venta.

⁷ Un billón es un millón de millones.

I. Objetivos estratégicos del escenario

- Asegurar el abastecimiento de electricidad futuro sin restricciones, para un crecimiento sostenido de la economía del 3% anual, mínimo deseable para incrementar inversión nacional y extranjera productiva y mejorar la situación económica del país⁸. Significaría un 4% de crecimiento en la demanda de electricidad.
- No depender ilimitadamente del suministro del gas natural estadounidense.
- Asegurar por lo menos un 70% de energías limpias en el año 2036.
- Lograr un costo medio de la energía eléctrica sustentable, similar a la tarifa actual, mediante el autofinanciamiento nacional de la infraestructura eléctrica y evitando la especulación privada en el suministro de este bien de infraestructura básica.
- Atender: el 100% de electrificación de áreas aisladas del país con sistemas autónomos pequeños; medición por Internet y administración de la demanda en 45 millones de usuarios; uso eficiente de la energía en empresas y domicilios; promoción y apoyo para la instalación de paneles solares, baterías y generación de respaldo en 30 millones de domicilios para alimentar carros eléctricos para reducir emisión de CO².

II. Pronóstico de crecimiento de la demanda máxima y consumo anual

En la tabla siguiente se muestran el crecimiento anual del PIB en billones de dólares considerado para este escenario, también el incremento de la demanda máxima en GW y de la energía anual en TWH:

⁸ Si el crecimiento futuro es mayor se adelantarían las obras planeadas; y si es menor, se retrasarían las obras.

Plan Estratégico para lograr seguridad en el suministro de electricidad																
Concepto/ Año	2020 Real	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
PIB en billones de dólares	1.26	1.30	1.34	1.38	1.42	1.46	1.50	1.55	1.60	1.64	1.69	1.74	1.80	1.85	1.91	1.96
Demanda Máxima anual GW	50	52	54	56	58	61	63	66	68	71	74	77	80	83	87	90
Energía anual TWH	325	338	352	366	380	395	411	428	445	463	481	500	520	541	563	585

Demanda máxima y energía anual en 2020 obtenida del PRODESEN 2021 (Referencia 4)

Es importante ponderar la economía y la sustentabilidad del suministro eléctrico nacional con este escenario. La energía generada total acumulada en un período futuro de 15 años sería de 6,768 TWH, que representarían a un precio medio de 2.2 \$/KWH un ingreso por venta total de 15 billones de pesos mexicanos, equivalentes a 744,000 millones de dólares⁹.

Se considera: Un crecimiento anual promedio en demanda máxima y consumo de electricidad de 4%; generación distribuida autónoma FV en casas habitación y empresas para 30 millones de domicilios con carros eléctricos y 300,000 empresas productoras de bienes y servicios¹⁰, y la administración de su demanda por el CENACE a través de Internet; uso eficiente de la energía en envolventes de edificios y casas, y variadores de velocidad¹¹ en motores en empresas y en bombeos de agua.

Este pronóstico es el resumen que resulta de la proyección anual de demanda máxima de 51 nodos de carga distribuidos en el territorio nacional, con una tasa de crecimiento igual para efectos de integrar este escenario de expansión a 15 años. Se presenta en detalle por año, por nodo y agrupado por región, en el plano y tabla siguientes (Referencia 4):

⁹ La sustentabilidad del sistema eléctrico nacional aún con tarifas bajas explica el interés de los grandes inversionistas internacionales y nacionales, de participar de manera especulativa en el sector.

¹⁰ La generación distribuida autónoma en domicilios y empresas comprende el sistema FV, las baterías, y la generación de respaldo. Se considera el 75% para alimentar carros eléctricos y el resto para consumo interno de los hogares.

¹¹ Al reducirse la velocidad de un motor al 0.5 se disminuye la energía consumida al cubo (0.125)

Plano de nodos de carga en el sistema eléctrico nacional

MAPA 2.3.2. REGIONES DE TRANSMISIÓN DEL SEN



Fuente: Elaborado por la SENER con datos del CENACE.

