



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evaluación de los Recursos Energéticos
Primarios para la Generación de
Electricidad, en México**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERÍA

ENERGÍA – ECONOMÍA DE LA ENERGÍA

P R E S E N T A :

SERGIO DALE BAZÁN PERKINS

TUTOR

DR. JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ ZAYAS

2008





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Al pueblo de México, a la Universidad Nacional Autónoma de México, al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología por la oportunidad de realizar mis estudios de Doctorado que culmina con la realización de esta tesis.

Al **Dr. José Luís Fernández Zayas**, por su apoyo constante, amistad, paciencia y dirección. Agradezco su entusiasmo y los conocimientos que me compartió para contribuir en mi formación científica y humana. Lo más valorado es el haberme permitido la libertad para investigar y desarrollar un pensamiento propio.

Al **Dr. Ricardo Aceves García**, por su asesoría y consejos para el diseño del modelo económico energético. La inquietud de aplicar la programación matemática para optimizar los sistemas energéticos, derivan desde que me instruyó como profesor de la maestría en Investigación de Operaciones. Agradezco, en especial al **Doctor Alejandro Rodríguez Valdés**, por la orientación en los primeros pasos.

A los Doctores **Juan Luís Francois Lacouture**, **Cecilia Martín Del Campo Márquez**, **Juan Quintanilla Martínez** y **Gerardo Serrato Ángeles** que en las diversas etapas de esta investigación contribuyeron para su mejoramiento. Al profesor **Norberto Chargoy del Valle** la orientación y ayuda en los trámites escolares.

A **mis padres**: Sergio Bazán Barrón y Marilyn Anetta Perkins. A **mis hermanos**: Karla Jeneva, Gabriela. Blanca Margarita, Julio Alberto, Víctor Schamann, y **mis abuelos**: Margarita Barrón Téllez y Javier Bazán Pérez, Jeneva Fern Miller y Wayne Malloy Perkins. A **mis apreciables amigos**: Priscilla Navarro, Aidee Moctezuma, Hilda Georgetta, Artemisa, Marisol, Ana Gabriela Gómez López, Enedina Pillado, Leopoldo del Castillo, Alejandro Valencia, Miguel Esparza, Marco Antonio Chávez, Enrique Gonzáles, Lino Beserril Rubio, Edgar Sánchez. A **mis hermanos espirituales** de la Iglesia Internacional de Cristo: Sofía Villalobos, Jannine Flores, Cynthia Almeida, Leticia Armenta, Irais Athala, Sonia Vega, Alex Villalobos, Alejandro Zamora y Gaby, Leonel, Antonio Miranda, Enrique Chy, Faviola Nava, Brunella Sosa Cervera, Emilio Andrés, Carlos Sánchez y Sara Edith, Francisco Arrieta, Juan Martines, Armando Parra, Javier Amaya, Nacho y muchos más, A todos, con mucho aprecio, gracias por su amistad.

A Dios porque siempre ha estado conmigo, en todo momento.

PENSAMIENTOS

Los suministros de energía sostenible son un factor esencial en la lucha contra la pobreza: Para prevenir crisis y conflictos y salvaguardar nuestros recursos naturales. Los países en desarrollo y los países industrializados tienen una responsabilidad común... la lucha contra la pobreza y por el acceso a la energía sostenible deben ir de la mano.

En Alemania,..., estamos desarrollando un modelo de crecimiento y prosperidad que es sostenible al no lograrlo a expensas del medio ambiente, de las generaciones futuras o de los países en desarrollo. Debe ser nuestra meta común lograr que sea posible combinar el desarrollo económico exitoso y la mitigación de la pobreza con la protección de los recursos naturales.

Schroeder (2003)

El uso de energía de los pobres: Todos los años, millones de personas, entre ellas muchos niños menores de 5 años, mueren por falta de fuentes de energía modernas. Dos de cada cinco personas sobre el planeta están obligadas a quemar leña, carbón vegetal, estiércol u otras formas de "biomasa tradicional", generalmente en cocinas y fuegos abiertos. El humo contiene un cóctel de productos químicos tóxicos, el cual se arremolina alrededor de su vivienda, causando agudas infecciones respiratorias, asma, cáncer y otras enfermedades. Es una de las crisis ambientales más grandes- y que menos publicidad recibe.

El uso de energía de los ricos: Entretanto, el uso de energía de los ricos es el principal culpable de otra creciente emergencia: el calentamiento de la Tierra. Las emisiones de dióxido de carbono por la quema de los combustibles fósiles han más que duplicado desde 1965 y con ello han aumentado paralelamente la concentración de gases en la atmósfera y su temperatura. Las fuentes de energía renovable,...usando energía solar, eólica y pequeñas instalaciones hidroeléctricas pueden ayudar a encarar ambas crisis.

Lean (2003)

La amenaza del cambio climático es principalmente un problema energético: El vínculo pobreza-energía es sumamente sorprendente ya que la energía tiene una importancia vital en la satisfacción de las necesidades humanas básicas, en particular, la nutrición y la salud" Las mejoras en el uso eficiente de la energía tienen potencial considerable para reducir la pobreza: El tiempo que las mujeres y los niños dedican a la recogida de leña y agua representa un costo social y económico muy alto para la familia y la sociedad y está directamente relacionado con el bajo nivel de servicios energéticos disponibles para las personas que viven en la pobreza.

La acidificación, el proceso mediante el cual disminuyen las bases de la tierra y del agua de superficie: Sufriendo, por tanto, un incremento en la acidez, resulta en un daño a los

ecosistemas terrestres y acuáticos. En este siglo, en Europa y América del Norte, miles de lagos y pequeños arroyos se han acidificado, cambiando drásticamente su flora y fauna. Muchas aguas de superficie están totalmente vacías de peces, anfibios y otras criaturas. También ha habido un daño significativo a los bosques de Europa y Norte América. Las emisiones de dióxido sulfúrico, óxidos nitrogenosos y amoníaco aumentan las deposiciones acidificantes después de la transformación química y el transporte a la atmósfera. Los óxidos sulfúricos y nitrógenos se forman principalmente durante la combustión de combustibles fósiles en los sectores de energía y de transporte. Este es el vínculo energía-acidificación.

Amulya (et. al 1997)

Una economía de bajo carbono esta a nuestro alcance: Lo que hace falta es la seria intención de todos los países de cambiar hacia esta economía y con ello mejorar nuestra común seguridad energética. Los obstáculos que aún existen para el interés de las tecnologías renovables y eficiencia en el uso energético son numerosos: políticas poco apropiadas, subsidios y problemas para al acceso al financiamiento, y falta de capacidad de recursos humanos e institucionales. Superar estos obstáculos requiere un esfuerzo concertado de gobiernos, empresas, instituciones financieras y el resto de la sociedad civil.

Beckett (2003)

Para la generación de electricidad en todas partes del mundo: Se están haciendo esfuerzos para el uso energético eficiente y empleo de tecnologías solares, eólicas, geotérmicas, biomasa y sistemas hidroeléctricos de pequeña escala.

Good (2003)

La industria de generación eléctrica se caracteriza por involucrar grandes inversiones y largos periodos de recuperación del capital: Por lo que la empresa del sector es muy vulnerable a incertidumbres que puedan dar lugar, por ejemplo, a cambios en la demanda, en los costos o en la tecnología

Sinning (1999)

En México:

Al estar una gran parte de la generación de electricidad basada en gas natural, y al ser difícil construir nueva capacidad con base al carbón y nuclear en el corto y mediano plazos, se prevé que la demanda por gas natural de los generadores de electricidad sea sostenida inclusive si los precios de gas natural son altos. Un extenso número de alternativas han sido sugeridas, siendo primordialmente la gasificación de betumen la primera en implementarse a escala comercial.

GTEAN-SENER (2005)

Sobre las hidroeléctricas:

Se encontró que los impactos sobre el ecosistema eran más negativos que positivos para las presas en general (incluso aquellas diseñadas para suministro de agua, irrigación y control de inundaciones). En muchos casos, han llevado a importantes pérdidas de especies y ecosistemas. Hallamos que todos los embalses examinados por científicos emiten gases de efecto invernadero – lo mismo que los lagos naturales – procedentes de vegetación putrefacta y la afluencia de carbono de la cuenca de captación. La escala de estas emisiones es sumamente variable-

Asmal (2001)

El propósito que debe alcanzar cualquier proyecto de desarrollo es el mejorar de un modo sustentable el bienestar humano. Es decir, producir un avance significativo en el desarrollo humano, sobre una base que sea viable económicamente, equitativa socialmente y ambientalmente sustentable. Si la construcción de una gran represa es el mejor modo de alcanzar este objetivo, merece ser apoyada. Cuando otras opciones son una mejor alternativa, ellas deberían ser favorecidas, y no las grandes represas. Así pues, el debate sobre las represas cuestiona las perspectivas con la que las sociedades desarrollan y manejan sus recursos de agua, en el contexto más amplio de las alternativas del desarrollo.

Comisión Mundial de las Presas (2000)

Hace ya muchas generaciones que hemos fallado en prestar atención al diseño sustentable de la naturaleza:

Hemos permitido que el mundo se desarrolle sin preceptos éticos ni espirituales, en una sociedad global que se encuentra drásticamente fuera del balance físico y moral, y con ausencia de un sentido intuitivo de unicidad con la naturaleza. La pregunta que debemos hacernos es si la exitosa implantación de tecnologías alternativas puede restaurar este balance y la conciencia intuitiva desde nuestro actual nivel de consumo de energía (incluso si éstas son renovables o sustentables), o si debiéramos crear un modelo sustentable basado en la reducción de energía.

Heckel (2003)

En la Tierra el primer reactor nuclear de fisión es natural, estuvo en operación hace 2000 Millones de años. En la región de Gabón de África Occidental. El Sol es un gigantesco reactor nuclear.

Al que bien administra, bien le va; ¡dichoso aquél que confía en el Señor!

Proverbios 16:20

ÍNDICE

| | Pág |
|--|-----------|
| Agradecimientos | i |
| Pensamientos | ii |
| Índice | v |
| Resumen | vi |
| Abstract | viii |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| I.1 Una nueva política energética mundial | 2 |
| II. PLANTEAMIENTO Y METODOS | 3 |
| II.1 Planteamiento del problema | 3 |
| II.2 Objetivos | 4 |
| II.3 Hipótesis | 5 |
| II.4 Métodos y Técnicas | 5 |
| II.4.1 Principales etapas de la investigación | 5 |
| II.4.2 Planeación energética inductiva-deductiva | 6 |
| II.4.3 Herramientas de análisis | 7 |
| II.5 Leyes de la economía | 8 |
| II.6 Técnicas para el diseño del modelo-económico energético mexicano | 9 |
| III. RESULTADOS Y DISCUSION | |
| III.1 Evaluation of Mexico ´s 1975–2000 energy plan | 11 |
| III.2 La energía nuclear, una alternativa de sustentabilidad para resolver la demanda eléctrica en México. (Primera Parte) | 31 |
| III.3 La energía nuclear, una alternativa de sustentabilidad para resolver la demanda eléctrica en México. (Segunda Parte) | 50 |
| III.4 Transition strategies for a hydrogen economy in México | 69 |
| ANEXO: RESÚMENES EN CONGRESO | 80 |
| La competitividad económica de la energía geotermoeléctrica en México | |
| La energía nuclear como base para resolver la demanda eléctrica en México. | |

RESUMEN

La presente investigación se ha fundamentado en los principios más aceptados para la búsqueda de la verdad y la certidumbre. Estos conceptos han sido aplicados con éxito en los países desarrollados y en países que emergen con dinamismo. En 1976, estos principios fueron propuestos para el diseño de un programa energético nacional 1975-2000 por la SePaNal, adelantados considerablemente a su época. En la práctica, desde hace más de tres décadas en México no se desarrollan los programas energéticos de visión a largo plazo, sustentados con bases económicas y científicas, más bien por decisiones que gozan de ignorancia e impunidad. Los principios y criterios expuestos en la "Propuesta de Lineamientos de Política Energética" de la SePaNal siguen vigentes hasta nuestros días y son aplicables para el futuro. Así, en este trabajo se rescata la idea de construir un futuro energético apoyado en premisas que se aceptaron como válidas en un contexto energético internacional más autónomo y benigno para el país.

Este trabajo presenta resultados para el Sistema Eléctrico de México de interés nacional, empresas y gobiernos internacionales que promueven la inversión en las energías competitivas no contaminantes. Los resultados expuestos permiten establecer la posibilidad de convertir a México en una potencia energética. La estrategia para alcanzar este objetivo consiste en la creación de una economía de escala centrada en el desarrollo de las energías renovables y la nuclear.

Actualmente el problema energético principal de México es el acelerado agotamiento de sus reservas de gas y petróleo, en menos de 8 y 10 años, respectivamente. Ante este escenario de crisis, a corto plazo las alternativas serían la construcción de pequeñas hidroeléctricas, aerogeneradores, geotermoeléctricas y termoeléctricas de biomasa. Las tres últimas tecnologías son más competitivas que las plantas de ciclo combinado a base de gas. Lo más lejano a la solución óptima y que conllevaría a un mayor retroceso económico, social y ambiental, sería abordar este problema convirtiendo las termoeléctricas para emplear carbón mineral y construir nuevas carboeléctricas.

De acuerdo a esta propuesta, a partir de 2010 ya no se construiría ninguna termoeléctrica con base en combustibles fósiles en México y hacia 2015 se estarían incorporando las primeras plantas nucleares. A mediano y largo plazo, la estrategia para México sería el desarrollo de un sistema energético nacional basado en reactores nucleares de alta temperatura (HTGR's), como los PBMR's y los GT-MHR's. Habrá que incluir además a las energías renovables mencionadas, como la solar y la mareomotriz, de las que México tiene un gran potencial.

Mediante esta propuesta, México podría producir energía en grandes cantidades y en forma eficiente y a bajo costo, para la producción de electricidad, desalación del agua de mar, calor, hidrógeno, amoníaco, gas sintético, entre otros productos y servicios. Los efectos multiplicadores de esta plataforma, además de beneficiar al sector eléctrico, impulsarían la competitividad del sector transporte, industrial y agrícola, entre otros. Así, hacia el año 2030, México alcanzaría como objetivo una economía sustentable baja en emisiones de carbono, en la cual el empleo de las energías renovables sea maximizado, compensando los bajos costos de la energía nuclear con los altos costos de las renovables.

