



COMPARACIÓN DE OPCIONES PARA LA EXPANSIÓN A LARGO PLAZO DEL SECTOR ELÉCTRICO MEXICANO USANDO EL MODELO DECADES

Josefa Esmeralda Ibars Hernández *

Comisión Federal de Electricidad. Subdirección de Programación.

Ingeniero Industrial Químico egresado del Instituto Tecnológico de Veracruz. Tiene la Maestría en Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana y tiene la Especialidad en Estadística Aplicada del Instituto de Investigación en Matemáticas Aplicadas y Sistemas de la UNAM. A partir de octubre de 1992, se encuentra laborando en la Gerencia de Evaluación y Programación de Inversiones de la CFE, donde es responsable de los proyectos ambiental y energético.



Jorge Fernández Velázquez

Comisión Federal de Electricidad. Subdirección de Programación.

Dirección del autor principal (*): Paseo de la Reforma # 164 piso 10 Col. Juárez C.P. 06600 México, D. F.
México Tel.: (01 55) 5229-4400 Ext. 7359 Fax: (01 55) 5705-2319 e-mail: josefa.ibars@cfе.gov.mx

RESUMEN

El proyecto consiste en la adquisición, aplicación y uso de la herramienta DECADES, con datos del modelo WASP, para la elaboración de una base de datos específica para México. El DECADES incluye a los factores técnicos, económicos y medioambientales de las tecnologías de generación y de las cadenas energéticas, en el proceso de planificación y decisión que constituyen el Sector de la Electricidad hasta el año 2024. Además, con la finalidad de obtener un plan de expansión robusto y tener elementos para la adecuada toma de decisiones, se ha realizado la comparación de un caso base con trece casos alternativos que analizan la sensibilidad con un escenario alto de la demanda, análisis de la opción nuclear, el impacto de la escalación de los precios de los combustibles fósiles, las limitaciones en la instalación de nuevas unidades a base de gas natural, la variación en la tasa de descuento y el cambio en el criterio de confiabilidad.

Palabras Clave: Planeación, Electricidad, Emisiones, México, Expansión.

INTRODUCCIÓN

Para la planeación de la expansión del sistema eléctrico mexicano, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) cuenta con el programa WASP que le fue suministrado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA, IAEA por sus siglas en inglés) en 1984, herramienta de planeación uniodal de la expansión de la capacidad de generación que considera aspectos técnicos y económicos de las tecnologías de generación disponibles. Pero era necesario adquirir la herramienta DECADES (Databases and Methodologies for Comparative Assessment of Different Energy Sources) para crear la base de datos específica para México y así poder integrar los aspectos ambientales a la planeación de mediano y largo plazo hasta el año 2024 para el Sistema Interconectado Mexicano (sin el Área Noroeste).

A petición de México, el OIEA dirigió y dio el financiamiento para el proyecto interinstitucional MEX/0/012 donde participaron expertos de la Secretaría de Energía, de la CFE, del Programa Universitario de Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México y del propio OIEA. En este proyecto se realizó la evaluación comparativa de diferentes fuentes de generación de electricidad a largo plazo en México mediante el modelo DECADES, véase la figura 1.

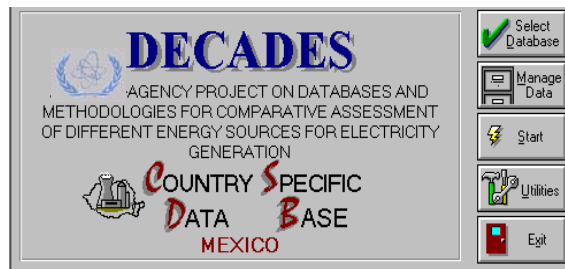


Figura 1: Proyecto DECADES. Base de Datos específica para México (CSDB)

El proceso de planeación de la generación para el Sistema Interconectado Mexicano muestra que, a fin de satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica, la cual en sus primeros 10 años tiene una tasa de crecimiento de 5.5%, es necesario seleccionar las mejores tecnologías para la expansión del sistema de generación con un adecuado nivel de confiabilidad y de mínimo costo.

