

ARTÍCULO

## REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GEI EN EL SECTOR ELÉCTRICO ¿RENOVABLES O COMBUSTIBLES FÓSILES Y ENERGÍA NUCLEAR?

David Castrejón Botello

## **Reducción de emisiones de GEI en el sector eléctrico ¿Renovables o combustibles fósiles y energía nuclear?**

### **Resumen**

El presente trabajo tiene por objetivo evaluar las opciones tecnológicas para mitigar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el sector eléctrico mexicano, se presentan dos escenarios: uno empleando energía nuclear y combustibles fósiles con tecnologías que incorporan sistemas de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, y el otro mediante fuentes renovables de energía. Cabe aclarar que los escenarios presentados no constituyen predicciones de lo que sucederá, sino más bien son un ejercicio académico que presenta las visiones de alternativas que pueden servir para auxiliar en la planeación en el presente, conducentes a un desarrollo ambientalmente sustentable en el futuro.

De los resultados se observó que, en el escenario de Referencia las emisiones de GEI del sector eléctrico continúan incrementándose, pasando de 124 MMtonCO<sub>2</sub>eq (millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq) en el 2010 a 531 MMtonCO<sub>2</sub>eq en el 2070, aún con un importante ahorro de energía por el lado de la demanda de energía, un sector transporte con tecnologías eléctricas y un sector eléctrico creciendo con mayor proporción de ciclos combinados (tecnología de generación más eficiente actualmente). En el escenario de captura de CO<sub>2</sub> y nuclear, las emisiones de GEI se reducen a 53 MMtonCO<sub>2</sub>eq en el 2070, sin embargo se debe considerar los riesgos en el uso de la energía nuclear y la dependencia a los combustibles importados como en gas natural, carbón y combustible nuclear. El escenario de fuentes renovables se alcanza un sector eléctrico de cero emisiones y sin dependencia a combustibles de origen fósil, sin embargo deben considerarse las grandes cantidades de terreno que se destinaran a centrales eólicas y solares, así como el riesgo en la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico en situaciones de falta de días soleados, falta de viento e incluso falta de lluvia, además del riesgo ambiental por el manejo de aceites térmicos en instalaciones solares y los compuestos químicos utilizados en las baterías.

Los problemas técnicos de cada escenario pueden ser resueltos mediante el desarrollo tecnológico. La factibilidad económica de cada escenario se logra mediante algunas condiciones financieras como ajustes a la tasa de descuento en las inversiones o bonos de carbono por la reducción de emisiones. Es posible alcanzar un escenario sustentable libre de emisiones de GEI sin incrementar el riesgo energético, mediante una mezcla de tecnologías disponibles y en desarrollo, la tarea más importante es realizar la correcta planeación energética.

**Palabras clave:** Gases de Efecto Invernadero , sector eléctrico, combustibles fósiles, energía nuclear, energías renovables.

## Introducción

El cambio climático es un fenómeno que se manifiesta en un aumento de la temperatura promedio del planeta, directamente vinculada con el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), las actividades humanas relacionadas con la quema de combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón) y el cambio de uso de suelo (deforestación) han contribuido en el incremento de los GEI de forma considerable en los últimos cincuenta años. Este aumento de la temperatura tiene consecuencias en la intensidad de los fenómenos del clima en todo el mundo (IPCC 2011). México reconoce que es importante llevar a cabo acciones que contribuyan a los esfuerzos de la comunidad internacional en materia de mitigación de emisiones de GEI, para reducir los efectos del cambio climático. El sector energético y en particular el sector eléctrico son importantes contribuyentes en emisiones de GEI, tan solo en el 2010 el sector eléctrico contribuyó con el 28% de las emisiones de CO<sub>2</sub> (uno de los principales GEI) correspondientes al sector energía, sólo después del sector transporte, el cual contribuyó con el 38% (SENER 2011). Por lo cual, se busca evaluar escenarios de opciones tecnológicas para reducir las emisiones de GEI en el sector eléctrico mexicano que considere medidas de mitigación en los sectores de oferta y demanda de energía.