En suma, el trabajo obtiene propuestas novedosas y necesarias, como por ejemplo la construcción de un futuro energético libre de emisiones contaminantes. Para ello serán necesarias muchas acciones, como por ejemplo desarrollar una industria de la energía nuclear mexicana robusta y aceptada, y nuevas formas de energía sustentable, como las corrientes y las mareas. Sin embargo, el trabajo demuestra que ese futuro es congruente con la alta responsabilidad energética que el mundo espera de México. Asimismo, que dicho futuro es sumamente atractivo desde todo punto de vista.

ABSTRACT

The present investigation has been based in the principles more accepted for the search of the truth and the certainty. These concepts have been applied with success in the developed countries and in countries that emerge with dynamism. In 1976, these principles were proposed for the design of a national energy program 1975-2000 for the SePaNaI, early considerably to their time. In the practice, for more than three decades in Mexico the energy programs of long term mink are not developed, sustained with economic and scientific bases, rather for decisions that enjoy ignorance and impunity. The principles and approaches exposed in the "Proposal of Limits of Energy Politics" of the SePaNaI they continue effective until our days and they are applicable for the future. This way, in this work the idea is rescued of building an energy future supported in premises that were accepted as valid in a more autonomous and more benign international energy context for the country.

This work presents results for the Electric System of Mexico of national interest, companies and international governments that promote the investment in the energy competitive non pollutants. The exposed results allow establishing the possibility to transform Mexico into an energy power. The strategy to reach this objective consists on the creation of a scale economy centered in the development of the renewable energy and the nuclear one.

At the moment the main energy problem of Mexico is the quick exhaustion of its reservations of gas and petroleum, in less than 8 and 10 years, respectively. Before this crisis scenario, short term the alternatives would be the construction of small hydroelectric, wind power, geothermal power and thermoelectric of biomass. The last three technologies are more competitive than the cycle plants combined with the help of gas. The most distant thing to the good solution and that it would bear to a bigger economic, social and environmental setback, it would be to approach this problem converting the thermo electric ones to use mineral coal and to build new thermal electric coal.

According to this proposal, starting from 2010 any thermoelectric one would no longer be built with base in fossil fuels in Mexico and toward 2015 they would be incorporating the first nuclear plants. To medium and I release term, the strategy for Mexico would be the development of a national energy system based on nuclear reactors of high temperature (HTGR's), as the PBMR's and the GT-MHR's. It will be necessary to also include to the mentioned renewable energy, as the lot and the tide power, of those that Mexico has a great potential.

By means of it is proposed, Mexico could produce energy in big quantities and in efficient form and at low cost, for the electricity production, seawater desalination, heat, hydrogen, ammonia, synthetic gas, between other products and services. The effects multipliers of this platform, besides benefiting to the electric sector, would impel the competitiveness of the sector it transports, industrial and agricultural, among others. This way, toward the year 2030, Mexico would reach as objective a low sustainable economy in emissions of coal, in which the employment of the renewable energy is maximized, compensating the low costs of the nuclear energy with the high costs of the renewable ones.

In sum, the work obtains novel and necessary proposals, the construction of an energy future free of polluting emissions for example. For the future development of this potential are necessary many actions, for example to develop an industry of the energy nuclear Mexican robust and accepted, and new forms of sustainable energy, as the currents and the tides. However, the work demonstrates that that future is appropriate with the high energy responsibility that the worlds wait of Mexico. Also that said future is extremely attractive from all point of view.

Palabras clave: planeación energética, sistema eléctrico mexicano, economía del hidrógeno, cero emisiones, mezcla óptima, desalinización, nuclear, combustibles fósiles, uranio, renovables.

I. INTRODUCCIÓN

Se dice que hay dos tipos de tomadores de decisiones económicos. Los que están actualizados en las tendencias del progreso humano y que enfocan su capacidad para colocar a un país al frente de estos desarrollos y los que no se enteran, y sin desearlo van en contra del bienestar de sus gobernados y las políticas de su nación. Por sus alcances, los proyectos energéticos pocas veces se determinan y ejecutan aisladamente, deben articularse con los planes de desarrollo de todos los sectores económicos del país, cumpliendo además los acuerdos internacionales. México puede ser transformado y convertirse en una potencia económica de liderazgo mundial, creando una civilización sustentable con la naturaleza. El sector energético es la columna vertebral de la economía del país, su planificación es la clave para impulsar el progreso social, económico y protección al ambiente. Estos objetivos son alcanzables si la planificación del sector energético de México se lograra realizar con bases económicas y científicas de visión a largo plazo.

Este trabajo expone un programa de expansión para el sector eléctrico de México al año 2030, que propicia el crecimiento económico sostenido bajo en emisiones de carbón. La propuesta incluye las estrategias para crear una economía del hidrógeno de "cero emisiones" en México, como es la creación de una economía de escala para cada una de las energías renovables y la nuclear. La tecnología estratégica clave es un sistema nacional de reactores nucleares, basado en los Reactores Modulares de Lecho de Bolas (Pebble Bed Modular Reactors, PBMR's).

Los PBMR's, es la tecnología más adecuada y adaptable a las necesidades de México. En la medida que sus características sean conocidas, obtendrá la mayor aceptación científica, social, internacional e interés para la inversión privada. En términos comparativos, los PBMR's presentan ventajas similares o mayores a las plantas de ciclo combinado a base de gas. Hacia el año de 2010, diferentes versiones de PBMR's comerciales estarán disponibles en el mercado, y serán los primeros reactores nucleares de IV Generación. Se catalogan como los reactores nucleares más seguros, económicos, versátiles y ecológicos. Su versatilidad consiste en que se pueden aprovechar para diferentes sectores económicos, como el eléctrico, industrial, transporte, petróleo, metalúrgico, agrícola, y de servicios. Debido a que pueden producir a gran escala y con los menores costos: electricidad, calor, desalación de agua de mar, hidrógeno, amoníaco, gas sintético, recuperar petróleo pesado, entre otros productos y servicios más.

El tiempo de construcción de los PBMR's es de 2 años, y su vida operativa es de 40 años. Su eficiencia es de más de 42% y su factor de planta supera el 95%. El costo de inversión de capital de 6 módulos de PBMR (165 MW) para producir electricidad e hidrógeno es respectivamente de \$US 1000 y \$US 900 por cada kW instalado. Al año 2006, considerando una depreciación de 7 años, su Valor Presente Neto (VPN) sería así seis veces más alto que las nuevas plantas de ciclo combinado que operan en México. No producen emisiones contaminantes, su construcción es modular y la seguridad del reactor es intrínseca. Debido a esto, se pueden instalar cerca de las principales regiones de consumo. Una serie de módulos pequeños de PBMR's podrían producir la misma energía que un ABWR, pero ocuparían tan sólo la tercera parte del espacio. En consecuencia, para que México alcance la competitividad requiere una planificación energética que esté sustentada con bases económicas y científicas que incluyan una serie de estrategias de visión a largo plazo. En este

trabajo se considera que el punto de inflexión se logra mediante la creación de un sistema nacional de plantas nucleares de Alta Temperatura Enfriados con Gas HTGR's (PBMR de 165 MW + GT-MHR de 285 MW) y de energías renovables.

Desde la perspectiva de un plan estratégico para México, los ciclos combinados, los ABWR's y en general todos los Reactores Nucleares de Agua Ligera equivalen a bulbos, y los nuevos HTGR's, a transistores. Sin embargo, se hicieron supuestos análisis de viabilidad para instalar dos nuevas unidades contiguas a la nucleoelectrica Laguna Verde (Veracruz), integrados por dos BWR de 680 MW en operación desde 1990 y 1995, concluyendo que el ABWR es la mejor opción. En cambio, en Sud África, sus planificadores no enfocan sus resultados para beneficio personal. Su plan se basa en el ideal de convertir a su nación en una potencia económica y social. Impulsando la ciencia y tecnología, bajo un concepto de innovación, con la participación de todos los sectores públicos, empresarial y social. Por ello, el proyecto de Sud África es instalar un reactor PBMR contiguo a la central nuclear de Koeberg, formada por dos reactores PWR de 900 MW en operación desde 1984 y 1985. Su decisión ha recibido amplia aprobación social y felicitaciones internacionales.

I.1. Una nueva política energética mundial

Los economistas del país no han podido resolver el enigma de ¿Por qué no crece la economía de México?, pasan inadvertido el obstáculo principal y más bien se enfocan a discutir consecuencias. La parálisis del crecimiento económico de México se debe a la inviabilidad de sus programas económicos y energéticos. Es por ello que las principales actividades de la economía de México no están concatenadas para alcanzar las expectativas nacionales y la competitividad internacional. Es un principio básico, la sociedad mexicana no puede evolucionar si los gobiernos no definen los objetivos a largo plazo y los planes estratégicos para alcanzarlos, en periodos de tiempo concretos. Como no existe un plan energético y económico viable para el país, no se pueden unificar los acuerdos y los esfuerzos.

Un país se construye cuando avanza en la dirección en las que sus estadistas visualizan el mejor futuro para su nación. Implica cambios en la forma de pensar y el rompimiento de modelos tradicionales que frenan el progreso social. Es común que quienes apoyan los esquemas tradicionales se opongan a los cambios y al idealismo lo ven cómo un defecto. La obsolescencia de las instituciones del país ocurre precisamente por la falta de liderazgo para fijar metas. La historia nos enseña que las naciones que han alcanzado objetivos sorprendentes, se caracterizan por sus ideales basados en principios.

Los principios de la planificación energética moderna surgen de la experiencia de la crisis del petróleo de 1973. Estos principios vigentes son empleados por la mayoría de los países para planificar su futuro, al visualizar ideales distantes basándose en el principio: Alcanzar la excelencia ambiental, social y económica, tomando en cuenta que los recursos energéticos son limitados y que deben ser empleados en forma óptima y eficiente. De esta forma, la planeación energética y económica representa la forma de activar a la sociedad hacia el progreso; en donde las instituciones y organizaciones sociales evolucionan al asumir estos retos.

México ha sido quemador de petróleo y gas por décadas para producir electricidad. Se trata de un patrón arraigado muy difícil de cambiar, no obstante su inviabilidad económica. Es decir, desde los años 1970' la expansión del sector eléctrico de México se desarrolla en direcciones equivocadas. De 1971 a 2003 emplea principalmente petróleo, y a partir de 2004 emplea principalmente el gas natural. Se convirtió a México en uno de los muy pocos países que después de la crisis del petróleo de 1973, continuaron usándolo como principal fuente de energía para su sector eléctrico. Situación similar acontece desde 2004: México es el único país de América del norte que produce la mayor parte de su electricidad con el energético de mayor precio de la región, más escaso y de menor competitividad: El gas natural. De esta forma, México se ha ido apartando cada vez más de la competitividad internacional.

Por su inviabilidad económica desde los años 70's, la construcción de nuevas termoeléctricas a base de gas natural era un modelo agotado para el sector eléctrico de México (Eibenschutz et al., 1976). Sin embargo, décadas después surgió nuevamente esta posibilidad, ante el supuesto de que México podría contar con una de las mayores reservas de gas natural del mundo; según la Gerencia de PEMEX-GAS (1994)¹ para 264 años. Concepto introducido profundamente en el pensamiento de los mexicanos en los años 90's y aún a principios del 2001, se dirigía principalmente a los inversionistas y planificadores del país.

Así, llegamos al 2007 en donde la apuesta para el "futuro de México" continúa siendo incrementar la participación del gas natural en el sector eléctrico. Ante la falta de una planificación energética con bases económicas y científicas, no toma en cuenta que las referidas gigantescas reservas de gas natural en México no existen. En el 2006, las reservas probadas de gas natural son de menos de 8 años y se agotan rápidamente. No se advierte que desde 1998, los precios del gas natural en el mercado son volátiles y con fuerte tendencia al alza. Se ignora que desde hace décadas las plantas de ciclo combinado en México, perdieron competitividad con respecto a las nucleoeeléctricas, geotermoeléctricas y más recientemente con respecto a los aerogeneradores y las termoeléctricas con base en biomasa, tecnologías que además no emiten gases de efecto invernadero.

II. PLANTEAMIENTO Y MÉTODOS

II.1 Planteamiento del problema

Existen varias razones para desarrollar un trabajo que evalúe los recursos energéticos primarios para la generación eléctrica en México, relacionados con el crecimiento de la economía, el carácter inconexo que conlleva la especialización en un recurso energético. La necesidad de integrar la información en un modelo-económico energético que optimice su empleo. La elección de los proyectos para integrar los programas energéticos reviste gran importancia de carácter estratégico, debido a que, si la elección es acertada, el ritmo de desarrollo económico del país se aceleraría.

¹ Mohar G. (1994) Prospectiva del mercado del gas natural en México: integración de mercados, XII Curso sobre planificación energética, Quinto en Latinoamérica y el Caribe, PUE-UNAM (México) UPN y UCM (España), p. 61-66.

Los recursos energéticos que ganan impulso crean sus propios mercados. Este proceso se favorece y fortalece en la medida que los gobiernos crean múltiples oportunidades de inversión que entablen competitividad. En la medida en que cada recurso energético desarrolla sus mercados va creando sus propias economías. Caracterizados por organizaciones sociales cada vez más complejas, que van a la par de nuevas culturas, tecnologías y campos de investigación científica, para su operación eficiente. En estas situaciones los simples conocimientos introductorios y las ideas ad hoc, no son suficientes para la selección de tecnologías de producción de energía. Cuando han sido aprobados, su realización requiere de estudios de ingeniería y financieros de mayor detalle.

II.2 Objetivos

La presente investigación doctoral se titula: "Evaluación de los Recursos Energéticos Primarios para la Generación de Electricidad, en México". Ésta se centra en las fuentes o recursos energéticos primarios, como son el petróleo, gas natural, carbón mineral, uranio, hídrica y mareas, biomasa, geotérmica, eólica y la energía solar, así como sus mercados y tecnologías para su transformación en energía eléctrica. El análisis incluye la planeación histórica, la circunstancia presente y un programa de expansión al 2030.