El sistema de generación existente está integrado por plantas termoeléctricas de diferentes tipos, plantas hidroeléctricas, plantas de carbón, plantas nucleares y en menor escala por geotérmicas y de viento. En diciembre de 1998 la capacidad total instalada para el Sistema Interconectado (sin área Noroeste) alcanzó 30,142 MW. (CFE. GPSE. 1998). En la figura 2 se muestra la distribución de la capacidad en México.

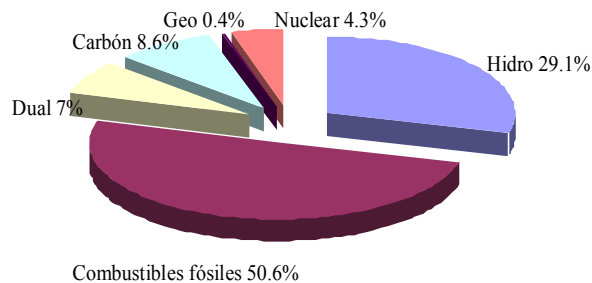


Figura 2: Participación de la capacidad por tipo en México.

Además del sistema existente en 1998, se considera un programa de retiros así como también un programa de unidades térmicas comprometidas o en proceso de construcción hasta el año 2002 que básicamente son unidades de ciclo combinado y turbinas de gas (SE, 1999), (CFE. GPSE, 1999).

OBJETIVOS

Crear la base de datos específica para México (Country Specific Data Base, CSDB) que incluye: fuentes energéticas, parámetros técnicos, económicos y ambientales de las tecnologías de generación y de las cadenas energéticas usando el DECADES. Además establecer el estudio del Sistema Interconectado para analizar la expansión de la generación hasta el año 2024, considerando sus impactos económicos y ambientales en un Caso Base y diferentes casos alternativos.

METODOLOGÍA EMPLEADA

La metodología empleada básicamente comprende el uso de dos modelos de planeación:

- ◆ DECADES (Base de datos con soporte en PARADOX con aplicaciones de los datos) para la evaluación comparativa de diferentes fuentes energéticas en la generación de electricidad. El fácil manejo de las bases de datos lo convierten en una herramienta diseñada para el análisis de costos y del impacto ambiental a nivel de planta, de

cadena energética completa y del sistema eléctrico de potencia. Además cuenta con una herramienta de análisis de decisión (DAM), (IAEA, 2000).

- ♦ WASP (Wien Automatic System Planning Package) es un modelo de planeación uninodal que determina mediante un proceso de optimización la expansión de la generación al largo plazo, donde se minimiza el costo de inversión, el de operación y mantenimiento y el de la energía no servida. (IAEA, 1995).

ACTIVIDADES DESARROLLADAS

El proyecto consiste en la adquisición, aplicación y uso de la herramienta DECADES con datos del modelo WASP del OIEA. El DECADES incluye a los factores medioambientales en el proceso de planificación y decisión que constituyen el Sector de la Electricidad. Además, con la finalidad de obtener un plan de expansión robusto y tener elementos para la adecuada toma de decisiones, se ha realizado la comparación de un caso base con trece casos alternativos que analizan la sensibilidad con un escenario alto de la demanda, análisis de la opción nuclear, el impacto de la escalación de los precios de los combustibles fósiles, las limitaciones en la instalación de nuevas unidades a base de gas natural, la variación en la tasa de descuento y el cambio en el criterio de confiabilidad.

El estudio se realizó en tres etapas: a nivel central, a nivel cadena energética y a nivel sistema.

ANÁLISIS A NIVEL CENTRAL

Los datos técnicos y económicos de las centrales generadoras actuales y las proyectadas, son obtenidos de las publicaciones de la CFE específicas para ello: COPAR (CFE. GEPI, 1998), Desarrollo del Mercado Eléctrico (CFE. GPSE, 1998) y Unidades Generadoras en Operación (Sistema Eléctrico Nacional) 1998 (CFE. GPSE, 1999). Los datos de combustibles se obtuvieron de comunicaciones directas con las gerencias responsables: para las centrales fósiles (CFE. GE, 1999), para las geotermoelectricas (CFE. GPG, 2001) y para las nucleares (CFE. GCN, 2001).