Tabla de pronóstico de la demanda por nodo

Área	Región	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	Incr.				
01	02 Noroeste	1	1,403	1,459	1,517	1,578	1,641	1,707	1,775	1,846	1,920	1,997	2,076	2,159	2,246	2,336	2,429	2,526	1.80			
		2	629	654	680	707	735	765	795	827	860	895	930	968	1,006	1,047	1,091	1,138	1,188	1.80		
		3	465	483	502	521	541	562	584	607	631	656	682	709	738	768	800	833	868	1.80		
		4	446	461	478	494	511	529	548	568	589	611	634	658	683	709	736	764	793	824	1.80	
		5	602	620	639	659	680	701	723	746	770	795	821	848	876	905	935	966	1,000	1.80		
		6	492	511	531	551	572	594	617	641	666	691	718	746	775	805	836	868	901	936	1.80	
		7	493	512	531	551	571	592	613	634	656	679	703	728	753	779	805	832	860	889	1.80	
		8	577	598	620	642	665	689	714	740	766	793	821	850	880	911	943	976	1,011	1.80		
		9	306	312	318	324	330	336	342	348	354	360	366	372	378	384	390	396	402	1.80		
		10	406	412	418	424	430	436	442	448	454	460	466	472	478	484	490	496	502	1.80		
		11	1,137	1,183	1,230	1,279	1,330	1,384	1,436	1,496	1,556	1,619	1,683	1,751	1,821	1,894	1,969	2,048	2,130	1.80		
02	04 Noroeste	12	4,733	4,932	5,119	5,324	5,557	5,798	6,068	6,268	6,477	6,706	7,066	7,286	7,577	7,860	8,196	8,523	1.80			
		13	546	567	590	614	638	664	691	718	747	777	808	840	874	908	945	983	1.80			
		14	375	390	406	422	439	456	475	494	513	534	555	577	600	624	649	675	703	1.80		
		15	445	462	480	498	517	536	556	576	597	618	640	663	686	710	734	759	784	1.80		
		16	5,640	5,242	5,455	5,669	5,896	6,132	6,377	6,632	6,897	7,173	7,460	7,759	8,069	8,392	8,728	9,077	9,430	1.80		
		17	1,138	1,183	1,231	1,280	1,331	1,384	1,440	1,497	1,557	1,620	1,684	1,752	1,822	1,895	1,971	2,049	2,130	1.80		
		18	328	341	355	369	383	399	415	431	449	467	485	505	525	546	568	590	614	1.80		
		19	778	809	841	875	910	946	984	1,024	1,065	1,107	1,151	1,197	1,245	1,295	1,347	1,401	1,450	1.80		
		20	253	263	273	284	296	308	320	333	346	360	374	389	405	421	438	455	473	1.80		
		21	9,699	10,087	10,491	10,910	11,347	11,800	12,272	12,763	13,274	13,805	14,357	14,931	15,529	16,150	16,796	17,467	18,160	1.80		
		03	05 Occidental	22	2,448	2,545	2,647	2,754	2,863	2,976	3,221	3,350	3,484	3,623	3,768	3,919	4,075	4,238	4,408	4,600	1.80	
23	2,015			2,148	2,234	2,323	2,416	2,513	2,613	2,718	2,826	2,939	3,057	3,179	3,306	3,439	3,576	3,719	1.80			
24	1,058			1,090	1,144	1,190	1,238	1,287	1,339	1,392	1,448	1,506	1,566	1,629	1,694	1,762	1,832	1,905	1.80			
25	1,014			1,033	1,053	1,074	1,096	1,119	1,143	1,168	1,193	1,218	1,243	1,269	1,294	1,320	1,346	1,372	1,400	1.80		
26	662			683	716	745	775	806	838	872	906	943	983	1,025	1,069	1,113	1,147	1,193	1,80			
28	315			327	341	354	368	383	398	414	431	448	466	485	504	524	545	567	590	1.80		
29	2,180			2,267	2,358	2,452	2,550	2,652	2,758	2,869	2,984	3,103	3,227	3,356	3,490	3,630	3,775	3,926	1.80			
30	10,617			11,041	11,483	11,942	12,420	12,917	13,433	13,971	14,530	15,111	15,715	16,344	16,997	17,677	18,384	19,120	1.80			
31	8,188			8,484	8,824	9,177	9,544	9,925	10,322	10,725	11,165	11,611	12,076	12,559	13,061	13,584	14,127	14,692	1.80			
04	07 Oriental			32	535	546	558	571	584	598	614	630	646	661	677	693	708	724	741	758	776	1.80
				33	609	633	659	685	712	741	771	801	833	867	901	938	975	1,014	1,055	1,097	1.80	
		34	2,014	2,095	2,179	2,266	2,356	2,451	2,549	2,651	2,757	2,867	2,981	3,101	3,225	3,354	3,488	3,627	1.80			
		35	492	512	533	554	576	599	623	648	674	701	729	758	788	820	853	887	921	1.80		
		36	769	800	832	865	900	936	973	1,012	1,052	1,095	1,138	1,184	1,231	1,280	1,332	1,385	1,80			
		37	229	239	248	258	268	278	289	300	311	322	333	344	355	366	377	388	400	1.80		
		38	938	975	1,014	1,055	1,097	1,141	1,186	1,234	1,283	1,335	1,388	1,444	1,501	1,561	1,624	1,689	1,80			
		39	627	652	679	706	734	763	794	826	859	893	929	966	1,004	1,045	1,086	1,130	1.80			
		40	6,858	7,133	7,418	7,715	8,023	8,344	8,678	9,025	9,386	9,762	10,152	10,558	10,981	11,420	11,877	12,352	1.80			
		41	695	723	752	782	813	846	880	915	951	989	1,029	1,070	1,113	1,157	1,204	1,252	1.80			
		42	38	40	42	43	45	46	47	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	1.80		
05	01 Baja California	43	1,845	1,919	1,996	2,076	2,159	2,245	2,335	2,428	2,526	2,627	2,732	2,841	2,955	3,073	3,196	3,323	1.80			
		44	857	891	927	964	1,003	1,043	1,085	1,128	1,173	1,220	1,269	1,320	1,372	1,427	1,484	1,544	1.80			
		45	212	221	229	238	248	258	268	279	290	302	314	326	339	353	367	382	1.80			
		46	3,288	3,550	3,823	4,108	4,403	4,709	5,026	5,354	5,694	6,046	6,411	6,789	7,181	7,587	8,007	8,441	8,890	1.80		
		47	2,651	2,757	2,867	2,982	3,101	3,226	3,355	3,489	3,628	3,773	3,924	4,081	4,245	4,414	4,591	4,775	4,966	1.80		
		48	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	1.80		
		49	186	193	201	209	217	226	235	245	255	265	275	286	298	309	322	335	340	1.80		
		50	165	172	179	186	194	201	209	218	226	235	245	255	265	276	287	298	308	1.80		
		51	32	32	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	1.80		
		52	432	449	467	486	505	525	546	568	591	615	639	665	691	719	748	778	808	1.80		
		53	40,322	51,582	53,893	57,788	57,384	60,251	62,661	65,168	67,774	70,482	73,290	76,227	79,288	82,483	85,798	89,168	1.80			