Los resultados obtenidos, así como los datos correspondientes que le acompañan, son expuestos para que sean considerados para una nueva política energética en el país, orientada a la economía sustentada de "cero emisiones". Se aplican metodologías y técnicas de ingeniería de sistemas para el diseño y mejor administración de los energéticos, en un mercado cada vez más competitivo. Los resultados permiten evaluar la eficiencia de la planificación del sector eléctrico mexicano y proponen un programa futuro. Dado que: 1) La volatilidad reciente de los precios de gas natural trae consigo mayores niveles de incertidumbre en la economía de México, frente a los beneficios que se proyecta obtener en el futuro. 2) Se puede diseñar un sistema eléctrico óptimo que pueda superar escenarios que provoquen graves trastornos a la economía, como son las restricciones cada vez más acentuados de las reservas comerciales de combustibles fósiles del país. Esta situación se puede compensar al remplazarlos por activos energéticos más seguros, limpios y competitivos. De esta exposición y ante una economía de mercado globalizado muy competitivo se plantean las siguientes preguntas:

¿Cuáles son los objetivos específicos de planificación del sector eléctrico que la mayoría de las naciones persiguen alcanzar? ¿Cuáles son las magnitudes cuantitativas de las variables inductoras para el sector eléctrico mexicano, es decir el mix² óptimo que minimiza el costo actual y para el año 2030? ¿Cuál es el programa energético que conlleve a alcanzar un mix óptimo de "cero emisiones" al año 2030, para el sistema eléctrico mexicano actual, y cuáles serían las acciones a corto, mediano y largo plazo? ¿Qué serie de características particulares de tipo logístico, tecnológico, financiero, económico y ambiental corresponde a cada recurso energético? ¿La electricidad derivada de los recursos renovables es en general de características sustentables? ¿Son específicos los recursos

² El término "mix" es frecuentemente usado por algunos investigadores para denotar una mezcla o arreglo determinado de algunas fuentes primarias de energía.

renovables que son sustentables? ¿Se puede generalizar al decir que las energías renovables son ambientalmente limpias, y por qué? ¿Cuáles son las fuentes de generación eléctrica sustentables?

II.3 Hipótesis

1. Existe un mix óptimo de fuentes de energía más competitivo que el que indica en las prospectivas del sector eléctrico mexicano.
2. Empleando un mejor mix de fuentes de energía se puede alcanzar un mayor progreso social, ambiental y económico.

II.4 Métodos y Técnicas

II.4.1 Principales Etapas de la Investigación

Para alcanzar los objetivos, las preguntas fundamentales y las hipótesis planteadas, se programaron las siguientes actividades:

1. Diagnóstico de los energéticos en México (definir el problema y sus variables relevantes).
2. Determinación, clasificación, y organización de los valores de las variables inductivas de cada subsistema energético (generar alternativas para variación de los valores de los parámetros).
3. Organización, presentación y clasificación de la información en términos cualitativos y cuantitativos.
4. Diseño del sistema energético y sus variables por cada fuente de energía (modelo de los subsistemas).
5. Diseño del sistema eléctrico mexicano, mediante el criterio del mix óptimo de fuentes de energía (corroboración y replanteamiento de hipótesis)
6. Análisis de escenarios del sistema, empleando métodos de programación matemática.
7. Exposición de los resultados en forma de diagramas, mapas, gráficas y tablas.
8. Publicación de los resultados en congresos y revistas.

El tema de exposición en el campo de la ingeniería económica de la energía, como su nombre lo indica, involucra a la ciencia de la ingeniería y la economía, aplicados al sector energético. El trabajo se centró en el diseño de un modelo económico energético para el sistema eléctrico mexicano, que contenga las variables de decisión adecuadas. Este modelo se diseñó para valorar la eficiencia de planeación del sistema eléctrico mexicano, en el pasado, el presente y para un programa de expansión al año 2030, considerando además la valoración de diferentes escenarios económicos.

La integración del conocimiento y experiencias para cada una de las fuentes de energía primaria, implica la comprobación de los principios de sustentabilidad, que asocian niveles de progreso humano, tecnologías y los aspectos económicos, sociales y ambientales.

II.4.2 Planeación energética inductiva-deductiva

La planeación de una nueva estructura energética para México que conlleve al desarrollo sustentable, implica la acción recíproca de una evaluación de análisis global y nacional, en un proceso de pensamiento deductivo-inductivo. Una vez puesta en marcha y según la experiencia y resultados obtenidos, se encontró la visión del modelo. La aplicación práctica del análisis deductivo se relaciona con la fábula de los ciegos y el elefante (las conclusiones incorrectas alcanzadas por los observadores cuya visión limitada es comparada con la amplitud y complejidad del problema). Con ello se pone de manifiesto el problema de la planeación energética cuando sólo se basa en razonamientos inductivos. Una vez descubierto el elefante, se pueden deducir muchas de sus otras características.

El análisis para una planeación deductiva se desarrolló mediante la observación, acopio de información y análisis de los recursos energéticos y sus variables a nivel global y nacional, que permiten deducir fenómenos generalizados, en relación con las ventajas, desventajas y limitantes de los energéticos en la generación de electricidad. A través de esta metodología se pueden definir premisas mayores, verdades evidentes por sí mismas, y llevadas a una relación con una premisa menor. Una relación lógica de estas premisas, conduce a una conclusión necesaria. En suma, las deducciones globales en materia de recursos energéticos primarios para producir electricidad, se sustentan en la observación, experiencia y análisis acumulado por varias décadas en el mundo. En un proceso inductivo, estos países llegaron a obtener sus conclusiones generales. Ahora, estas conclusiones generales se pueden aplicar en términos deductivos para México.

Una planeación energética deductiva adecuada puede llevar a los países a alcanzar el liderazgo en las etapas iniciales del desarrollo de nuevas tecnologías. Sobre todo cuando son decisiones que difieren de las tendencias globales, como el caso de las energías renovables y la nuclear. También es una metodología eficaz, cuando las políticas energéticas no han sido claramente planteadas, no son eficientes y sustentables con la realidad, o requieren de un reajuste inmediato ante sucesos extraordinarios.

Un ejemplo de análisis deductivo es la experiencia de los países con larga historia en el empleo del carbón mineral para producir electricidad es hoy de aversión, debido a que en comparación con otras alternativas tecnológicas propician menor progreso económico. En México su experiencia en carboeléctricas es reciente, insuficiente para llegar a la conclusión de los países que lo emplearon por más de cincuenta años, aunque sí se cuenta con algunas observaciones nacionales que apuntan hacia esta conclusión. En el año 2000, los salarios de los trabajadores de PEMEX encargados de la explotación de los hidrocarburos ganaban en promedio un 226% más que los encargados en la explotación de los yacimientos de carbón del estado de Coahuila. Las condiciones de trabajo de los mineros que trabajaban en la mina Pasta de Conchos quedaron a la luz pública a raíz del accidente de 2006.

A su vez, la planeación energética inductiva, detallada con los proyectos en operación, influye en la planificación y la programación energética de una nación. En la medida en que se evalúan y entran

en operación más proyectos, se acumula información adicional sobre una amplia gama de problemas y perspectivas tecnológicas, de mercado, ecológicas, sociales y de sus interacciones sectoriales, regionales, estatales, municipales e industriales. En consecuencia, la planeación energética se enriquece de acuerdo con el análisis deductivo e inductivo. Entonces el modelo propuesto para la expansión del sector eléctrico al año 2030, estará en condiciones para ser sometido a un examen crítico. Así lo son los objetivos, políticas y prioridades; establecidas para cada recurso energético a emplear y, como resultado de ello adoptar planes y programas de desarrollo nacional.

El riesgo del análisis deductivo es la aceptación de premisas mayores no verdaderas o incompletas basadas en prejuicios, viejos dogmas o autoridades no fiables, que sólo podrían conducir a un error. Son numerosos los conceptos erróneos en los que se sustenta la política energética de México, que han conllevado a graves errores en la planeación económica y energética de México. El resultado a largo plazo ha sido una serie de crisis económicas en el país, como en 1976, 1982, 1985-1986, 1987 y 1994-1995. Como ejemplo, se difundieron las aseveraciones equivocadas de que las plantas de ciclo combinado a base de gas natural eran las tecnologías más competitivas y de menor afectación ambiental. Lo mismo aconteció con las energías renovables, al tratar de hacer creer que todas son sustentables y de mercados de energías verdes. También, se habla de supuestamente enormes reservas de hidrocarburos en aguas profundas del Golfo de México, situación que en términos geológicos es improbable. Todavía en los primeros meses de 2001, se difundió que habría enormes reservas de gas natural en México. También que estos campos de gas natural, permitirían que México se convirtiera en un importante exportador de gas natural, para los Estados Unidos y Centro América.

II.4.3 Herramientas de análisis

Habría que hacer una comparación entre las técnicas empleadas en esta exposición. Los métodos de programación matemática y las de equilibrio, obtienen resultados completamente ciertos, cuando sus variables desde el principio no involucran situaciones de incertidumbre, siendo ésta su principal ventaja. Por otro lado, se cuenta con métodos de planeación y de análisis económico cuyos datos de entrada son inciertos y con riesgos en los resultados; éstos son principalmente: probabilidades, cálculo y pruebas de hipótesis, estadística bayesiana, teoría de decisiones, correlación y regresión, análisis de varianza, métodos no paramétricos, teoría de colas, Simulación, métodos heurísticos, análisis de redes, árboles de decisión, PERT³ y CPM⁴, teoría de Utilidad, teoría de juegos ó simplemente lanzar una moneda.

En este trabajo el marco teórico se fundamenta en varias disciplinas relacionadas con la economía, la ingeniería de sistemas, ingeniería económica y la ingeniería en investigación de operaciones, y el Modelo Económico LaRouche-Riemann (1978 y 1980), las técnicas de programación matemática, parametrización y modelos econométricos.

³ PERT, Program Evaluation and Review Technique, una popular herramienta de planeación.

⁴ CPM, Critical Path Method, una técnica antigua para controlar proyectos complejos.

La programación matemática es una herramienta eficaz que se aplica ampliamente para este trabajo. Tiene su origen durante la segunda guerra mundial, cuando se requería asignar recursos escasos a las operaciones militares, para resolver problemas de logística, estratégicas y optimización. Actualmente se aplica también para resolver problemas micro y macro económicos. La optimización es una de las técnicas más utilizadas en la investigación de operaciones, entre estas la "programación lineal" que emplea el "método simplex" de Dantzig (1947). Actualmente, los problemas de programación matemática se resuelven en pocos segundos usando el método simplex y las computadoras, mientras que hasta mediados de los años 40's su solución se podía tardar años.

II.5 Leyes de la Economía

(Modelo Econométrico LaRouche-Riemann, Referencia: Bardwell Steven, 1981)

Primera Ley: Consumo Energético = Recursos básicos.

1. Los recursos naturales en realidad no son "naturales", sino que son creados mediante las bases tecnológicas de que se dispone para su aprovechamiento.
2. La intensidad energética que propicia determinado nivel tecnológico define los recursos susceptibles de ser aprovechados por una economía, en ese nivel. Los recursos hay que consumirlos de manera tal que garanticen su sustitución.

Segunda Ley: Inversión de Capital = Productividad

1. La técnica que crea recursos se manifiesta, en términos económicos, en la maquinaria utilizada en el proceso productivo.
2. La técnica y el consumo energético inciden sobre una economía a través del capital y el trabajo que la componen.
3. La maquinaria y el equipo son una entidad económica; constituyen la mediación y amplificación del trabajo humano.
4. El capital es el factor determinante de la productividad. No es lo productivo desde el punto de vista económico.
5. En cuanto a su propósito, la inversión de capital sólo es "económica" cuando eleva la productividad. Cualquier inversión en maquinaria y equipo que no altera la productividad constituye un desperdicio de recursos económicos.
6. La inversión de capital genera productividad; y esta relación es recíproca, puesto que el ritmo al cual se puede invertir el capital está determinado por la productividad de la economía.

Tercera Ley: Progreso Tecnológico = Nivel de Vida

1. A lo largo de la historia humana, el ritmo de desarrollo tecnológico está inexorablemente vinculado a la inversión en el desarrollo de sus recursos humanos, esto es, que la finalidad del progreso es la realización humana y no el crecimiento económico.

2. Hay una estrecha relación entre el nivel tecnológico de una economía y el cultural y educativo de su población.
3. El avance tecnológico crea una fuerza de trabajo más capacitada, que requiere niveles educativos superiores y mayor tiempo de asueto.
4. A medida en que crece la energía humana se supone una disminución de la productividad y de la calidad de la vida humana.
5. Si un sistema se limita a una sola multiplicidad, sin solución de continuidad, entonces no es posible la evolución hacia estados más complejos.
6. La productividad real se oscurece si se incluye las materias primas y demás insumos.

II.6 Técnicas para el diseño del modelo económico energético mexicano.

Los principios más importantes sobre la relación entre energía y el progreso de las naciones, fueron expuestos por Amulya et al. (1997). Estas describen a relación estrecha entre las fuentes de energía y su disponibilidad con respecto a la pobreza, alimentación, medio ambiente, salud, economía, comercio y estabilidad social de una nación. En ellos, "es evidente que no sólo la energía no es un asunto sectorial, sino que está relacionada de manera vital con otras muchas dimensiones del desarrollo."

En consecuencia, el proceso de planeación del sector eléctrico a largo plazo, los objetivos sustentados en principios se visualizan en el futuro. Es decir, se planifica las características que debe alcanzar en el futuro el sistema energético óptimo. Lo subsiguiente es un proceso de razonamiento deductivo-inductivo a través de numerosos datos y referencias bibliográficas. Se hace un inventario y ordenamiento de la información en forma sintética y razonada. Se consideran, con especial atención, las deducciones generalizadas de los especialistas, corroborando su congruencia con la información estadística.

Las variables consideradas determinantes para el diseño óptimo para el sistema de generación del Sector Eléctrico de México, son: 1) Seguridad en el suministro energético. 2) Empleo de tecnologías avanzadas que sean versátiles y eficientes. 3) Menores costos de producción. 4) Menor afectación al ambiente y a la salud humana. 5) Alcanzar el mayor progreso social. 6) Mayor competitividad comercial. 9) Empleo eficiente de los recursos energéticos. 10) Mayores efectos multiplicadores.

Estas variables representan las variables de entrada de diseño del modelo matemático energético. Sus valores cuantitativos son el resultado de tres años de trabajo. Haciendo hincapié en que éstos deben ser manejados en una perspectiva de evolución que se modifica con el tiempo y el lugar. Estas variables se deben mantener en forma inconexa. En la modelación del sistema eléctrico óptimo, a analizar, las variables inductoras no se deben comportar como variables dependientes. (Figura 1.) Así, mediante las técnicas de programación matemática es posible diseñar un sistema eléctrico que optimice la participación de las fuentes de energía, encaminadas hacia objetivos sociales, económicos y ambientales concretos. Una vez, obtenidos los resultados del escenario base y de sus escenarios plausibles, se procede al diseño de un plan energético estratégico.