Para obtener los factores de emisión de los contaminantes atmosféricos, en g/kWh, de la tabla 1 se utiliza:

- Para los óxidos de azufre (SO_x, principalmente SO₂), la ecuación 5 de la NOM-085-ECOL-1994 (1994), misma que se explica en la figura 3.
- Para bióxido de carbono (CO₂), una fórmula propuesta por EPA(2000), que se explica en la figura 3.
- Para los óxidos de nitrógeno (NO_x), en los ciclos combinados existentes se usa 375 ppm y para los nuevos 110 ppm que es la emisión máxima solicitada en la licitación de los nuevos proyectos, dicho valor es el límite marcado por la NOM-085-ECOL-1994 (1994) para zonas críticas; las conversiones y unidades se explican en la figura 3.
- Para metano y partículas suspendidas totales y los demás factores de emisión considerados (CO, N₂O, NMVOC, HCl, HF y VOC total), se utilizó la publicación de EPA, 2000: para Carbón (sección “Sub-bituminous -Fired Dry Bottom Units Tangentially Fired”), para Gas natural (sección “Uncontrolled Large Industrial Boiler”) y para Combustóleo (sección “Uncontrolled Fuel Oil Combustion No. 6 Oil Fired, Normal Firing Utility Boilers”).
- Se consideraron mediciones reales de las centrales mexicanas existentes para la opción geotermoelectrica en g/kWh (CFE. GPG., 2001) y para la nuclear, en MBq/GWyr (CFE. GCN, 2001).

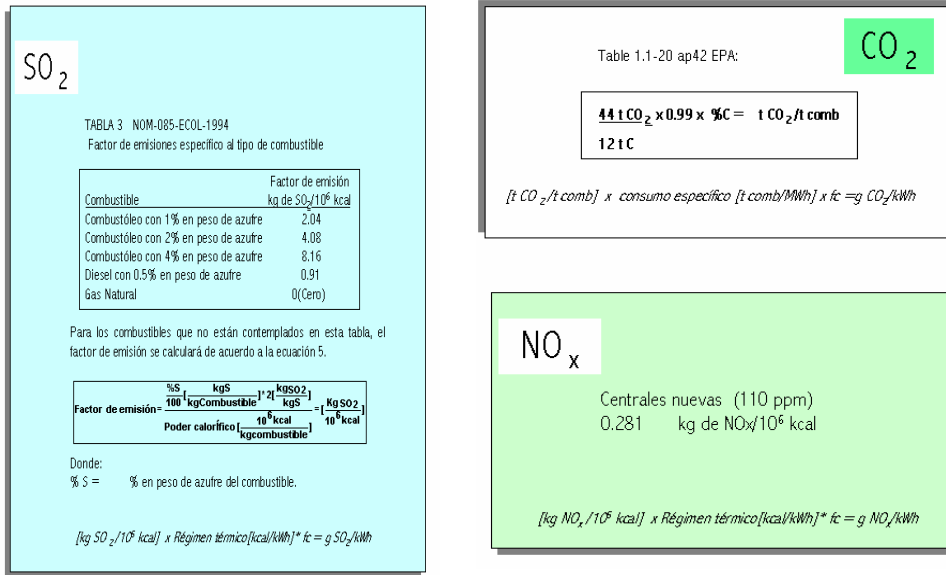


Figura 3: Fuente de información para los factores de emisión de SO₂, CO₂ y NO_x.

TABLA 1: Emisiones atmosféricas principales por tipo de central, en g/kWh.

Central existente	Combustible	SO ₂	NO _x	PST	CO ₂
C350	Carbón	10.66	4.68	0.6988	907.73
C300		6.92	4.15	0.5335	935.80
DP35		8.50	2.78	0.1178	722.18
V350	Combustóleo	18.97	1.39	1.1537	747.84
V300		19.81	1.48	1.2035	797.74
V250		22.87	1.47	1.3773	788.98
V160		20.19	1.46	1.2234	786.01
V150		23.51	1.51	1.4159	811.05
V082		23.18	1.68	1.4044	902.31
V075		23.18	1.68	1.4044	902.31
D350		19.47	1.37	1.1750	738.96
V036		27.66	2.03	1.6823	1,090.47
CC240		Gas natural	-	2.1039	-
CC220	-		2.3048	-	533.56
CC200	-		2.3403	-	541.79
CC174	-		1.6428	-	380.31
T122	-		2.4804	-	574.22
TG42	Diesel	0.31	21.41	0.6692	1,070.28
TG30		0.36	24.78	0.7745	1,238.68
TG14		0.45	31.18	0.9743	1,558.36