III. Escenario de expansión del sistema eléctrico nacional

1. Generación. Los compromisos ecológicos nos llevan a considerar nuevas plantas nucleares para generación base con una capacidad total de 32 GW¹², que se irían instalando conforme sea factible construirlas, y se incrementa la demanda¹³. Dadas la dependencia y la volatilidad actual y futura del precio del gas natural de importación, se reduce al mínimo su uso en este escenario de transición¹⁴. También se aprovecharían al máximo las fuentes renovables: Hidroeléctricas (24 GW)¹⁵; FV y EO (22 GW), con baterías y respaldo de generación de C.I.¹⁶ de rápido arranque.

En el periodo de 15 años considerado se estiman 78 GW de generación adicional de energía limpia, con 32 GW de plantas base nucleares que producirían electricidad limpia todas las horas del año: se incluyen 10 nuevas centrales repartidas en las costas del territorio nacional utilizando tanto unidades de 1,400 MW, como mininucleares de 500 MW que reducen significativamente su periodo de construcción.

Primeramente, analizaremos el balance de potencia con la capacidad instalada en las actuales centrales generadoras en operación y las futuras consideradas en este escenario¹⁷:

¹² La generación base atiende la demanda que permanece las 8,760 horas del año.

¹³ Si se aprovecha al máximo el potencial geotérmico nacional con la tecnología de roca caliente, podría disminuirse radicalmente la generación nuclear.

¹⁴ A 13 dólares/MBTU del gas natural, se equiparan los costos nivelados de la tecnología nuclear con los ciclos combinados.

¹⁵ Se considera una primera etapa de proyectos de generación hidroeléctrica en el Rio Usumacinta a mediano plazo, buscando acuerdos con comunidades y gobierno de Guatemala. El Usumacinta tiene 8 veces el flujo del Grijalva, y se incluye de manera parcial la aportación de esta fuente primaria de energía.

¹⁶ Generación de combustión Interna de Arranque Rápido (CI), para respaldar por pocas horas al año la falta de sol o viento.

¹⁷ La potencia máxima es la energía total demandada en una hora que obligadamente debe ser suministrada, aunque ocurra una sola vez en el año.

Escenario generación limpia (Baja dependencia energética y mínimo CO2)																
Concepto/ Año	2020 Real	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Demanda Maxima anual GW	50	52	54	56	58	61	63	66	68	71	74	77	80	83	87	90
Hidroeléctrica de CFE	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Ciclos combinados antiguos de CFE	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Ciclos combinados nuevos de CFE	5	6	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Ciclos combinados PEE	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Vapor de CFE Carbón	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Vapor de CFE Dual	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Nuclear CFE actual	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Ciclos Combinados Privados LIE y CIL	12	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Eólicos Privados	6	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Fotovoltaicos privados	6	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Nuclear nueva						3	6	8	10	22	26	28	29	30	31	32
Hidroeléctrica nueva										6	8	12	16	20	24	24
Ciclos combinados nueva						0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Eólicos Nuevos						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fotovoltaicos Nuevos						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Total capacidad GW	81	86	91	94	97	102	107	111	115	135	143	151	158	165	172	175