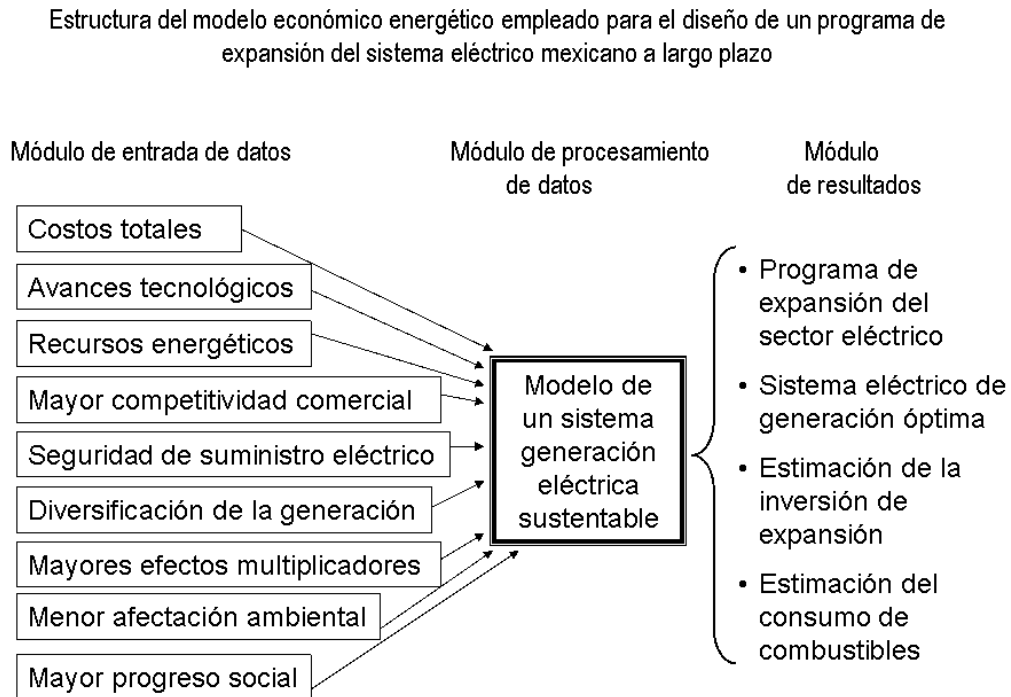


Figura 1. Variables de entrada del modelo económico-energético y los resultados esperados

III. RESULTADOS Y DISCUSION

Una parte importante del trabajo dedicó sus esfuerzos a la publicación de los resultados en extenso en revistas y a manera de resúmenes en congresos. En total se publicaron tres trabajos en extenso cuyas versiones completas se exponen en este capítulo. Además, en el Anexo se presentan los resúmenes publicados en congresos nacionales. La parte correspondiente al diagnóstico es un documento de más de 520 páginas y que por cuestiones prácticas no se incluye.



III. 1 EVALUATION OF MEXICO'S 1975-2000 ENERGY PLAN

Sergio D. Bazán-Perkins^{a*}, José L. Fernández-Zayas^b

*División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería^a.
Instituto de Ingeniería^b.*

Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, México, DF.

Abstract

The certainty and trustworthiness of a planning model can best be assessed when projections can be compared with actual developments. The ability to design scenarios and to evaluate demographic, economic and technological change is also increased with periodic comparisons between plans and actual facts. In 1976, the Mexican government published a 25 year power supply plan for the country, in which a development of non fossil fuel plants was recommended, largely due to environmental considerations. It was proposed that the new demand should be met mainly with renewable energy sources and nuclear power. The study stated that hydrocarbons would reach a peak between 2003 and 2005, and that after this point; the descent of fuel consumption would proceed at an increased velocity. Under this program, the dependence of Mexico on fuel for electricity would be gradually reduced as the 21st century progressed. The suggestion was not assumed by successive governments, and fossil fuel plants took the place of the proposed nuclear plants. However, the original 25 years power plan has proved to be quite accurate in its social and economic previsions, and allows the validation of a new, more powerful and reliable planning model. This paper presents the results of the validation of the model, as well as major considerations to be heeded in the future to increase certainty in further planning efforts. The projection of a better, more sustainable and reliable energy future is also proposed.

JEL classification: O21

Keywords: Energy planning; Non-fossil power plants; Long-term scenarios; Mexican power program; Mix integer linear programming.

Corresponding author. Tel.: +52 55 56181055; fax: +52 55 56162922.

E-mail address: bazanperkins@hotmail.com (S.D. Bazán-Perkins).

0140-9883/\$ - see front matter © 2007 Elsevier B.V. All rights reserved.

doi: 10.1016/j.eneco.2007.02.006

Corresponding author. Tel.: +5255 56181055; fax: +5255 56162922

E-mail address: bazanperkins@hotmail.com

A case for energy planning

In a recent paper by Clark and Lund (2007), an analysis is made of public policy planning in energy, its reliability, and the need to procure a better assessment of environmental impact. The process of energy planning should also lend insight on more “agile energy systems” that can contribute to a more robust service in a more sustainable environment. The integration of energy systems with their applications (water, transport) are further commented in Clark (2007). In an independent investigation, Georgoupoulou et al. (2006) attempt to explore these questions. They aim at assessing the expectations for the allocation plans of the next phase of the European Union emission trading schemes under various scenarios. The results could be of use to individual installations, especially small ones, in determining their strategy on energy use and on investment for energy conservation or, alternatively, on utilization of both the flexible mechanisms of KP and market tools. Subki (1995) argues favorably in terms of nuclear power plants for Indonesia, in the view of the modern planning parameters. The attention to green bonuses is shifting the cost variables, making it mandatory to have proper inclusive planning mechanisms available. It can also be appreciated that the inclusion of more diverse, non fossil fuel energy plants, results in a diminished cost for the national energy portfolio.

Peterson and Rose (2006) discuss the drift in USA toward a more integrated national effort to reconcile energy and climate efforts. This important development occurs in the face of growing concern with long-term scenarios and result in a diminished enthusiasm for high energy density fuels that threaten the global balance, and drive attention to more costly options. The new situation has been addressed by Wisner and Bolinger (2006), who study the required balance between costs and risks in the medium term. They prove that the planning effort is necessarily becoming more sophisticated, and that improvements are needed in order to identify “best portfolio” solutions. The need for better planning schemes, in order to take advantage of more complex energy sources, such as solar and wind, is properly analyzed by Huacuz (2005) in the case of Mexico. A similar exercise was attempted by Zamzam et al. (2003) for Malaysia, and Demirbas (2001) for Turkey, with the same purposes.

The new planning effort has to deal with the tradition of oil pricing, which is an issue not resolved in terms of the modern social requirements. As Cleveland and Kaufmann (2002) recount, US energy policy is based on a seemingly reasonable economic premise: economic incentives to the oil industry will stimulate drilling, which will increase supply. But US oil production does not behave as predicted by economic theory (Krautkraemer, 1998). In fact, he claims, production and prices move in opposite directions, systematically defeating planning efforts.

An early planning analysis for Mexico, with the view to a cleaner future, was produced by Manzini and Martinez (1999). They based their proposal on a prospective study. In their view, the prospective technique often relies on scenarios, or images of the future. The main purpose of the scenarios is to integrate specific analysis of tendencies, possible events and desirable situations in the context of a general future vision. The development of scenarios permits the analyst to concentrate attention on a long-range vision of the future possibilities. To be useful, they state, a scenario must be relevant, integral, hypothetical and plausible; in addition, it must take into account economic, social, political, demographic, technological and ecological considerations. Hence, long term planning is a difficult task, and the smallness of the probability to effectively predict trends and situations makes the planning procedure a very difficult one. However, most researchers would agree that more mistakes are done by not attempting to plan ahead, than those that result from improper planning.

The present paper addresses the issue of forecasting precision. Several planning tools are available, which allow the user to feed in a number of relevant statistics and trends, and let a computer forecast future scenarios. The advent of these planning tools cannot be more welcome these days, when power failure is a growing concern, and real costs are a moving target. Hence, the value of proven forecast power of a method can provide other researchers with valuable insight into planning tools. This paper deals with a planning exercise that was performed in Mexico with the view of 25 years into the future by Eibenschutz et al. (1976). The modern planning tools available today are validated with the expectations of this study and the measured dynamics of the Mexican energy sector. The validated model can now be employed to explore other scenarios into the near term for Mexico.

1. Introduction

Soon after the oil seizure of 1973, the civilizations changed the concepts of the use of the energy and those of energy itself. This was due to the international conflict that caused the restriction of the supply of petroleum that triplicated the prices in few months. From then on, a bigger conscience exists to use energy resources in more efficient form, optimizing its consumption in the most profitable uses. A new energy concept would also outline the development of programs for the diversification of energy sources and for their efficient employment. Krichene (2002; 2006) describes these changes as they resulted in the consumption of crude oil increasing in the world at an average rate of 1.3% per year during 1974–2004, compared with an average growth rate of 7.2% per year during the period 1918–1973.

In the years that followed the oil seizure of 1973, the outrageous rise of the price of the crude oil and technological innovations caused drastic reforms in energy systems in the industrial, commercial, residential and transportation sectors. Nuclear energy has been an important energy source since the first oil embargo that occurred in the early 1970s. Since then until the mid-80's, the thermoelectric plants based on the combined cycle of gas has surged as the preferred electricity producer in Mexico and in many other parts of the world (Nakata, 2002 and 2004; Ferenc and Hans-Holger, 2006). This way, the EIA (2003) explains the decrement of the consumption of crude oil by the world electric producers, that would explain that the growth was reduced in the period 1979–2001 from 23% to only 7.2%.

In Mexico, the energy crisis of 1971–1974, has questioned the pattern of expansion of its electric sector sustained on hydrocarbons. Derived from this analysis, the conclusion was reached that merely burning fuel oil was no longer a viable model for the long term in this country. Then, from the analysis of the technological tendencies and that of the global and national markets of the energy ones, a new expansion program for the Mexican electric sector 1975–2000 was derived. The proposal for the year 2000 that was then considered as the best, considered that most of electricity of the country should be obtained from a mix conformed mainly by non fossil energy sources. In this scenario, the nuclear energy source would result in a maximum participation and the employment of fossil fuels would be minimum (Eibenschutz et al., 1976). However, contrary to the results of this long term energy planning, the country chose short term options, and the expansion of the electric sector was developed using fundamentally hydrocarbons, bearing the resulting high costs for the production of electricity.

For a nation having an efficient electric system, the appropriate mix of energy sources guarantees a timely long term energy supply at the lower cost, by means of clean technologies that propitiate the biggest economic and social progress, within a highly commercially competitive production market while also allowing significant cost reductions in electricity rates to the consumers. When this situation isn't reached, the government and the society would be financing an inefficient electric system. In

quantitative terms, it is now feasible to evaluate the levels of efficiency of the programs of expansion of the electric sector in terms of the difference between the optimal ones and the real one.

The mix of energy sources that minimizes the costs of production of the electric systems can be obtained by means of models of lineal mathematical programming (Massé and Gibrat, 1957; Carpentier and Merlin 1982; Dechamps, 1983). Initially, these models were used for a single administrator of the service in order to guarantee the access from the non discriminatory supply to all the consumers. In recent years, Murphy and Smeers (2002), prove that the investments in generation capacity in restructured electricity systems remain a relatively unexplored subject in the modeling community. Contrary to the previous cases, the objective of these models is, explicitly, the maximization of the benefits of the participant companies for the electric power sales in a competitive environment.

2. Mexican power program for 1976

The Mexican power crisis from 1971-1974, caused the discussion and the importance of analyzing the successes and errors of the power planning of the country to improve their management. During this period, the national crude oil production was insufficient to cover the national demand, and therefore it was necessary to restrict its use, to increase social awareness and to elevate its price in the national market. This crisis worsened in 1973, when as a result of the oil embargo of the Arab countries, and by consequence of the OPEC decision, its price was raised in the international market. Although as from 1975 Mexico increased its crude oil exports again, contributing to stabilize and hence to reduce its price in the international market, the necessity to use it in a more efficient form in the different sectors of consumption of the country became evident. At that time it was announced an unprecedented expansion in PEMEX, which made this enterprise wholly owned by the Mexican government a great potential crude oil great scale exporter.

While much afflicted by the previous facts, the Secretariat of the National Patrimony (SePaNaI) introduced the Mexican power program for 1976, titled “A Proposal of Guidelines for Power Policy”. The principal motivation of this plan were to straighten up the main causes that motivated Mexican power crisis in 1971-1974. At the same time, in the long term, it was intended to guarantee power self-sufficiency and economic viability of the electrical sector. The study was based on an economic model with a large reliance on energy factors, to integrate both national and international power issues, such as oil exportation and gas importation. In order to proceed with this study, several disciplinary groups of professionals and scientists of national institutions like the Federal Commission of Electricity (CFE), the National Institute of Nuclear Energy (INEN) and Mexican Petroleum Institute (PEMEX) were invited to contribute with their views and expectations (Eibenschutz et al., 1976).

The energy program of 1976, sought that the Mexican electric sector became the impeller axis of the economic, social and environmental development of the country. According with the Plan, the thermoelectric plants would be substituted during 1975-2000, by more competitive technologies with the view to eliminate the subsidy of electricity. It was considered that the biggest technological innovations in engineering would be taken advantage of, with nuclear energy and renewable such as hydro and geothermal. The renewable energy plants would be developed after reaching the programmed objectives stated toward the year 2000 (Eibenschutz et al., 1976).

In the study, the levels of availability of the national power resources of 1975-2030 were analyzed. One assumption was that the top thermal electric production would be reached towards 2003-2005, after

which a reduction would be gradually achieved. As it happened, Mexico arrived at the year 2000 with a very high dependence on petroleum and natural gas for the electrical production. Official decisions disregarded the proposed mix of options for power plants that was adopted for the electrical generation for the period 1975–2000. For the year 2000, according to the 1976 plan, the Mexican electrical system would consist of 73.5% of nonfossil power plants (nuclear 55% and 18.5% renewables) and the remaining 26.5% would have depended on fossil fuels (16.5% mineral coal and 10% hydrocarbons) (Fig. 1).