Central propuesta	Combustible	SO ₂	NO _x	PST	CO ₂
ND35	Carbón	0.88	2.877	0.122	747.03
CC54	Gas natural	-	0.496	-	391.79
T179		-	0.738	-	583.29

Se puede observar que prácticamente los ciclos combinados y las turbinas de gas no emiten óxidos de azufre ni partículas y que las nuevas centrales duales emiten casi seis veces los óxidos de nitrógeno y casi dos veces los bióxidos de carbono que emiten los nuevos ciclos combinados.

Como las centrales generadoras mexicanas actuales cumplen con los límites marcados por la NOM-085-ECOL-1994 (1994) en las zonas críticas y en el resto del país, no es necesario instalar equipo anticontaminante adicional. Las centrales carboeléctricas mexicanas tienen ya instalados precipitadores electrostáticos para el abatimiento de partículas.

En cuanto a costos de generación, los resultados del análisis a nivel son: si se utiliza un factor de planta del 80% o más el ciclo combinado tiene el costo nivelado más bajo y resulta ser la tecnología más atractiva para la expansión del sistema; para un factor de planta menor del 20%, la turbina de gas tiene el costo nivelado más bajo. La central dual y la opción nuclear no tienen costos competitivos, por lo cual no son tecnologías atractivas para la expansión.

ANÁLISIS A NIVEL CADENA ENERGÉTICA

Para la base específica de México, las cadenas desarrolladas fueron: Cadena de combustóleo, Cadena de diesel, Cadena de gas natural, Cadena de carbón, Cadena de uranio enriquecido, Cadena de vapor geotérmico, Cadena hidroeléctrica y Cadena eólica. Para cada central generadora en operación y proyectada, se desarrolló una cadena energética con aspectos técnicos y de emisión de contaminantes en cada etapa de la cadena (desde la etapa de extracción y preparación del combustible empleado, la propia generación de energía eléctrica y la disposición de residuos con sus respectivas emisiones entre las etapas de transporte), con datos de PEMEX, de la CFE y de los estudios PSEL-LCA (1996) y EPA (1996). Como ejemplo, véase en la figura 3 una cadena energética para una central que usa carbón.

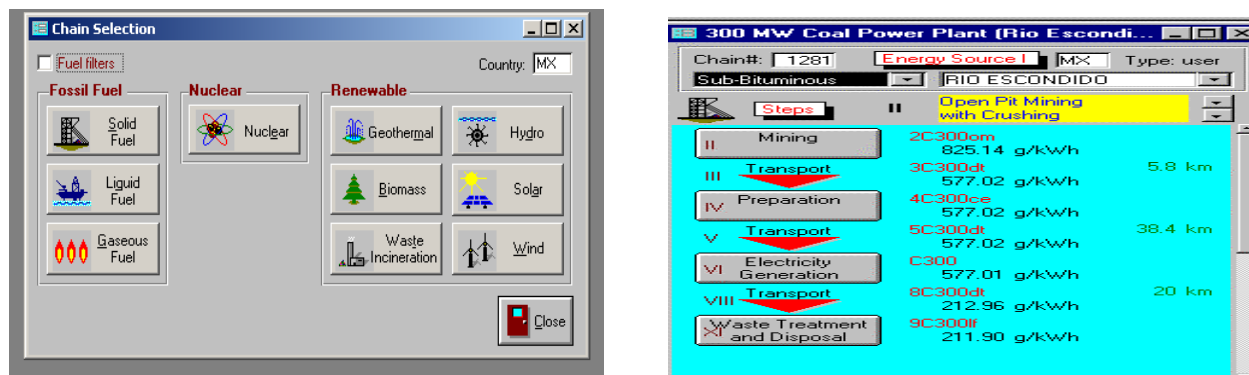


Figura 3: Esquemas de cadenas disponibles en DECADES y la de una central carboeléctrica mexicana.