Capacidad efectiva de las plantas generadoras existentes del año 2020 obtenida del PRODESEN 2021 con ajustes realizados por el autor. (Referencia 4)

La generación anual ya balanceada, acorde con la tecnología y factor de planta anual¹⁸ de cada grupo de centrales sería:

Concepto/ Año	2020 Real	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Energía anual TWH	325	338	352	366	380	395	411	428	445	463	481	500	520	541	563	585
Hidroeléctrica de CFE	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Ciclos combinados antiguos de CFE	15	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ciclos combinados nuevos de CFE	25	47	63	62	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79
Ciclos combinados PEE	98	64	54	65	64	53	39	35	63	0	0	0	0	0	0	0
Vapor de CFE Carbón	12	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	24	7	0	0
Vapor de CFE Dual	19	0	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nuclear CFE actual	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Ciclos Combinados Privados LIE y CIL	93	110	118	118	118	118	118	118	88	54	36	19	34	52	61	63
Eólicos Privados	16	18	21	24	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
Fotovoltaicos privados	11	12	14	16	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Nuclear nueva	0	0	0	0	0	24	47	63	79	173	205	221	229	237	244	252
Hidroeléctrica nueva							0	0	0	16	21	32	42	53	63	63
Ciclos combinados nueva																0
Eólicos Nuevos						3	5	8	11	13	16	18	21	24	26	29
Fotovoltaicos Nuevos						2	4	5	7	9	11	12	14	16	18	19
Total generado TWH	325	338	352	366	380	397	411	428	445	463	486	500	522	546	571	585

En estas tablas 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.

3. La expansión de los sistemas de subtransmisión y distribución, significan el desarrollo normal de las redes que complementan los sistemas de generación y transmisión antes expuestos, y atenderán de manera tradicional el crecimiento de la red de subtransmisión. Las líneas de CD se interconectarían a los nodos de carga principales y se aprovecha la red regional existente de 400 KV.

También en un período sexenal, es factible lograr el 100% de la electrificación de la población, mediante la promoción de sistemas aislados autónomos y sustentables (con celdas FV, baterías, y generación de C.I.).

4. 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), es conveniente evaluar para respaldo contar con cuatro estaciones de gasificación adicionales a las dos actuales, para importación de GNL de cualquier país productor del mundo²⁰; también se habilitarán cavernas de almacenaje de gas natural, juntamente con Pemex y la SENER; la capacidad de estas instalaciones permitiría conservar el flujo constante de GNL importado por buque, en períodos de disminución del suministro de importación.

Con la generación nuclear instalada se sustituirá el gas natural de importación en su mayor parte, y en condición de especulación extrema de los estadounidenses o amenaza de corte, es factible la opción de importación de GNL aun en periodos largos, logrando México suministro y gasto controlado. Por otra parte, nuestro país podría también habilitar plantas de licuefacción para exportar GNL a precios competitivos si se importa gas barato²¹.

²⁰ No se evalúa esta inversión.

²¹ Es conveniente evaluar esta opción.

IV. Impacto económico del escenario de expansión del sistema eléctrico nacional, para un período de 15 años

- 1. Generación.** Producir electricidad limpia a base de generación nuclear, hidroeléctrica, eólica y fotovoltaica, implica costos de inversión muy altos. Obtener una baja tasa de interés que se aplicaría durante 25 años es crucial para optimizar el financiamiento de las plantas. Si las plantas generadoras se contratan llave en mano con las empresas internacionales más competitivas del mundo para obtener costos bajos, y se pueden canalizar los fondos de ahorro de los mexicanos (AFORE) para financiar la expansión del sistema eléctrico, con una tasa anual en dólares de 5%, sería sustentable el plan de ganar-ganar, tanto para las pensiones de los mexicanos como para la infraestructura energética del país²².
- 2. ¿Cuál es el monto de inversión requerido en generación limpia para este escenario sustentable de expansión del sistema eléctrico mexicano?**

Tecnología	Capacidad total MW	Costo unitario Dólares/KW	Costo total Millones de dólares	Costo total unitario \$/KWH
Nuclear	32,000	6,502	208,064	1.54
Hidroeléctrica	24,000	3,600	86,400	2.33
Eólica	11,000	2,900	31,900	1.88
Fotovoltaica	11,000	2,100	23,100	2.04
Total	78,000		349,464	1.73
Inversión financiada a 25 años con interés de 5 % anual.				