## Contextos tecnológicos actuales y futuros

Las tecnologías que se considera que podrían tener un impacto importante en la reducción de emisiones de GEI en el sector eléctrico son: La energía nuclear, los sistemas de captura y el almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CCS por sus siglas en ingles) y las fuentes de energía renovable. Estas últimas incluyen tecnologías como la hidroelectricidad, la geotermoeléctrica de sistemas hidrotermales, los sistemas geotérmicos avanzados, la energía eólica, la energía solar fotovoltaica, la energía solar termoeléctrica y la bioenergía, entre otras.

Las tecnologías de generación eléctrica, como muchas otras, experimentan un proceso de maduración tecnológica. Por lo que es importante contar con un panorama general de las tecnologías disponibles actualmente y las que están en desarrollo, que busquen la reducción de emisiones de GEI en el proceso de generación eléctrica. Para lo cual se ponen en contexto las características más relevantes de maduración de las tecnologías como son: su capacidad de generación actual y esperada, el estatus tecnológico actual y su perspectiva de desarrollo; el potencial técnico estimado para su posible desarrollo en México; sus costos actuales y esperados

para el futuro, entre otros aspectos técnicos de operación.

## Metodología

A raíz del análisis de distintos estudios que proponen la reducción de emisiones para México, se observa que el uso de modelos computacionales facilita el cálculo y el análisis cuantitativo de escenarios proporcionando resultados confiables.

Para el análisis cuantitativo de los escenarios presentados en este estudio se utilizó el Modelo Energético de México al 2070 (MEM70), modelo matemático desarrollado en el Instituto de Investigaciones Eléctricas en colaboración con especialistas de la UNAM y del Instituto Nacional de Ecología, en el que se representa el sistema energético de México. El modelo está estructurado en la plataforma LEAP desarrollada por el Instituto de Medioambiente de Estocolmo y tiene amplio reconocimiento mundial (COMMEND-SEI 2011).

## Escenarios

Se evaluaron dos escenarios de mitigación de emisiones de GEI (“Escenario Azul” y “Escenario Verde”) que se ponen en contraste con un “Escenario de Referencia”. Estos tres escenarios fueron evaluados para un periodo 60 años a partir del 2012, para ver el efecto de las tecnologías aún están en desarrollo como la geotérmica de roca seca caliente. En lo económico, los tres escenarios se evaluaron en dos contextos de crecimiento, uno Moderado con crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB) a una tasa anual de 3.6%, con la cual alcanzamos, al final del periodo de análisis, el PIB per cápita actual de los Estados Unidos y otro con crecimiento Alto a una tasa media anual de 4.8%, con la cual alcanzamos un PIB per cápita similar al de Estados Unidos en el caso de que ellos mantengan un crecimiento de 2%. Para el análisis de los costos de inversión, se consideró una tasa de descuento anual del 12%, como utilizan PEMEX y CFE.

A continuación se describe brevemente el planteamiento de los escenarios:

- Escenario de Referencia, considera que México podría alcanzar hasta un 50% de ahorro de energía en el incremento neto en la demanda de energía en el 2070, respecto al crecimiento tendencial basado en mantener las intensidades energéticas constantes. Adicionalmente, se considera un incremento en el consumo de energía eléctrica debido a la penetración gradual de las tecnologías para transporte eléctrico. Y por último, en el sector eléctrico, se considera que se mantiene la política de expansión de la capacidad de generación a partir de ciclos combinados a gas natural y marginalmente supercríticas a carbón y de fuentes renovables, principalmente hidroeléctricas y eólicas, como lo indica la Prospectiva del sector eléctrico 2011-2025 de SENER.