ANÁLISIS A NIVEL SISTEMA:

Las suposiciones generales del CASO BASE fueron:

- Crecimiento de la demanda de 5.4% anual.
- No hay limitación en el suministro de gas.
- Tasa de descuento real de 10%.
- Costo de la energía no servida de 1.5 USD/kWh.

- Probabilidad de pérdida de carga (LOLP) de 3 días/año.
- Precio del gas natural de 2.66 dólares/GJ en 1998, con escalamiento promedio de 0.08% por año.
- Margen de reserva máximo de 30% y mínimo de 10%.
- Utilización de equipo anticontaminante en las unidades duales nuevas que utilizan carbón.

Como candidatos para la expansión del sistema se consideraron a la central de ciclo combinado de 546 MW, la central turbogás de 179 MW, la central dual de 350 MW que incluye equipo desulfurador, la central nuclear de 1356 MW y 31 diferentes proyectos hidroeléctricos, sus valores de emisiones atmosféricas pueden verse en la tabla 1. La evolución de la demanda de electricidad en el Sistema Interconectado comienza con 21,236 MW en 1998, con un crecimiento de 5.4% por año para alcanzar 37,962 MW en 2009. La proyección continua del 2010 al 2024 con una tasa media de crecimiento de 4.5% por año, para alcanzar 73,686 MW.

El presente análisis de la expansión del Sistema Interconectado muestra que la mayor parte de la capacidad adicional se desarrolla en base a gas natural, se requieren en promedio entre 3 y 7 nuevas centrales de ciclo combinado de 546 MW, para ser puestas en operación anualmente. La capacidad total adicionada al sistema está compuesta de la siguiente manera: 118 unidades de ciclo combinado de 546 MW, 6 turbinas de gas de 179 MW y 5 proyectos hidroeléctricos comprometidos durante los primeros años del estudio. Lo anterior se ilustra en la figura 5.

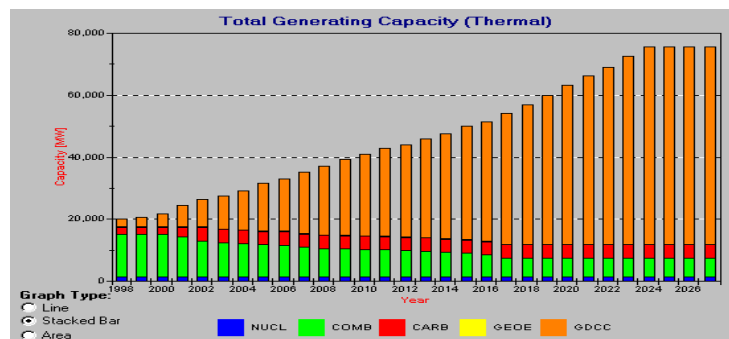


Figura 5: Esquema de la capacidad de generación total.

Mediante el módulo ENVIRAM se pueden analizar las emisiones a la atmósfera que, para el plan de expansión del CASO BASE, se comportan de la siguiente manera: las emisiones de SO_x y las partículas disminuyen a medida que las plantas de vapor que queman combustóleo y las plantas de diesel se van retirando del Sistema. Por otro lado las emisiones de CO₂ y NO_x se incrementan debido al crecimiento del sistema a base de gas natural. En la figura 6, se muestran las emisiones obtenidas del estudio ambiental en millones de toneladas para CO₂, SO_x, NO_x y partículas.