Los costos unitarios de las diferentes tecnologías de plantas se obtienen del COPAR 2015, actualizado a 2020 por inflación y aplicando menor tasa de interés. (Referencia 5)

En centrales generadoras este escenario a 15 años comprende 349,464 millones de dólares de inversión (3.5 veces el PRODESEN actual), para programarse conforme crece la demanda y se construyen las plantas; 60% de la inversión corresponde a la tecnología nuclear, cuyos costos fijos son altos pero el combustible nuclear es barato, opera

²² Otra opción sería obtener créditos internacionales a tasas menores.

el 90% de las horas del año, y el costo total nivelado final²³ es menor a las hidroeléctricas, eólicas y fotovoltaicas (con respaldo), y casi igual que las plantas de ciclo combinado con gas natural a 13 dólares/MBTU (1.53 \$/KWH).

El impulso a las cadenas productivas nacionales²⁴ causado por estos montos de inversión de infraestructura energética sustentable y ecológicamente sostenible, sería el detonador para la incursión de México como país desarrollado.

El flujo anual de inversión de las plantas generadoras consideradas en este escenario de transición energética, si se logra financiamiento a 25 años con tasa de interés de 5%, es sustentable porque los costos fijos de inversión equivalen a un costo medio unitario de 1.36 \$/KWH:

Flujo anual de inversión en generación financiada a 25 años con interes del 5% anual (millones de dólares)																
Concepto/ Año	2020 Real	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Nuclear nueva	0					1,384	2,767	3,690	4,612	10,147	11,992	12,914	13,375	13,836	14,298	14,759
Hidroeléctrica nueva	0					0	0	0	0	1,533	2,044	3,065	4,087	5,109	6,131	6,131
Eólicos Nuevos	0					206	412	617	823	1,029	1,235	1,440	1,646	1,852	2,058	2,263
Fotovoltaicos Nuevos	0					149	298	447	596	745	894	1,043	1,192	1,341	1,490	1,639
Pago de inversión anual en millones de dólares	0	0	0	0	0	1,738	3,477	4,754	6,031	13,453	16,164	18,463	20,301	22,138	23,976	24,792
Costo unitario de inversión \$/KWH						1.24	1.24	1.25	1.25	1.27	1.28	1.31	1.33	1.35	1.37	1.36

Los Costos variables de las plantas eólicas, fotovoltaicas e hidroeléctricas son de un 20% adicional sobre los costos fijos, y en las nucleares de 32%. Significan un de costo unitario de 0.37 \$/KWH:

Flujo anual de operación y mantenimiento en generación (millones de dólares)																
Concepto/ Año	2020 Real	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Nuclear nueva	0					443	886	1,181	1,476	3,247	3,837	4,132	4,280	4,428	4,575	4,723
Hidroeléctrica nueva	0					0	0	0	0	307	409	613	817	1,022	1,226	1,226
Eólicos Nuevos	0					41	82	123	165	206	247	288	329	370	412	453
Fotovoltaicos Nuevos	0					30	60	89	119	149	179	209	238	268	298	328
Pago variable anual en millones de	0	0	0	0	0	514	1,027	1,394	1,760	3,908	4,672	5,242	5,665	6,088	6,511	6,729
Costo unitario variable \$/KWH						0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37

El costo unitario total nivelado de generación en el año 2036 sería de 1.73 \$/KWH. Es un valor menor que el precio marginal promedio de 2018 en el Mercado Eléctrico Mayorista con 2.20 \$/KWH²⁵.

²³ El costo unitario nivelado total es la suma de costos fijos de inversión y costos variables de operación y mantenimiento.

²⁴ Se contrataría a empresas extranjeras fabricantes de equipos de alta tecnología, pero con la mayor integración nacional.

²⁵ El Mercado Mayorista es especulativo: despacha las unidades privadas de menor costo variable y les paga con la de mayor costo.

Concepto/ Año	Flujo anual total en generación (millones de dólares)															
	2020 Real	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Nuclear nueva	0					1,826	3,653	4,870	6,088	13,394	15,829	17,046	17,655	18,264	18,873	19,482
Hidroeléctrica nueva	0					0	0	0	0	1,839	2,452	3,678	4,904	6,131	7,357	7,357
Eólicos Nuevos	0					247	494	741	988	1,235	1,482	1,728	1,975	2,222	2,469	2,716
Fotovoltaicos Nuevos	0					179	358	536	715	894	1,073	1,252	1,430	1,609	1,788	1,967
Pago total anual en millones de d\$	0	0	0	0	0	2,252	4,504	6,148	7,791	17,362	20,836	23,705	25,966	28,226	30,487	31,521
Costo unitario total \$/KWH						1.61	1.61	1.61	1.62	1.64	1.65	1.68	1.70	1.72	1.74	1.73

3.Transmisión. Total 30,000 millones de dólares: La inversión para construir 10,000 KM de líneas de transmisión de corriente directa es de 20,000 millones de dólares; y 10,000 millones de dólares adicionales para atender la expansión normal de las cargas con subestaciones y líneas convencionales, para suministrar energía a distribución, fibra óptica, y sistemas automáticos modernos de protección y comunicación.