SePaNal, recommended in 1976 to foster institutional culture and social awareness, so that changes of individuals at different government levels would not truncate the strategic programs of long term vision, when replacing them with short term administrators. The contradiction and subsequent danger was that the energy politics aimed at the consumption of hydrocarbons for the electric production was, at that time, viable in the short term, but in the long term it implied the collapse of the economy. A big investment was then required to diversify the energy offer, to qualify the human resources and to promote the domestic production to equip the sector. In this way, the fundamental national problems would have been addressed when a better organization was required for planning, and for making more complex decisions aiming at a higher competitiveness, based at the same time on a more punctual analysis. It was forecast that a plan of higher technological and scientific content would be required to create an adequate infrastructure of human resources and industrial development (Eibenschutz et al., 1976).

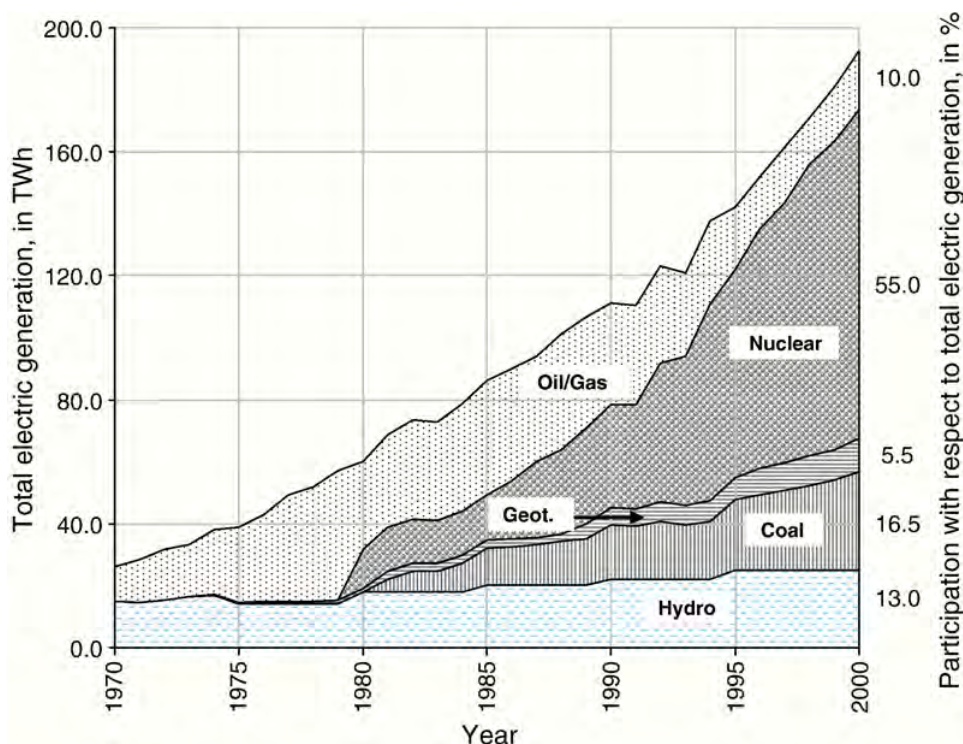


Figure 1. Proposal for the expansion electric power generation in Mexico 1976 (Elaborated with data of Eibenschutz et al., 1976; CEFP, 2001).

Unfortunately, the energy program of 1976 was denied by the political will of the subsequent governments. In december of 1976, when José López Portillo took power for the period 1976-1982, the responsibilities of the old SePaNal were included in the Secretary of Patrimony and Industrial Development (SePaFIIn). The politics of expansion of the Mexican electric sector were once again conditioned to the principal consumption of crude oil. The lack of medium and long term planning departed clearly from the international and national experience. The country increased its economic and technologic dependence on oil and reduced its options, hence damaging its development and independence.

Fig. 2 expresses the actual electrical power plants that furnished the expansion of the Mexican electrical sector in 1970-2000. During this period, the electric supply of the country grew from 26,200 to 192,720 GWh which implied that no reduction on dependence on oil would take place. However, some new power sources were developed. In 1973, the first commercial geothermoelectric power plant of the country began operation with 37.5 MW (Cerro Prieto, Baja California). It was based on a prototype installed in 1956 with 3.5 MW (Pathé, Hidalgo). Until 1990, the first unit of the nuclear power plant of Mexico entered operation, and the second unit in 1995, both at Laguna Verde, Veracruz. Each unit is a model BWR-5 reactor rated at 680 MW; that in 2003. They both registered a plant factor of 90.2%. Finally, in 1994, the first interconnected Mexican wind energy power station at La Venta, Oaxaca, was started with a rated power of 1.57 MW

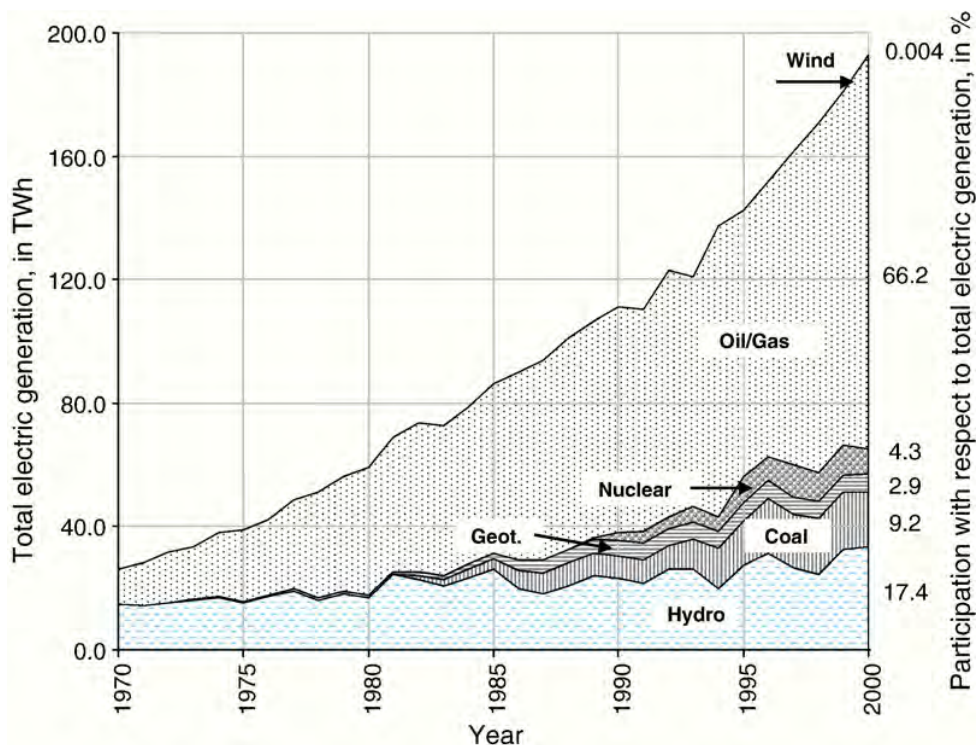


Figure 2. Electric Power Generation in Mexico of 1970 to 2000 (Elaborated with data of CEFEP, 2001; Sener, 2006).

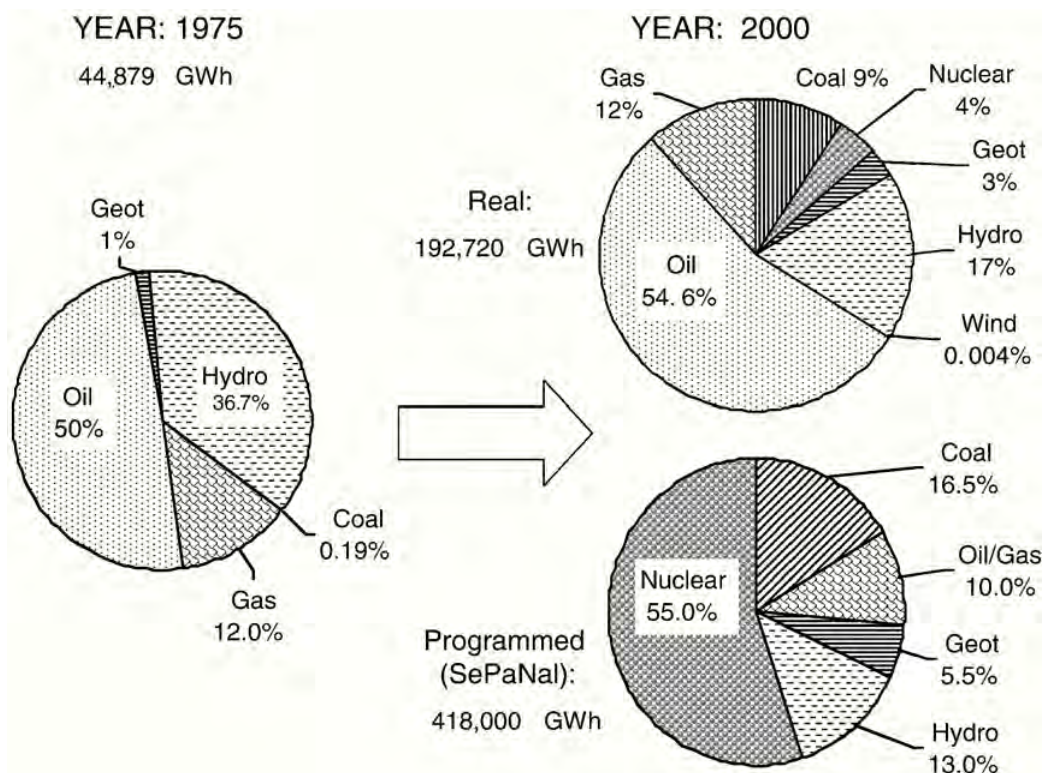


Figure 3. Mix of power sources carried out in 1975 and 2000, and the one programmed by the SePaNal for the 2000 (Elaborated with data of Eibenschutz et al., 1976; Sener 2002 and 2006).

Eibenschutz et al. (1976) considered that the least cost and long term supply would be warranted by the mix of energy sources shown in Fig. 1. On the other hand, official policy Sener (2002) states that the expansion program results from "a systematic selection of projects to achieve the minimum cost of the electric supply", in terms of Fig. 2. However, Fig. 3 illustrates that both proposals in the year 2000 are inconsistent and contradictory. The energy policy actually carried out implies the electric generation of 54.6% by means of crude oil, which means that 75% of the total capacity is based on fossil fuels (petroleum, natural gas and mineral coal). On the contrary, the 1975-2000 SePaNal proposal included to use nuclear power in 55% of total national plant capacity, that would have reduced the dependence on fossil energy resources to only 26.5% by 2000.

2.1 Policy for power self-sufficiency

The causes of the Mexican power crisis of 1971-1974, didn't arise from problems associated with the dimensions of the power resources of the country. Rather, they resulted from inadequate patterns for the employment of the power resources, which were not the best nor profitable for the consumption sectors (Eibenschutz et al., 1976). Therefore, the 1975-2000 energy program, argued in favor of the rational use of the power resources of the country, in order to decrease the consumption of oil derivatives in the electric sector, increasing the use of the nuclear energy. It was expected that this policy would make the

supply of electrical energy reliable for international standards, and thus it would be instrumental to improve the country's competitive edge. The price of this service would then reflect its cost more accurately and subsidies could be withdrawn. To reach those objectives, the program recommended unusually large efforts by the institutions of the country, assigning bigger funds to scientific research and professional training of human resources. This effort would detonate the development of the national electric industry with the increased participation of national manufacturing firms employing advanced technologies.

Quite to the contrary, the country sustained the energy policy that started during the seventies, that tied the development of the electric sector to increased use of oil derivatives. Hence, as time progressed, diversification of energy sources was in fact reduced. The explosive and intensive employment of fossil fuel was justified in terms of the then expected enormous oil reserves (De Buen, 1976). As a consequence, technological stagnation was increased since there was scarce interest to incorporate and develop power alternatives to fossil fuel. This is clearly appreciated in successive prospective publications issued by the Federal Government itself. As a consequence, the total non-fossil fuel prime energy source has been reduced from 38% of the national mix in 1975 to only 24.6% in 2000 and from there to a scant 19.5% in 2004 as a fraction of the total electric generation.

An analysis by Monteforte (1991) of the Mexican electric sector, during the years seventy and eighty, concludes that the resistance against altering the centralized traditional technological trajectory that supports oil as the basic energy source, resulted from working agreements among high government authorities and union leaders. The planning and expansion of the energy sector was determined by party political interest, rather than economics or larger political wishes that would have privileged a selection of the appropriately efficient and strategic technical alternatives. This explains the slow modernization of the Mexican electric sector, which in general has been deprived of technological development and specialized human resources. To this date, long term projects and programs don't exist in the electric sector of the country, so that competitiveness in this area, a factor of overall competitiveness that is closely monitored by international institutions (IMF, 2006), has been diminishing steadily during the last thirty years.

A further consequence is economic. Geothermal power can be used as an example; it is among the most competitive and reliable technologies of electric production in the electric system of Mexico. Also, geothermal power increases the overall reliability of the national power supply, and doesn't generate greenhouse emissions (Hiriart and Andaluz, 2000; Bazán-Perkins, 2004b). However, according to Sener (2002 and 2005), in 2004 the geothermal power installed capacity was about 960 MW. Viable economic projects have been identified that would increase geothermal generation capacity to at least 2,400 MW toward 2020.

Recently, Huacuz (2004) proposed a series of concrete strategic actions to eliminate the barriers that have not allowed the development of renewable power sources in Mexico. He states that viable policies and regulations to adapt the technologies must be adopted, as well as appropriate financing mechanisms, together with government action plans and relevant stakeholders, including the private and social sectors. The effective coordination of the national and international investment must be achieved. On the other hand, Manzini and Martínez (2003), establish that the economic viability of the renewable power sources for the electric sector of Mexico will occur in the long term, since at present and in the short term, an official scenario based on natural gas is the most profitable and appropriate. This contradiction in interest spans has resulted in the prevailing, undesirable, national energy scenario.

3. Oil and natural gas reserves for thermal electric plants.

According to Bazán-Barrón (1994), the economic value of oil reserves is manipulated with political party interests, with little regard to technical considerations. This explains the lack of control on reliable figures since the mid-1970s. The wish to exploit unproved oil reserves resulted in the so-called "mortgage of Mexico", when international credit was obtained against a virtual guarantee of oil reserves. Ever since then, the proven oil reserves have been exaggerated beyond reality. In 1994 these reserves amounted to little less than 25,000 million barrels, against 64,000 that Pemex reported officially. The continuous growth in public deficit was offset by successive international debt taking, at a time when international banks would never assumed that a country could default its dues. Finally, the economic disaster brought down the country's whole economy in December 1994.