- Escenario Azul, considera cambios tecnológicos en el sector eléctrico para reducir las emisiones de GEI, de tal forma que la expansión de la capacidad de generación incluya la tecnología de ciclo combinado y térmica supercrítica con sistemas de captura de CO<sub>2</sub> (CCS, por sus siglas en inglés), además de centrales nucleares.
- Escenario Verde, considera cambios tecnológicos en el sector eléctrico para mitigar las emisiones de GEI, mediante el uso de, exclusivamente, tecnologías de fuentes renovables de energía.

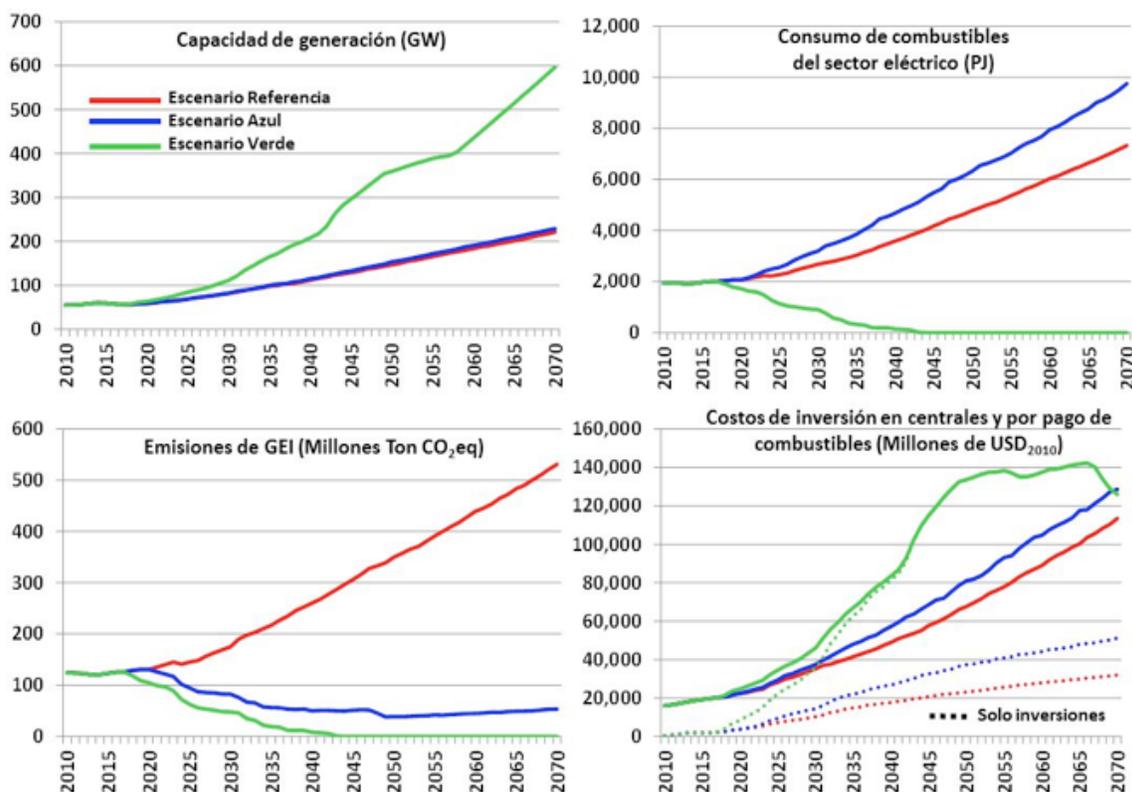
## Resultados

En los tres escenarios el consumo eléctrico en los sectores de demanda pasa de cerca de 200 TWh en 2010 a aproximadamente 1,000 TWh en el 2070, bajo el contexto económico moderado. En particular para cada escenario se resumen los siguientes puntos:

- En el Escenario de Referencia la capacidad de generación eléctrica se incrementa en forma gradual de 53 GW (servicio público) en 2012 hasta alcanzar 220 GW en el año 2070, teniendo una participación tecnológica en la generación eléctrica de 56% ciclo combinado a gas natural, 33% térmicas a carbón y 11% renovables, de las cuales 7% son hidroeléctricas y 4% eólicas. El requerimiento de combustibles pasa de 2 EJ a 7.3 EJ, aproximadamente, con 55% gas natural y 45% carbón térmico. Las emisiones de GEI estimadas del sector eléctrico pasan de 124 MMtonCO<sub>2</sub>eq en el 2010 a 531 MMtonCO<sub>2</sub>eq en el 2070. Los egresos por combustible alcanzan 81 mil millones de dólares y los egresos por pago amortizado de las inversiones alcanzan 32 mil millones de dólares en moneda del 2010.
- En el Escenario Azul la capacidad de generación alcanza 229 GW en el año 2070, valor ligeramente superior al alcanzado en el escenario de referencia, debido a los requerimientos energéticos adicionales de los sistemas CCS, pero no mucho mayor por la relativamente mejor disponibilidad de las centrales nucleares. La participación de las tecnologías en la generación eléctrica del 2070 es de 42% ciclo combinado con CCS a gas natural, 26% térmicas a carbón con CCS, 22% nucleares y 10% renovables, de las cuales 6% son hidroeléctricas y 4% eólicas. El requerimiento de combustibles alcanza 9.7 EJ con 35% gas natural, 36% carbón térmico y 29% combustible nuclear. Las emisiones de GEI estimadas del sector eléctrico se reducen a 53 MMtonCO<sub>2</sub>eq en el 2070. Los egresos por combustible alcanzan 73 mil millones de dólares y los egresos por pago amortizado de las inversiones alcanzan 55 mil millones de dólares en moneda del 2010.

• En el escenario Verde la capacidad de generación alcanza cerca de 600 GW en el año 2070, valor casi tres veces superior al alcanzado en el escenario de referencia, debido a los bajos factores de planta que presentan las tecnologías de fuentes renovables. La participación de las tecnologías en la generación eléctrica del 2070 es de 25% solar térmica, 25% solar fotovoltaica centralizada, 15% geotérmica de roca seca caliente, 13% eólicas, 7% hidroeléctrica, 6% geotérmica hidrotermal, 5% solar fotovoltaica local y 4% bioenergía. El requerimiento de combustibles, las emisiones de GEI y los egresos por consumo de combustibles se reducen a cero a partir del 2045, fecha en que el sistema eléctrico podría operar con 100% fuentes renovables de energía, tras el retiro de todas las centrales de fuentes no renovables. Los egresos por pago amortizado de las inversiones alcanzan 142 mil millones de dólares en moneda del 2010.

Las siguientes figuras muestran la comparación de los resultados más relevantes entre los escenarios:



## Conclusiones

Aún en el escenario de Referencia que considera un importante ahorro de energía y un sector transporte con tecnologías eléctricas que permiten reducir las emisiones de GEI por el lado de la demanda de energía, las emisiones de GEI continúan incrementándose.

El uso de combustibles de origen fósil incrementa el riesgo de suministro de energéticos ya que se está sujeto a la disponibilidad y precio de los combustibles a nivel internacional. Las centrales térmicas supercríticas a carbón y ciclo combinado a gas natural que integran sistemas de captura de CO<sub>2</sub> son una tecnología que podría resolver parcialmente el problema de las emisiones de GEI (la captura del CO<sub>2</sub> es al 90%), sin embargo mantienen la dependencia a los combustibles de origen fósil que en su mayoría serán importados. Así mismo, la energía nuclear podría permitir una importante reducción en las emisiones de GEI y proporcionar una energía eléctrica confiable, sin embargo también utiliza combustible importado y se debe tener presente el alto riesgo a la salud y al medio ambiente que conllevan este tipo de instalaciones y la disposición final de los desechos nucleares.