Distribución. Se requieren 15,000 millones de dólares para atender la expansión de las subestaciones y líneas de subtransmisión, las redes automáticas de distribución, el 100% de electrificación, la medición a través de Internet de 60 millones de usuarios incluyendo la administración de la demanda, y la promoción de carros eléctricos sustentables en domicilios²⁶.

Comprende la promoción con 2,000 millones de dólares para instalar sistemas autónomos pequeños con celdas FV, batería y generador de combustión interna, para dotar de electricidad a un millón de mexicanos en comunidades menores de 100 habitantes, con un consumo promedio de 5 KWH diarios por familia.

La inversión total requerida en este escenario de transición energética para Transmisión y Distribución es de 45,000 millones de dólares, y significan un impacto unitario de 0.18 \$/KWH, si se financian a 25 años con una tasa de interés de 5%/año:

Concepto/ Año	Flujo anual de inversión en transmisión y distribución (T y D) financiada a 25 años con interes del 5 % anual (millones de dólares)															
	2020 Real	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Nuclear nueva acumulada GW						3	6	8	10	22	26	28	29	30	31	32
Inversión Acum Línea de CD Mill. de dólares						1,875	3,750	5,000	6,250	13,750	16,250	17,500	18,125	18,750	19,375	20,000
Cargo fijo anual en Mill. Dls.						133	266	355	443	976	1,153	1,242	1,286	1,330	1,375	1,419
Inv. anual de T y D desarrollo normal	1,250	1,300	1,352	1,406	1,462	1,521	1,582	1,645	1,711	1,779	1,850	1,924	2,001	2,081	2,165	
Inversión acumulada T y D Mill Dls	1,250	2,550	3,902	5,308	6,770	8,291	9,873	11,518	13,228	15,008	16,858	18,782	20,784	22,865	25,029	
Cargo fijo anual T y D Mill. Dls.	89	181	277	377	480	588	700	817	939	1,065	1,196	1,333	1,475	1,622	1,776	
Cargo fijo anual total Línea CD y T y D, Mill. Dls.	89	181	277	377	480	613	754	905	1,061	1,218	1,388	1,569	1,762	1,967	2,185	
Costo unitario T y D \$/KWH						0.44	0.30	0.28	0.26	0.18	0.18	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18

²⁶ Autofinanciables para cada usuario, con los ahorros en gasolina.

Impacto de la Inversión Total. La inversión total requerida para el período de 15 años que comprende este escenario de transición energética es de 394,464 millones de dólares:

Concepto	Costo total Millones de dólares	Costo total unitario \$/KWH
Generación	349,464	1.73
Transmisión - Distribución	45,000	0.18
Total	394,464	1.91
Inversión financiada a 25 años con interés de 5% anual.		

El costo de inversión de esta propuesta de escenario de transición energética para lograr seguridad energética nacional y cumplimiento en metas de emisión de CO², presenta requerimientos de inversión cuatro veces mayor a los tradicionales comprendidos en el PRODESEN, y se obtendrá una proporción de inversión respecto del PIB como el de países desarrollados. Sin embargo, la propuesta es sustentable porque el costo nivelado de la energía nuclear es menor al de las energías renovables intermitentes, e igual al de la generada con ciclos combinados y gas natural a 13 dólares/MBTU

La fortaleza estratégica de nuestro país en materia energética sería por disponer de una mezcla de tecnologías para generación mayoritariamente limpia, continuar por varios lustros aprovechando la vecindad con un país productor de gas natural de bajo precio, sin depender de ellos, y tener infraestructura de generación y transmisión suficientemente robusta para atender el crecimiento a más largo plazo. Muy importante para lograr independencia energética total, desarrollar el potencial geotérmico nacional con tecnología de roca caliente, para sustituir tanto la generación total con gas natural importado como la generación nuclear, que, aunque competitiva en su costo implica importación del combustible y riesgo de residuos radiactivos.