In the face of continuing criticism of official energy policies, during 1996-1999, Pemex proceeded to reassess and to reclassify the proven oil reserves of the country. To achieve its purposes, diverse approaches and stricter definitions were used, among them, those required by international banks to grant credits to the country. It was then that it became widely known that official figures of oil reserves were not realistic. By the 31st December 2001, a more reliable calculation of proven oil reserves of Mexico was published by Pemex (Shields, 2003).

According with Pemex (1990-1994), the proven oil and natural gas reserves, would allow to satisfy the needs of the country for more than 55 years. However, with the new calculations, format the onset of the 21st century those proven reserves would be insufficient to satisfy the requirements of thermal electric power plants. Therefore, for 2005, the proven crude oil reserves were 14.6 trillion barrels, when the yearly accumulated production is 1.216 trillion barrels. Accordingly, supply would only guarantee self sufficiency for another 12 years. Those of natural gas with proven reserves of 14.9 Tpc, with a production of 1.758 Tpc, would hardly last 8 years. Figures 4 and 5 compare the amount of the reserves of crude oil and natural gas, respectively, for the known installed capacity of plants that require such fuels.

Consequently, plants that were first started in 1988 will have to complete its operative life using natural gas of imported origin. It can be concluded that, had PEMEX reported the proven reserves of natural gas appropriately, the power sector planners of Mexico would very likely not have chosen to install new combined cycles since the 1990s (Fig. 5). Among the main energy policy objectives of the country, as stated publicly and in the law, is power self-sufficiency to enhance economic competitiveness.

These facts combined, or taken individually, indicate that the choice of combined cycle plants based on natural gas was wrong. By 1998, there was already enough macroeconomic evidence of the lack of viability of gas-based combined cycle plants. Coal for electric generation in Mexico is also no viable solution to the problem of long term power supply, due to the low energy quality of Mexican, reduced availability and high generation costs (González-Reyna, 1956).

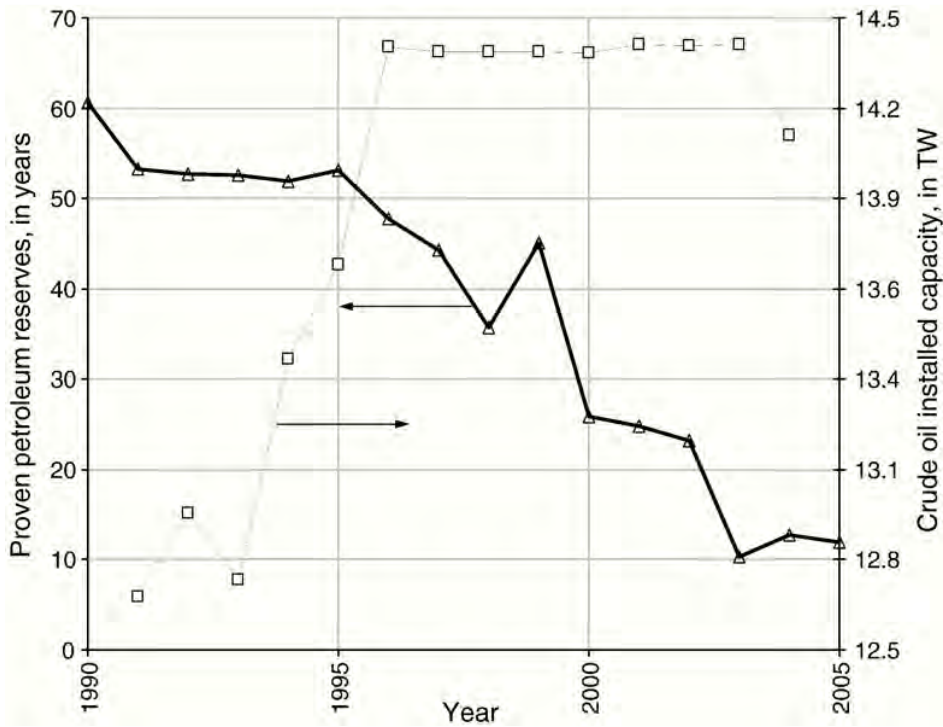


Figure 4. Installed capacity of thermoelectric plants based on oil and proven reserves of crude oil in Mexico in years, from 1991 to 2005 (Elaborated with data of EIA, 2006; INEGI, 2006).

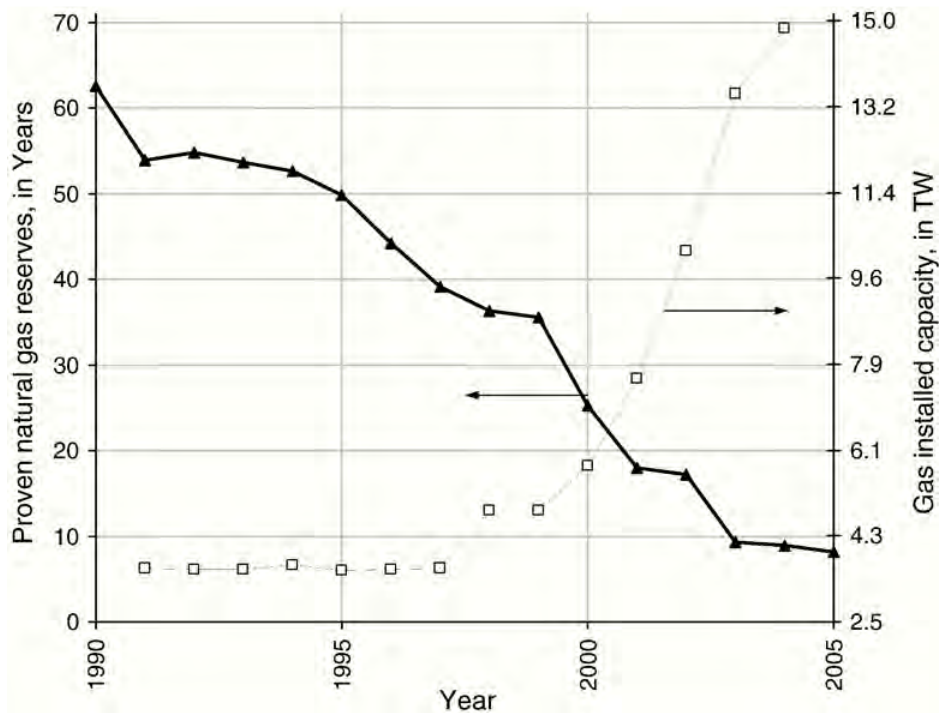


Figure 5. Installed capacity of thermoelectric plants based on natural gas and proven reserves of natural gas in Mexico, from 1991 to 2005 (Elaborated with data of EIA, 2006; Sener, 2004; INEGI, 2006).

4. Competitiveness of Nuclear vs. Combined Cycle

The economic competitiveness of gas fired combined cycle depends on the price of natural gas. This technology represents more than 70% of the level total cost of the electric production. On the other hand, for the new nuclear plants, their economic viability depends mainly on the cost of investment capital. Fig. 6 compares the costs of production for combined cycle plants in Mexico and nuclear plants for several countries from 1990 to 2005. For this analysis, the level total costs of production of combined cycle plants are evaluated based on prices of natural gas without subsidy; as from 2000, the new combined cycle plants that are subsidized are evaluated by means of the price of the national market natural gas. For this exercise, capital yield is taken to be between 10-12%.

With these data, it is noticed that for over one decade, combined cycle plants, present a tendency to lose economic competitiveness with regard to II Generation nuclear power plants and more recently, with regard to III Generation power plants. These figures illustrate the upward tendency of production costs of combined cycle systems, as nuclear plants become cheaper. By consequence, from 1992 onward, combined cycle power plants that operate in Mexico have lost competitiveness with regard to the refurbished nuclear II Generation power plants in the United States. Also, as shown by Bazán-Perkins (2005), the new combined cycle plants that operate in Mexico, starting in 2003, are less competitive than III Generation nuclear plants that operate in other nations.

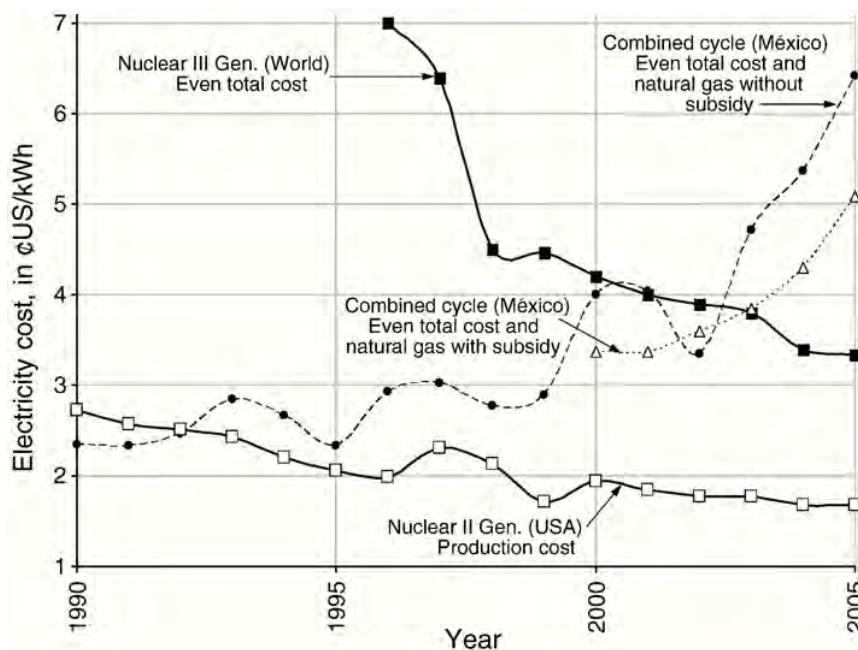


Figure 6. Costs of production of the cycle turbines combined in Mexico and nuclear power 1990-2005. Cost of capital 10-12%. (Taken data of Kayak, et al., 1998; COPAR, 1998-2006; GE, 2000; NERI, 2002; WNA, 2003; UC, 2004; NEI, 2002 and 2006).

5. Optimal power mix: minimizing the overall cost

The development of an economic model for a national energy policy is a multidisciplinary task. Two main aspects to consider are the economic and environmental issues. Hence, available of foreseeable technology innovations should also be included. In the Mexican electric sector, there is really one agent that contributes to the offer, the Federal Government, through the Federal Commission for Electricity (CFE). One way of analyzing the competitiveness of the Mexican electric system, resides in comparing the total cost of electric production, with different electric systems, according to the participation of the energy sources.

An electric system of reference is defined by the optimal mix of generation sources that minimizes the total costs of electric production for year 2000. By means of a comparison, the opportunity cost is obtained for each option. This way, the level of efficiency of planning of the electric sector is quantified, for the selection of technologies and its more appropriate energy sources. In this outline, the results of the optimal mix of power sources, minimizing the total costs for the Mexican electric system as a whole, was obtained with the aid of a linear program that integrates the optima mix. The details are described in Annex A. The results of the optimal mix of power sources that minimizes the costs for year 2000, are described in Tables 1 and 2, and are then compared with regard to the electric system: a) as it was carried out in fact, b) that of the power program 1976 and c) That of an electric system with "zero emissions." The economic and technological parameters of the units of electric production considered are described in the Table 3

For 2000, the composition of the optimal mix of power sources that minimizes the overall cost of electric production, implies a larger share of non-fossil energy sources, of 74.5% (57.0% nuclear and 17.86% renewable) and hence a total fossil share of 25.47%, with a load reserve of 40%. This analysis, reduced in 67% the total costs of electric production to obtain a benefit of $\$3.66$ US/kWh. The results thus calculated in the present work are similar to the proposals advanced in 1976 by Eibenschutz et al. (1976). That projection calculated a reduction for 2000 in the cost of the electric production in Mexico, which resulted in 66.6% of overall cost reduction by 2000 and a net utility of 3.64 ¢US/kWh. The value of 57.0% obtained by means of nuclear generation, represented a generation of 108,482 GWh and an installed capacity of 13,944 MW, by means of 10 reactors of 1,400 MW of capacity each of them, with a plant factor of 92% (Fig. 6, Tables 1 and 2).

Therefore, in the Mexican electric system, from the beginning of the 90's, the cost of production of the reformed II Generation nuclear plants would have been very much smaller than gas fired combined cycle plants (Fig. 6). On the other hand, in 2000, the installation of new III Generation nuclear power plants in the Mexican electric system, would have propitiated the reduction of electric production costs (Tables 2).

5.1 Optimal mix for "zero emissions"

To preserve environmental conditions in Mexico and to care for population's health, new regulation was implemented to reduce the emissions of SO_x, NO_x and fine powders derived from burning fossil fuels, since 1970, in the industrial and electric sectors (Yañez, 1973). Several measures were adopted in various parts of the world, at the end of the 20th century, on the arising subject of climate change and emissions control. It was concluded that in this Century programs must be implemented to diminish emissions, mainly CO₂ (Beér, 2000). These objectives have the general purpose to reach a sustainable

growth while the society is keen on protecting the environment and the human health. The concept of the economies of "zero emissions" (Suzuki, 2002) was advanced. However, deregulation policies and financial constraints in the public sector seem to come in conflict with respect to greenhouse gas emissions in the development of the Mexican energy system. This is especially noticeable in the power sector where expansion of non fossil fuel generation has been essentially postponed at present (Bauer and Quintanilla, 2000).

Figures 4, 5 and 6 illustrate that fossil fuels available in Mexico are insufficient to guarantee the operative life of the new thermoelectric power plants. Therefore, a great number of thermoelectric power plants of the country use natural gas and mineral coal of imported origin, contrary to the economic policy outlined since the 1970s. The current high price of fossil fuel imposes a change to the paradigm in the Mexican electric sector. This new situation represents enormous opportunities for Mexico in selecting new technological areas, when developing electricity plants based on renewable, nuclear and long term hydrogen power in substitution of fossil fuels. Clean energy technologies would very much decrease or altogether cancel greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆), creating new industries and bigger opportunities for a new economic activity based on new technology (Fernández-Zayas, 2001; 2003; 2006 and Bazán-Perkins, 2004a; 2005).