Mediante el uso de tecnologías de fuentes renovables se alcanza un sector eléctrico de cero emisiones y sin dependencia a combustibles de origen fósil. Sin embargo deben considerarse las grandes cantidades de terreno que se destinaran a centrales eólicas y solares, así como el riesgo en la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico en situaciones de falta de días soleados, falta de viento e incluso falta de lluvia, además del riesgo ambiental por el manejo de aceites térmicos en instalaciones solares y los compuestos químicos utilizados en las baterías, sin embargo estos problemas pueden ser resueltos mediante el desarrollo tecnológico y cierto nivel de respaldo con tecnologías de fuentes fósiles.

Es posible alcanzar la factibilidad económica de cada escenario mediante algunas condiciones financieras, de tal forma que los costos totales anuales de cada escenario sean similares o inferiores a los costos de escenario de Referencia. Por un lado, para el escenario Azul se requiere un bono de carbono de 40 USD por tonelada de CO<sub>2</sub> evitada a la atmosfera y para el escenario Verde se requiere de un bono de carbono de 110 USD por tonelada de CO<sub>2</sub> evitada a la atmosfera. Por otro lado, se alcanza equilibrio económico entre los escenarios si se considera la obtención de préstamos a una tasa de descuento de 4% y no la utilizada oficialmente por México en proyectos del sector energético del 12%, sin embargo en otros países se utilizan tasas de entre 5 y 10% (IEA/NEA, 2010).

Para alcanzar un escenario sustentable libre de emisiones de GEI, debemos considerar todas las alternativas tecnológicas, desde las más avanzadas hasta las más tradicionales. La tarea más importante es conocer cómo realizar esta mezcla de tecnologías que garantice un alto grado de

seguridad energética, que permita un desarrollo económico estable y que asegure un ambiente sano.

## **Bibliografía**

Banco Mundial. *Banco Mundial*. 2011. <http://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.PCAP.CD> (último acceso: Dic de 2011).

Bauer Mariano, Elizabeth Mar, Alberto Elizalde. «Transport and energy demand in Mexico: the personal income shock.» *Energy Policy Elsevier Volume 31, Issue 14*, 2003: Pages 1475–1480.

BP. *Statistical Review of World Energy 2011*. [bp.com/statisticalreview](http://bp.com/statisticalreview), 2011.

CEE, IIM y IIEc-UNAM. *Curso de Planificación Energética 1989*. México: UNAM, 1990.

CFE COPAR. *COPAR Generación, Costos y Parámetros de Referencia Para la Formulación de Inversiones en el Sector Eléctrico*. México, 2011.

CFE POISE. *Programa de Obras e Inersiones del Sector Eléctrico POISE 2011-2025*. México, 2011.

Comisión Intersecretarial de cambio climático SEMRNAT/INE. *México Cuarta comunicación ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. México: ISBN 978-607-7908-00-5, 2009.

COMMEND-SEI. *COMMEND is an initiative of the Stockholm Environment Institute*. 2011. [www.energycommunity.org](http://www.energycommunity.org).

COP16 México. *Líneas generales de posicionamiento de México, Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Dic de 2010. <http://cc2010.mx/es/acciones-de-mexico/lneas-generales-de-posicionamiento-de-mxico/index.html> (último acceso: Nov de 2011).

CRE/BID Hiriart Le Bert Gerardo. «Evaluación de la Energía Geotérmica en México.» México, 2011.

Dargay. *Vehicle Ownership and Income Growth, Worldwide: 1960-2030*. Inlaterra, 2007.

Energía nuclear. 2011. <http://energia-nuclear.net/> (último acceso: Nov de 2011).

European Parliament's committee on Industry, Research and Energy. *Outlook of energy storage technologies*. Bruselas, 2008.

Hoste, Graeme R.G., y Michael J. Dvorak & Mark Z. Jacobson. *Matching Hourly and Peak Demand*

*by Combining Different Renewable Energy Sources*. California: Stanford University, 2009.

IAEA. *Uranium 2009: Resources, Production and Demand*. International Atomic Energy Agency OECD, 2009.

IEA. *CO<sub>2</sub> Emissions from fuel combustion*. [www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf](http://www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf), 2011.

—. *Cost and performance of carbon dioxide capture from power generation*. France, 2011.