V. Administración de la demanda. 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.

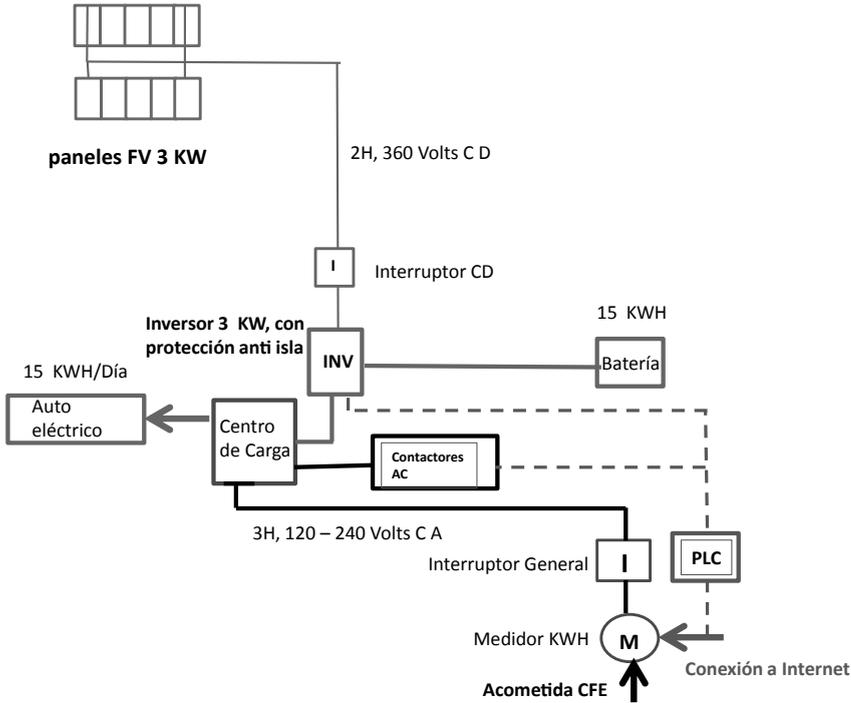
En la medición conectada a Internet se instalaría para cada usuario una tarjeta inteligente con un PLC²⁷, capaz de transmitir por Internet en tiempo real los cinco minutos de la medición de kilowatt-hora y de tener contactos de control para administrar la demanda.

Para los usuarios domésticos, al interruptor general del usuario se le agregarían dos contactores (controlados por el CENACE) para administrar cargas interrumpibles, como sería el aire acondicionado y los cargadores de batería de los autos eléctricos. Las ventajas serían muchas: Se evitarían lecturas y reparto de recibos, se sustituirían los disparos automáticos por falta de generación por desconexión de cargas interrumpibles; se administraría también horario para carga de baterías de autos eléctricos, optimizando la curva de cientos de miles de casos en cada región eléctrica; y se aplicarían con sencillez tarifas con cargos e incentivos a los usuarios.

Para las empresas productoras de bienes y servicios que consumen el 70% de la energía eléctrica nacional, se justifica con mayor celeridad instalar sistemas inteligentes con similar grado de sencillez, para administrar la demanda e implantar uso eficiente de energía. El mundo reclama acciones eficaces para disminuir la contaminación, sin tanta publicidad y especulación.

²⁷ Control Lógico Programable (PLC) para automatización.

VI. Autos eléctricos con panel FV y batería, en casa habitación. Se estima que para el año 2036 se generarían 160 TWH con 30 millones de sistemas FV distribuidos autónomos de 6 KW, para cargar diariamente sus carros eléctricos; también alimentarían su consumo interno con un total de 80 TWH por año. El esquema propuesto para generación distribuida, con administración de la demanda y autonomía de carga para los autos eléctricos es:

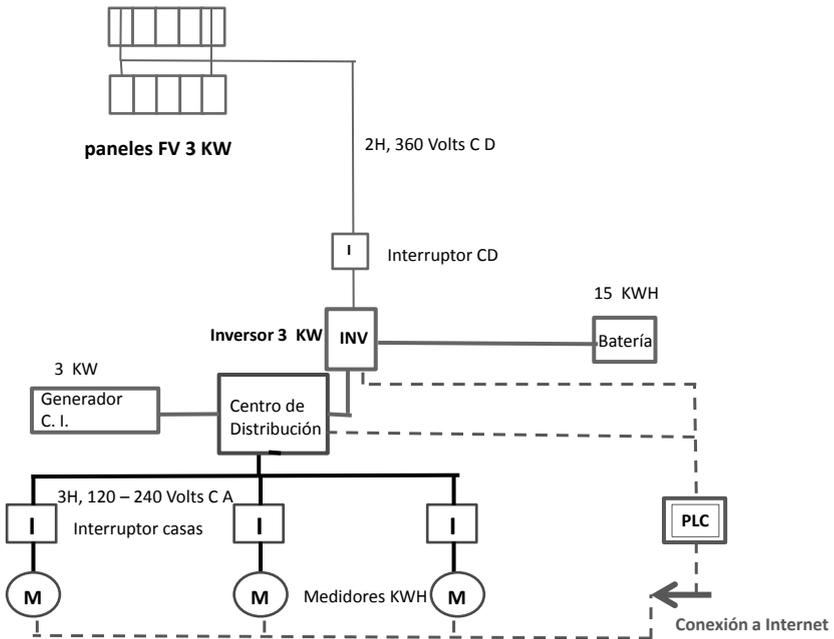


El gobierno federal podría financiar la instalación de los paneles fotovoltaicos, batería, generación de respaldo²⁸ y la adquisición de carros eléctricos pequeños, amortizables en menos de cinco años con el ahorro en combustibles fósiles; además, se lograría una reducción radical de emisión de CO₂. La administración de la demanda y el uso del respaldo de la batería contribuirá a incrementar la confiabilidad y a llenar los valles de la curva diaria del Sistema Eléctrico Nacional²⁹.

²⁸ Es factible instalar un generador de combustión interna de gas natural o butano, para respaldar los pocos días lluviosos de baja incidencia solar.

²⁹ Muy importante promover la fabricación nacional de autos eléctricos.

VI. Sistemas autónomos para comunidades menores de 100 habitantes. El esquema propuesto es modular para tres usuarios y 3 KW, con paneles FV, baterías, y generadores de combustión interna a base de gasolina o gas LP. Se dispondría de un centro de distribución y acometidas de 240 volts 3 hilos, para suministrar a cada usuario hasta un Kilowatt de demanda y 5 KWH promedio por día.



Bajo el supuesto que pudiera tenerse mayor concentración geográfica de viviendas, pueden acoplarse varios módulos de 3 KW en una misma comunidad.

Conclusión.

Este escenario de expansión del sistema eléctrico nacional propone aplicar una política nacionalista para evitar ser globalizados por las grandes economías que ahora compiten por el mundo; se demuestra la factibilidad de hacer frente al crecimiento casi al doble de la demanda actual de electricidad en los próximos 15 años, reducir sustancialmente la emisión de CO² programando toda la expansión de generación con energía limpia, y también eliminar la pobreza energética de un millón de mexicanos sin acceso a electricidad.

El gobierno federal, a través de CFE, programaría las inversiones requeridas de manera sustentable, sin acudir a inversión privada nacional o extranjera y sin afectar los recursos destinados a infraestructura social. Lo más importante es el compromiso de CFE como monopolio de Estado para mantener tarifas eléctricas estables muy similares a las actuales y libres de la especulación de los mercados mayoristas que favorecen a inversionistas privados.

Con este escenario de expansión, para el año 2036 se requiere una inversión acumulada de casi 400,000 millones de dólares de inversión, y los ingresos por venta acumulados en ese mismo período serían de 744,000 millones de dólares: si se logra como país absoluta honradez en el financiamiento de los recursos, los concursos de los fabricantes y constructores éticos, y la administración eficaz de los cientos de proyectos ejecutados por empresas privadas constructoras competitivas nacionales y extranjeras, la sustentabilidad estaría asegurada, con el beneficio para todas las empresas productoras de bienes y servicios y usuarios domésticos, que tendrían suministro de electricidad asegurada a bajo precio.

Tengamos presente que sin electricidad no hay economía, y si el PIB eléctrico representa el 3% del PIB nacional, la electricidad es el bien que permite sea factible tener el restante 97% del PIB nacional.

Referencias:

Aguirre M. (2022). *Series Históricas del Producto Interno Bruto de México desde 1896 hasta 2021 Transportadas a bases de 1993, 2003, 2008 y 2013*. México Maxico. Recuperado el 25 de febrero del 2022 de <http://www.mexicomaxico.org/Voto/PIBMex.htm>

Dirección General Subdirección de Programación. Comisión Federal de Electricidad. (2014). *Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico POISE 2014-2018*. Amdee.org. <https://amdee.org/Publicaciones/POISE-2014-2028.pdf>

SENER Secretaría de Energía. Gobierno de México. (2018). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2018-2032*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf>

SENER Secretaría de Energía. Gobierno de México. (2021). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2021-2035*. [https://base.energia.gob.mx/dgaic/DA/P/SubsecretariaElectricidad/ConjuntosProyectosInversion/SENER_07ProgramaDesarrolloSistemaElectricoNacional2021-2035\(PRODESEN\).pdf](https://base.energia.gob.mx/dgaic/DA/P/SubsecretariaElectricidad/ConjuntosProyectosInversion/SENER_07ProgramaDesarrolloSistemaElectricoNacional2021-2035(PRODESEN).pdf)

Subdirección de Programación. Coordinación de Evaluación. Comisión Federal de Electricidad. (2015). *Costos y Parámetros de Referencia de Generación (COPAR 2015)*. <https://docplayer.es/90380067-Copar-2015-generacion-subdireccion-de-programacion-coordinacion-de-evaluacion-edicion-35.html>