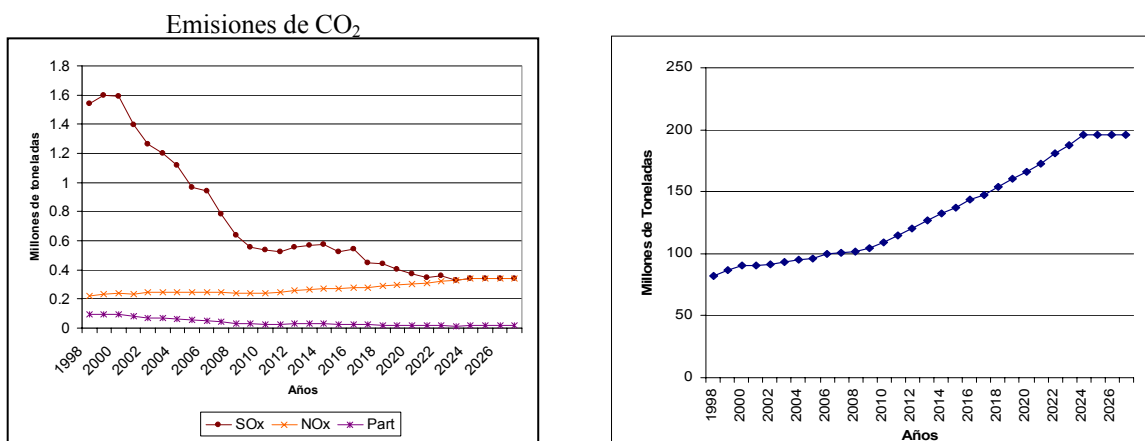


Figura 6. Emisiones de CO₂, SO_x, NO_x y partículas para el caso base.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se ha realizado un extenso análisis de sensibilidad con el objetivo de estudiar el impacto de 13 diferentes escenarios de planificación, con la variación de los parámetros más importantes del sistema y restricciones de tipo técnico y económico. La sensibilidad se resume de la siguiente manera: impacto del escenario alto de la demanda, análisis de la opción nuclear, impacto de la escalación de los precios de los combustibles, limitación en la instalación de nuevas plantas que utilizan gas natural, variación de la tasa de descuento y cambios de los criterios de confiabilidad. En la tabla 2, se observan los resultados más representativos.

TABLA 2: Alternativas de expansión solución óptima hasta 2024

ALTERNATIVA		NUC 1356	DUAL 350	C.C. 546	TG 179	HIDRO	CAPACIDAD TOTAL (MW)
CASO BASE		0	0	118	6	5	68,041
1	DEMANDA ALTA Tasa de crecimiento 6%	0	0	157	27	5	93,094
2	LIMITACION DE CICLOS COMBINADOS A partir de 2010, solo 3 CC por año	0	57	85	4	5	69,615
3	INCREMENTO PRECIO DEL GAS Alcanza 12 dólares/1000 pie ³ en 2010	0	159	26	4	5	73,101
4	LIMITE EN SUMINISTRO DE GAS Solo a parque existente a partir de 2010	0	122	45	4	8	71,295
5	TASA DE DESCUENTO 12%	0	0	118	5	5	67,862

ANÁLISIS DE DECISIÓN

Después de efectuar todos los casos de sensibilidad, mediante el módulo DAM (Decision Analysis Module) se efectuó un análisis para saber de entre todos los planes de expansión cuál resulta ser la solución más robusta para la adecuada toma de decisiones en la planeación de los sistemas de potencia. En este análisis es muy importante la diversificación del sistema y se utiliza un índice de diversidad desarrollado por Stirling (1994) para describir la diversidad de los escenarios. Mediante un análisis de Pareto todos los escenarios son comparados en términos de diferentes criterios como son el costo, las emisiones y la diversidad.

RESULTADOS OBTENIDOS

La CSDB para México se crea con una gran cantidad de información compleja y detallada a nivel central y se completa el análisis a nivel cadena energética, a pesar de las dificultades por el tipo de información requerida. El análisis a nivel central produjo una selección inicial de tecnologías candidato. A nivel cadena, se observa que la etapa que más contribuye con emisiones a la atmósfera es la de generación de electricidad seguida por los transportes.

El análisis a nivel sistema se realizó con éxito para un CASO BASE y 13 alternativas, obteniendo para cada caso un plan de expansión óptimo y las emisiones atmosféricas totales y por etapa asociadas, lo anterior permite contar con criterios económicos y ambientales para la elección del escenario más robusto para el Sistema Interconectado Nacional Mexicano, los resultados para las alternativas principales pueden observarse en la tabla 3.