Table 1
Scenarios of electric power source in México for the year 2000.

| Fuel Type | Carried out: Mexican electric system. | | Optimal power mix projected by SePaNal 1976 ^a | | Optimal power mix: minimizing the overall cost ^a | | Optimal mix for "zero emissions" ^{na} | | |
|-------------------------|---------------------------------------|----------|--|----------|---|----------|--|-----------|-----------|
| Reservation margin | 21% | | 23% | | 40% | | 40% | | |
| | MW | GWh | MW | GWh | MW | GWh | MW | GWh | |
| Fossils hydrocarbons | Cold | 2,600 | 18,501.216 | 4,240.0 | 31,585.20 | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| | Oil | 16,499 | 103,876.61 | | | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| | CC-gas | 3,398 | 17,730.33 | 2,730.0 | 19142.55 | 7032.21 | 49281.73 | n.a. | n.a. |
| | T-G | 2,360 | 5,203.46 | | | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| | Nuclear | 1,365 | 8,287 | 13,050.0 | 105,284.0 | 13,557.0 | 109,259.2 | 13,557.0 | 109,259.2 |
| No – Fossils | Geothermal | 855 | 5,965.9 | 1,413.0 | 10,528.4 | 855.0 | 6366.33 | 855.00 | 6,366.3 |
| | Hydro | 9,619 | 33,148.0 | 8,600.0 | 24,885.3 | 9,619.0 | 27,806.6 | 26,666.80 | 77,088.3 |
| | Wind | 2 | 8.40 | n.a. | n.a. | 2.00 | 6.99 | 2.00 | 6.9 |
| | Total: | 36,698.0 | 192,720.9 | 30,033.0 | 191,425.5 | 31,065.2 | 192720.8 | 41,080.8 | 192720.9 |

n.a. = not available.

^aModel calculations by Eibenschutz et al. (1976). The value of the electric generation (GWh) for each energy source, it was adjusted to the demand electric total obtained in the 2000, maintaining the percentage of their projected participation. Their respective installed capacities (MW), they were calculated using the capacity power factor of the Table 3.

^bModel calculations in this paper.

From this perspective, Mexico has a high potential for nonfossil power plants, which as a whole could cover the total of the electrical demand in the long term. Within these, there are the sedimentary uranium reserves the Cuenca of Tlaxiaco, Oaxaca. These uranium deposits, can basically solve the problem of nuclear fuel supply for the setup of new nuclear power plants in the country (Bazán-Barrón, 1981). Also, there is a wide hydroelectric potential, of the order of 53,000 MW. For year 2004, there are 960 MW in installed geothermoelectrics that can become 2,400 MW in the near future. Wind power alone has proven possibilities to reach 5,000 MW (Sener, 2002 and 2006) with commercial technology available today. Other possibilities are evaluated with new power sources to incorporate several sea energy (waves, thermal gradient, currents and tides), as well as biomass and solar energy.

The results included in Tables 1 and 2, show that during 2000, 192,720.93 GWh were produced. If the expected energy savings that were derived from the “optimal mix” analysis are to be exploited in the future, more nuclear and renewable energy power plants have to be built in the future. A more modern energy policy for Mexico should include at least some of the proposals loosely grouped together under the concept of “zero emissions.”

Table 2

Price, cost, benefit and subsidy of the electricity in Mexico in the 2000. Compared with the plan of the electric system proposed in 1976 and derived from the “optimal mix” that minimize the cost.

| Concept | Carried out (SENER, 2005). | Results that they would have been obtained using the proposal of SePaNal (Eibenschutz et al., 1976) | Results obtained using optimal power mix: minimizing the overall cost ^a | Results obtained using optimal mix for “zero emissions” ^a |
|-----------------------------|----------------------------|---|--|--|
| Energy Reservation | 21% | 23% | 40% | 40% |
| Price Electricity (¢US/kWh) | 7.73 | 7.73 | 7.73 | 7.73 |
| Cost Electricity (¢US/kWh) | 12.20 | 4.09 | 4.07 | 4.8 |
| Benefit (¢US/kWh) | There is not | 3.64 | 3.66 | 2.93 |
| Subsidize (¢US/kWh) | 4.47 | It doesn't require | It doesn't require | It doesn't require |

^aModel calculations in this paper.

Table 3

Technical and Economic Parameters of New Power Units (2000)

| New power plant | Capacity | Power Factor (%) | Leveled Energy Cost (¢US/kWh) ^a |
|--|----------|------------------|--|
| Thermalelectric Coal (2 X 350 MW) | 85.0 | | 3.7 |
| Thermalelectric Oil (2 x 84 MW) | 80.0 | | 6.24 |
| ¹ Combined cycle gas–diesel (568MW) | 80.0 | | 3.37 |
| ¹ Thermalelectric -gas (1 X 251 MW) | 25.0 | | 5.84 |
| Nuclear III Gen. (1400 MW) | 92.0 | | 3.87 |
| Hydroelectric (3X200 MW) | 33.0 | | 6.2 |
| Geothermal Power (120 MW) | 85.0 | | 3.8 |
| Wind Power (0.750 MW) | 39.9 | | 6.0 |

^aLife time 30 to 40 years and capital cost 10 to 12%.

Finally, it must be emphasized that the optimal mix of power sources proposed by the work of Eibenschutz et al. (1976) presents characteristic that make it much more plausible for a modern Mexican energy policy than the practice actually adopted, both in terms of national self sufficiency and economy, as well as in terms of sustainability and competitiveness (Table 1). As can be seen, the main cause that prevents Mexican energy from being viable is its high opportunity cost. That is to say, for decades, an inadequate planning of the power sources has prevailed over the expansion of the electric sector of Mexico. This is very likely the main reason for the need of State subsidy to electricity (Table 2).

4. Vision of the future

In the previous paragraphs, a description has been made of the Mexican overall energy sector as it “should have been” (Eibenschutz et al., 1976), and compared with how it actually evolved. A vision of the desired future includes actions that entail big challenges, changes and transformations to break with its excessive dependence on fuel oil. As an alternative for the next decades, Fernández-Zayas (2001; 2003) and Bazán-Perkins (2004a; 2005) propose the progressive substitution of the fossil fuels and expansion of the electric sector, using nuclear energy, renewable sources of energy and hydrogen technologies. This proposal has been sustained in analysis of the historical and future tendencies foreseen by energy market experts, in terms of a more modern or advances technology and a better availability of the energy resource in the country.

The previously exposed ideas strengthen the viability of the expansion of the Mexican electric sector, by means of an optimal mix of non fossil, diversified, sources of energy. Nuclear power minimizes the costs of electric production and enhances national security. However, time windows are of relevance: if new nuclear plants are decided to be built in the country very soon, the first units would enter operation after 2015, ten years later or so (US-DE, 2004), The fact is that 91.3% of all new infrastructure capacity for 2004-2014 (Sener, 2005) are already in the building stage, and most will consist of natural gas combined cycles. Hence, the progressive substitution of traditional technologies will be postponed for more than one decade.

4. Conclusions

In Mexico, the prevailing energy policy, starting in the mid 1970s, was derived from the illusion that there were enormous crude oil and gas reserves to tap from. This argument was used as the power politics’ instrument to justify and to discourage the necessity of the development of nuclear and renewable power sources for the electric sector. At the onset of the 21st century, this policy has resulted in that more than two thirds of the electricity in Mexico is obtained from thermal electric plants that burn gas or oil derivatives. At the present date, the proven reserves of hydrocarbon fuels are insufficient to cover the power demand the country for more than one decade. This lack of fuel threatens power self-sufficiency of the electric sector of the country. Furthermore, given the market high price of hydrocarbons, opportunity costs for the electricity production in Mexico keep rising considerably.

In tune with those facts, had the Mexican energy sector adopted a growth path based on an optimal mix of energy resources that would have included nonfossil power plants, it could have produced the development of national economies to take advantage of nuclear and renewable power sources. The largest economic and environmental benefits would have been obtained from lowering overall combustion emissions. At the same time, in the measure that nuclear power generation had advanced,

the total costs of electric production would have been minimized, favoring a larger participation of costlier renewable power options.

The Mexican power program for 1976-2000 (Eibenschutz et al., 1976), that programmed the expansion of the electric sector using mainly nuclear power plants, was appropriate in its essential parts and guessed the right implications, once it is being valued at the light of the retrospective historical perspective. Its high level of certainty in terms of its basic assumptions has been verified in terms of the optimal mix of the energy sources of electric generation. Those would have enhanced the economic, social and environmental progress of the country. It can be concluded that the main cause for the lack of viability of the Mexican electrical sector at present results from its high costs of opportunity. These costs result from an inadequate programming of the power sources and of their technologies for the electric sector. Hence, increased needs arise for State subsidy to electricity, although service is generally poor. Therefore, it is necessary that energy national programs are backed by legislation that sustains them and protects the energy sector development from deviations that are not profitable for the country.

Appendix

The model: A system of electric generation is integrated for a mix of plants of generation of power that generally use diverse energy sources. From a mathematical point of view the lineal programming is effective to integrate the optimal mix of the technologies of generation of the electric sector. The modeling for Mexico is based on the unique fact that the producer is one single enterprise, government owned. The purpose is to optimize the flows of power at the minimum low cost given a series of technical and economic conditions. These variables have lineal restrictions, and they structure their participation in an electric system, in symbolic terms:

$$\text{Min } z = f(x_1, \dots, X_n) = (\text{LEC}_1)X_1 + (\text{LEC}_2)X_2 \dots + \Sigma (\text{LEC}_n)X_n = \text{LEC}_i X_i \text{ from } i, j = 1 \rightarrow n$$

- Linear constraints

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1N}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2N}x_n \leq b_2$$

.

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mN}x_n \leq b_m$$

- And the variables may be located between the extreme values

- $x_1^{\min} \leq x_1 \leq x_1^{\max}$

$$x_2^{\min} \leq x_2 \leq x_2^{\max}$$

.

$$x_N^{\min} \leq x_N \leq x_N^{\max}$$

$$x_1 \geq 0 + x_2 \geq 0 + x_3 \geq 0 \dots x_N \geq 0$$

X_j : variables of decision, $j = 1, 2, \dots, n$; n : number of variables; m : number of restrictions; a_{ij} , b_i and LEC , $i = 1, 2, \dots, m$, are well-known constants.

$\text{LEC}_1, \text{LEC}_2, \dots, \text{LEC}_n$ correspond to the Total Energy Level Cost for each technology for electric generation. The x_1, \dots, x_n , $x_j \geq 0$, $j = 1, 2, \dots$, represent the installed capacity of each technology for electric generation. The restrictions, $a_{1N}, a_{2N}, \dots, a_{mN}$, are the technological coefficients, that use the same type of power source. Finally, b_1, \dots, b_m , are the vectors of terms to the right or constant associated to the demand, and are limited by the total capacity of each technology to supply electricity. The equations of

balance and restrictions of the system are defined by the maximum and minimum benchmarks of the variables of decision. In their group, they associate to:

- Restrictions of the power resources.
- Restrictions of the plant factor (technological and operative).
- Restriction of costs.
- Balance of the offer and demand of flow of power.
- Load and peak reserves.
- Maximum value that each energy technology can attain.

References

- Bauer, M., Quintanilla, J., 2000. Conflicting Energy, Environment, Economy Policies in Mexico. *Energy Policy* 28 (5), 321-326.
- Bazán-Barrón, S., 1981. Distribution and Metalogenesis of the Uranium Mesozoic County of Mexico. *GEOMIMET* 112, 65-96.
- Bazán-Barrón, S., 1994. Proven Reserves of Oil were Indiscriminately “inflated”. *El Universal Newspaper, Financial Section* (Mexico).
- Bazán-Perkins, S.D., 2004a. Nuclear Energy as a Basis to Meet the Electricity Demand in the long term. IV National Meeting of Earth Sciences, SS3-37, p. 309-310, 31 October-5 November (Mexico).
- Bazán-Perkins, S.D., 2004b. Economic Competitiveness of the Geothermal Power in Mexico. IV National Meeting of Earth Sciences, SE15-14, p. 278-279, 31 October-5 November (Mexico).
- Bazán-Perkins, S.D., 2005. Nuclear Energy a Sustainable Alternative to Solve the Electric Demands in Mexico. *Ingeniería, Investigación y Tecnología* 4 (3-4), 187-205 and 281-298 (Mexico).
- Beér, J. M., 2000. Combustion Technology Developments in Power Generation in Response To Environmental Challenges. *Progress in Energy and Combustion Science* 26 (4-6), 301-327.
- Carpentier, J., Merlin, A., 1982. Optimization Methods in Planning and Operation, *Electrical Power and Energy Systems* 4 (1), 11-18.
- CEFP (Center of Studies of the Public Finances), 2001. Evolution and Perspective of the Energy Sector in Mexico 1970-2000. Deputies House, H. Congress of the Union, CEF/051/2001 (Mexico).
- Clark, W., Lund, H., 2007. Sustainable Development in Practice. *Journal of Cleaner Production* 15 (3), 253-258.
- Clark II, W.W., 2007. Partnerships in Creating Agile Sustainable Development Communities. *Journal of Cleaner Production* 15 (3), 294-302.
- Cleveland, C.J., Kaufmann, R.K., 2002. Oil Supply and Oil Politics: Déjà Vu all over again. *Energy Policy* 31 (6), 485-489.
- COPAR (Costs and Parameters of Reference) 1998-2006. Of Generation, Management of Evaluation and Programming of Investments, several reports. CFE, Table A.1 (Mexico).

De Buen, L.O., 1976. Energy Policy in the Federal Commission of Electricity. VII Biennial National Assembly of the School of Mechanical and Electrical Engineers (Mexico).

Dechamps, C., 1983. Optimization in Electric Power System Planning Proceedings of the Arab School on Science and Technology. Hemisphere Publishing Corporation, Power Systems Analysis and Planning, Corporation. Washington, USA, p. 2001-2008.

Demirbas, A., 2001. Energy Balance, Energy Sources, Energy Policy, Future Developments and Energy Investments in Turkey. Energy Conversion and Management 42 (10), 1239-1258.

EIA (Energy Information Administration), 2003. International Energy Outlook 2003, DOE/EIA-0484 (2003), Washington, DC. USA.

EIA (Energy Information Administration), 2006. International Energy Annual 2005. Washington, D.C. USA.

Eibenschutz, J., Guillen, S.T., Fernández-Zayas, J.L., 1976. Proposal of Limits for Energy Policy, SePaNal (National Patrimony Secretariat), Energy Commission (Mexico).

Ferenc L.T., Hans-Holger, R., 2006. Oil and Nuclear Power: Past, Present and Future. Energy Economics 28 (1), 1-25.

Fernández-Zayas, J.L., 2001. Energy Alternatives for Mexico, FICA, p. 32 (Mexico).