—. *Energy Technology Perspectives Scenarios & Strategies to 2050*. Francia: OECD/IEA, 2010.

—. *Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency*. France: OECD, 2008.

IEA/OECD. *World Energy Outlook 2010*. Francia: ISBN: 978 92 64 08624 1, 2010.

INE. *Para comprender el cambio climático*. 2011. [http://cambio\\_climatico.ine.gob.mx/comprendercc/comprendercc.html](http://cambio_climatico.ine.gob.mx/comprendercc/comprendercc.html) (último acceso: Nov de 2011).

INEGI. *Banco de Información Económica*. 2011. <http://dgcnesyp.inegi.org.mx/bdiesi/bdie.html> (último acceso: Dic de 2011).

INE-IIE. *Estudio del impacto y costos de diversas medidas de mitigación de emisiones de CO<sub>2</sub> en México en el horizonte al 2070*. México, 2010.

INE-IMP. *Escenarios de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en el Mediano y Largo Plazos*. México: IMP, 2009.

INE-SEMARNAT. *México: Cuarta Comunicación Nacional ante ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México: ISBN 978-607-7908-00-5, 2009.

IPCC. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. IPCC, Ginebra, Suiza,,: Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)],, 2007, 104 págs.

—. *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. 2011. [http://www.ipcc.ch/home\\_languages\\_main\\_spanish.shtml](http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml) (último acceso: 2011).

J. Islas, M. Martinez, F. Manzini. «CO<sub>2</sub> mitigation costs for new renewable energy capacity in the Mexican electricity sector using renewable energies.» Published by Elsevier Ltd, 2003.

Kris R. Voorspools, William D. D'haeseleer. *An analytical formula for the capacity credit of wind power*. Belgica: Elsevier Ltd, 2006.

Michel, Rosengaus M. «Medición del Cambio Climático en México.» Editado por Servicio Meteorológico Nacional. Seminario CAMBIO CLIMÁTICO: *El caso de México En el marco del III Congreso Nacional Academia de Ingeniería Palacio de Minería*. México DF, Sep 2007.

NERL. *National Energy Renewable Laboratory*. 2011. <http://www.nrel.gov/> (último acceso: Ago de 2011).

NREL. *National Renewable Energy Laboratory*. s.f. [www.nrel.gov/](http://www.nrel.gov/) (último acceso: Ago de 2011).

Ordaz Méndez, Flores Armenta y Ramírez Silva. *Potencial geotérmico de la República Mexicana*. México: REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA ISSN 0186-5897 Volumen 24, No. 1, 2011.

REN21. *Renewables 2011 GLOBAL STATUS REPORT*. Paris: REN21 Secretariat, 2011.

SEI. COMMEND (*COMMunity for ENergy environment & Development*). Nov de 2011. <http://www.energycommunity.org/> (último acceso: Nov de 2011).

SENER. *Balance Nacional de Energía 2010*. México: Secretaría de Energía, 2011.

SENER/GTZ. *Energías renovables para el desarrollo sustentable de México*. México, 2009.

SENERa. *Prospectiva del mercado de gas natural 2010-2025*. México, 2010.

SENERb. *Prospectiva del mercado de petróleo crudo 2010-2025*. México, 2011.

SENERc. *Balance nacional de energía 2009*. México, 2010.

SENERd. *Prospectiva del sector eléctrico 2010-2025*. México, 2010.

SENERe. *Prospectiva de energías renovables 2011-2025*. México, 2011.

SENERf. *Estrategia Nacional de Energía*. México, 2010.

Tarquin, Blank &. *Ingeniería Económica*. Colombia: McGrawHill ISBN 958-600-062-1, 1991.

WEC. *Transport Technologies and Policy Scenarios to 2050*. United Kingdom: World Energy Council 2007 ISBN: 0 946121 28 1, 2007.

World Bank. *México: Estudio sobre la disminución de emisiones de carbono*. Colombia: ISBN 978-958-8307-75-6, 2009.