Usando el módulo DAM, en los primeros análisis, el CASO BASE resulta ser la solución óptima desde el punto de vista económico. Por otro lado, si la diversidad es considerada como un parámetro adicional importante la Alternativa que limita a tres ciclos combinados por año, resulta ser potencialmente óptima considerando que se diversifica el sistema y el costo total de la expansión solo se incrementa en 2% con respecto al CASO BASE.

TABLA 3: Emisiones en millones de toneladas para cada alternativa de expansión

ALTERNATIVA		EMISIONES (Millones de toneladas)				DECISIÓN	
		CO ₂	SO _x	NO _x	Part.	POR COSTO	POR EMISIONES
CASO BASE		196	0.344	0.338	0.016	2	1
1	DEMANDA ALTA Tasa de crecimiento 6%	251	0.378	0.409	0.018	5	2
2	LIMITACION DE CICLOS COMBINADOS A partir de 2010, solo 3 CC por año	241	0.444	0.646	0.031	3	3
3	INCREMENTO PRECIO DEL GAS Alcanza 12 dólares/1000 pie ³ en 2010	322	0.63	1.192	0.058	6	5
4	LIMITE EN SUMINISTRO DE GAS A partir de 2010	293	0.59	0.998	0.05	4	4
5	TASA DE DESCUENTO 12%	196	0.344	0.338	0.016	1	1

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las herramientas proporcionadas por el OIEA al Gobierno de México y la CSDB_México desarrollada por los expertos mexicanos, son muy útiles para los estudios futuros que realizarán las instituciones participantes en el proyecto. El uso de DECADES proporciona información útil sobre la expansión óptima, ya que toma en cuenta los costos, las emisiones al medio ambiente y la diversidad de la mezcla de capacidad.

La posibilidad de aumentos en los precios de gas natural, hace deseable considerar el uso de tecnologías alternativas como unidades duales carbón-combustóleo o las unidades nucleares. Como no se evaluaron ni el potencial del viento ni la energía solar, se recomienda incluir tales tecnologías en el modelo DECADES en el futuro.

Agradecimientos. – Se agradece a los expertos del OIEA, Guenter Conzelmann, Vladimir Koritarov y Sergey Kononov por su orientación constante y por la revisión del trabajo final. Además se reconoce también la coordinación del proyecto por parte del Ing. Juan Ramón Mota de la Secretaría de Energía y del Dr. Isaac Jiménez Lerma de la CFE.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- CFE. GCN. (2001) *Comunicación directa de la Gerencia de Centrales Nucleoeléctricas*. México.
- CFE. GE. (1999) *Comunicación directa de la Gerencia de Energéticos*. México.
- CFE. GEPI. (1998) *COPAR (COSTOS y PARÁMETROS de Referencia para estudios de expansión de la generación)*. México.
- CFE. GGT. (2001) *Informes semestrales de las emisiones de gases contaminantes de las centrales de CFE en operación*.
- CFE. GPG. (2001) *Comunicación directa de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos*. México.
- CFE. GPSE. (1998) *Desarrollo del Mercado Eléctrico*. México.
- CFE. GPSE. (1999) *Unidades Generadoras en Operación (Sistema Eléctrico Nacional) 1998*. México.
- EPA (1996) *Air Pollution Emission Factors, Mobile Sources, AP-42, 5th edition*, November 1996. USA.
- EPA (2000) *Compilation of Air Pollutant Emission Factors VOLUME I: Stationary Point and Area Sources AP-42*. USA.
- IAEA. (2000) *Decades User's Manual VERSION 1.0*. DECADES. Project Document No. 3. Vienna, Austria.
- IAEA. (2000) *Decades DATABASE Tools Software*. Vienna, Austria.
- IAEA. (1995) *User's Manual for WASP-III Plus*. Vienna, Austria.
- Norma Oficial Mexicana (1994) *NOM-085-ECOL-1994*. Contaminación atmosférica-. Fuentes fijas-. Para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxido de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión (D.O.F. 02-XII-1994).
- PSEL-LCA (1996) *Ökoinventare von Energiesystemen*, Project-und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft, Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW), Juli 1996.
- SE (1999) *Prospectiva del Sector Eléctrico, 1999-2008*. Secretaría de Energía. México.
- Stirling, A. (1994) Diversity and ignorance in electricity supply investments. Energy Policy.