Fernández-Zayas, J.L., 2003. Current Possibilities of the Hydrogen like Energy in Mexico, Sener (Mexico).

Fernández-Zayas, J.L., 2006. We need more resources human in Energy, First Seminar of Energy and Science, Mexican Academy of Science, AMC/08/06 (Mexico).

GE (General Electric Company), 2000. Advanced Boiling Water Reactor General Plant Description, First of the Next Generation.

Georgopoulou, E., Sarafidis Y., Mirasgedis S., Lalas D.P., 2006. Next Allocation Phase of the EU Emissions Trading Scheme: How Tough will the Future Be?. Energy Policy 34 (18), 4002-4023.

González-Reyna, J., 1956. Mining Wealth and Minerals Ore in Mexico, Banco de México (Mexico).

Hiriart, G., Andaluz, J.I., 2000. Strategies and Economics of Geothermal Power Development in México. World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tahoku, Japan, May 28-June 10.

Huacuz, J.M., 2005. The Road to Green Power in Mexico-reflections on the Prospects for the Large-Scale and Sustainable Implementation of Renewable Energy. Energy Policy 33 (16), 2087-2099.

IMF (International Monetary Fund), 2006. Transcript of a Press Conference by IMF Managing Director Rodrigo de Rato and First Deputy Managing Director Anne O. Krueger with Thomas C. Dawson, Director, External Relations. IMF News, April 20. Washington (USA) (<http://www.imf.org/external/news/default.aspx>, last access 06.11.2006).

INEGI (National Institute of Statistic and Geography and Computer Science), 2002. The Energy Sector of Mexico (Mexico).

- INEGI (National Institute of Statistic and Geography and Computer Science), 2006. Production of Petroleum for Type and Natural Gas (Mexico).
- Krautkraemer, J.A., 1998. Nonrenewable Resource Scarcity. *Journal of Economic Literature* 36, 2065-2107.
- Krichene, N., 2002. World Crude Oil and Natural Gas: A Demand and Supply Model. *Energy Economics* 24 (6), 557-576.
- Krichene N., 2006. A Simultaneous Equations Model for World Crude Oil and Natural Gas Markets, International Monetary Fund (IMF), WP/05/32, p.25.
- Manzini, F. J. I., Martínez M., 1999. Using Final Energies to Plan a Sustainable Future for Mexico. *Energy* 24 (11), 945-958.
- Manzini, F.J.I., Martínez M., 2003. Cost-benefit Analysis of Energy Scenarios for the Mexican Power Sector. *Energy* 28 (10), 979-992.
- Massé P. and Gibrat R., 1957. Application of Linear Programming to Investments in the Electric Power Industry. *Management Science* 3 (1), 149-166.
- Monteforte, R., 1991. The Organization of the Mexican Electric Sector: International context of change. Documents of Analysis and Prospective, PUE, UNAM, p. 89. (Mexico).
- Murphy, F.H., Smeers, Y., 2002. Generation Capacity Expansion in Imperfectly Competitive Restructured Electricity Markets, Center for Operations Research and Econometrics, CORE, University Catholique de Louvain, Discussion Papers.
- Nakata, T., 2002. Analysis of the Impacts of Nuclear Phase-Out on Energy Systems in Japan. *Energy* 27 (4), 363-377.
- Nakata, T., 2004. Energy-Economic Models and the Environment. *Progress in Energy and Combustion Science* 30 (4), 417-475.
- NEI (Nuclear Energy Institute), 2002. The Outlook Nuclear for Energy in to Competitive Electricity Business.
- NEI (Nuclear Energy Institute), 2006. America's New For Nuclear Energy, Walter Hill Nuclear Energy Institute, AGMA/ABMA Annual Meeting, March 3, 2006.
- NERI (Nuclear Energy Institute), 2002. Nuclear Energy Research Initiative, Report Annual, p. 137.
- PEMEX (Mexican Petroleum Agency), 1990-2004. Proceedings. Operative and Financial Results (Mexico).
- Peterson, T.D., Rose, A.Z., 2006. Reducing Conflicts Between Climate Policy and Energy Policy in the US: The important role of the states. *Energy Policy* 34 (5), 619-631.
- Sener (Secretary of Energy), 2002. Prospective of the Electric Sector 2001-2010 (Mexico).
- Sener (Secretary of Energy), 2004. Natural Gas Prospective 2004-2013 (Mexico).
- Sener (Secretary of Energy), 2005. Energy Statistics: Basic Indicators (Mexico).

- Sener (Secretary of Energy), 2006. Prospective of the Electric Sector 2005-2014 (Mexico).
- Shields, D., 2003. Pemex: An Uncertain Future, Topics of Today. Editorial Planeta (Mexico).
- Subki, I., 1995. Indonesian Requirements for Future Nuclear • Power Plants. Progress in Nuclear Energy 29 (1), 107-114.
- Suzuki, M., 2002. Realization of a Sustainable Society: Zero Emission Approaches. Tokyo: United Nations University, Japan.
- UC (University of Chicago), 2004. The Economic Future Nuclear of Power. A Study Conducted at The University of Chicago.
- US-DE (United States Department of Energy Cooperative Agreement), 2004. Study of Construction Technologies and Schedules, O &M Staffing and Cost, Decommissioning Costs and Fundings Requirements for Advanced Reactor Designs, DE-FC07-03ID 14492 Contract DE-AT01-020NE23476, p. 246.
- Wiser, R., Bolinger, M., 2006. Balancing Cost and Risk: The Treatment of Renewable Energy in Western Utility Resource Plans. The Electricity Journal 19 (1), 48-59.
- WNA (Nuclear Word Association), 2003. Energy for Sustainable Development, Advanced Reactors. September 2003.
- Yañez, C.E., 1973. Diverse Aspects of the Atmospheric Pollution and their Solutions. GEOMIMET 1 (63), 20-22.
- Zamzam, M.J., Hwee, W.K., Kamaruddin, N., 2003. Greener Energy Solutions for a Sustainable Future: Issues and Challenges for Malaysia. Energy Policy 31 (11), 1061-1072.



III.2. LA ENERGÍA NUCLEAR, UNA ALTERNATIVA DE SUSTENTABILIDAD PARA RESOLVER LA DEMANDA ELECTRICA EN MÉXICO.

(PRIMERA PARTE)

S. D. Bazán-Perkins
División de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería
E-mail: bazanperkins@hotmail.com

(recibido: enero de 2004; aceptado: diciembre de 2004)

Resumen

En la actualidad es importante plantear un cambio en la política energética de México. Ante los nuevos escenarios energéticos no es viable continuar con la generación de energía eléctrica basándose en el consumo de los combustibles fósiles, como actualmente está programada. Hacia finales de la primera década del siglo XXI, las posibilidades de generación masiva de electricidad con reservas domesticas de gas, petróleo y carbón, serán casi nulas. Adicionalmente, las erogaciones hacia los sistemas de generación eléctrica con equipos obsoletos implican gastos onerosos que frenan el crecimiento del país. La política energética de México, orientada a intensificar la generación de electricidad basándose en el gas natural y carbón mineral de importación, propicia la dependencia energética externa y fuga de divisas. En este sentido, la energía nuclear conjuntamente con las fuentes de energía renovables, podrían sustentar la autonomía energética nacional, al ser más rentable, además de propiciar otros beneficios como la conservación ambiental. El objetivo principal de este trabajo es proponer la diversificación en el consumo de energéticos del país con nuevas fuentes de abastecimiento basadas en la energía nuclear así como fuentes renovables como la producción del hidrógeno, para resolver la demanda de energía eléctrica que se necesita en las próximas décadas.

Palabras Clave: electricidad, sustentable, hidrocarburos, gas natural, petróleo, carbón mineral, uranio, nuclear, renovable, eólica, hídrica, hidrógeno.

Abstract

A major change in the energy policies in México has becoming necessary. Because the consumption of fossil fuels is expensive and not renewable, new energy settings are indispensable for electricity generation. At the end of 21st century first decade, there are few possibilities of massive electricity generation coming from domestic reserves of gas, petroleum and coal. Additionally, the outdated systems of electric energy generation have high operating costs that reduce the growth of the country. The Mexican energy policies are oriented to intensify the electricity generation based on natural gas and mineral coal importation. It produces external energy dependence and a leak of currencies. In this sense, nuclear energy jointly with the renewable energy sources could support the national energy autonomy because is most profitable, furthermore to promote other benefits as the environmental conservation. The aim of this paper is to propose the diversification in the energy consumption of México using new sources of nuclear energy and the renewable sources of energy as hydrogen production, to resolve the demand of electric energy that is required in the next decades.

Keywords: electricity, sustainable, hydrocarbons, natural gas, petroleum, mineral coal, uranium, nuclear, renewable, aeolian, water, biomass, geothermal, hydrogen.

INTRODUCCIÓN

Esta exposición presenta un análisis retrospectivo de los servicios y fuentes energéticas aprovechables en beneficio del hombre. Para este propósito, se consultaron diversas aportaciones científicas, informes técnicos, así como de comunicación personal relacionados con el tema, siguiendo la metodología de confrontación de datos de la experiencia mundial.

La experiencia del autor, también contribuyó para realizar el análisis propuesto, sin pretender que sea exhaustivo ni determinante en su evaluación, sino más bien congruente para su divulgación. Los planteamientos sobre las fuentes de energía discutidas para México, en particular la nucleoelectrica, representan la posibilidad para su implementación y desarrollo, como una propuesta concreta.

El concepto de desarrollo sostenible surgió a finales de los 80's, en el informe Brundtland como: "un desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades" (Brundtland, 1987). En un sentido amplio, interrelaciona los aspectos económicos, sociales y ecológicos; abogando por la ética de protección al ambiente y sus recursos naturales, para la realización de los seres humanos.

En consecuencia, esta nota centra su atención en una generación eléctrica sustentable para México. Al hacer hincapié en la seguridad de suministro, al menor costo, mediante tecnologías limpias que propicien el mayor progreso económico y social, en un marco de alta competitividad comercial.

Al fomentar el desarrollo de las tecnologías de generación eléctrica más avanzadas, se propicia mayor riqueza y fuerza de trabajo más capacitada, de niveles educativos superiores y mejores condiciones de vida. En contraste, a medida en que se emplean fuentes de generación que requieren mayor empleo de la energía humana se decremента la productividad y calidad de vida (Bardwell, 1981).

PERSPECTIVAS ENERGETICAS

La electricidad es el principal insumo para el crecimiento económico de las sociedades actuales, al permitir la producción de alimentos, medicinas, abrigo, sistemas de comunicación, el sostén del comercio y la industria. La estructura económica del país se apoya en el sector eléctrico y determina un factor esencial en las condiciones de vida actual.

México es afortunado en contar con amplia gama de recursos energéticos, como son: petróleo, carbón mineral, gas natural, uranio y la energía renovable comprendida por la hídrica, eólica, solar, geotérmica y biomasa principalmente. Representan un conjunto de opciones de desarrollo tecnológico y de mercado. Su diversificación permite su reemplazo ante imponderables eventuales, evitando crisis energéticas y económicas.

La viabilidad del Sistema Eléctrico Nacional requiere de la incorporación continua de innovaciones tecnológicas adaptables a las condiciones y necesidades del país. Su nivel de competitividad comercial, debe considerar las tendencias de los mercados de energéticos y las políticas globales sobre su desarrollo, proyectadas a corto, mediano y largo plazo. Se persigue que estas condiciones cubran en forma eficiente la demanda de electricidad al menor costo y generen la mayor prosperidad social y ambiental.

La estrecha afinidad con la evolución logística mundial de los energéticos, incluyendo los cambios tecnológicos, de mercados y políticas de empleo, no quiere decir que los proyectos energéticos de México se deban ajustar a un programa global definido. Aunque conviene, tal condición no es absolutamente esencial. De hecho, existen casos de nuevas líneas de desarrollo tecnológico que aun no están muy difundidas, para el mejor aprovechamiento de los recursos energéticos y que cubren con

mejor calidad la demanda de electricidad. También, se puede acudir a nuevas fuentes de energía para ser incorporadas por primera vez.

INGENIERÍA Investigación y Tecnología VI. 3. 187-205, 2005

Se advierte que en la próxima década, no existe un plan para incorporar al Sistema Eléctrico Nacional nuevas instalaciones para aprovechar la energía nuclear. Tampoco, se involucra al hidrógeno, dentro de la planeación energética del país, según la Prospectiva del Sector Eléctrico 2002-2011 y otros programas (Fernández-Zayas, 2003). En cuanto a la energía eólica, su crecimiento será mínimo, al pasar de 3 MW a 104 MW (SENER, 2003). En todas estas alternativas, los argumentos principales serían los altos costos de su generación, en comparación al consumo de las supuestas y enormes reservas domésticas de gas y petróleo, que ya no responden a las expectativas planteadas para la generación eléctrica por medio de los hidrocarburos. Por el contrario, los argumentos expuestos determinan que la energía nuclear, conjuntamente con las renovables, implican una alternativa barata, viable y única para resolver la demanda energética que se espera en las próximas décadas.

Tendencias del Mercado y Avances Tecnológicos en la Generación de Electricidad, de Principio del Siglo XXI.

Desde principios del siglo XXI, resaltan las innovaciones tecnológicas y profundos cambios en el escenario del mercado de los energéticos, que impulsan el empleo de las fuentes de generación renovables, la nuclear y el hidrógeno. En otros casos, existe oposición por las tecnologías de generación eléctrica que deterioran el ambiente y la salud humana. Entre las más contaminantes, por sus efectos globales están los combustibles fósiles (carbón mineral, petróleo y gas) que al quemarse producen gases de efecto invernadero. También, se ha advertido que no todas las fuentes de energía renovable son sustentables y de mercados de "energía verde", como ocurre con las grandes hidroeléctricas y, la eólica cuando se emplea en forma intensiva (tabla 1).

En gas natural, desde los 80's promueve su uso intensivo a nivel global para la generación de electricidad, mediante el sistema de ciclo combinado, por sus ventajas tecnológicas, económicas y ambientales. Sin embargo, a principios del Siglo XXI, el acelerado crecimiento de su demanda resultó ser negativa en los países que no cuentan con reservas suficientes, capacidad de producción, almacenamiento, transporte y suministros del exterior. El efecto inmediato es el desabasto del energético, volatilidad e incrementos de su precio, desequilibrios de mercados e inviabilidad para la generación de electricidad. Estas situaciones obligaron a modificar su política energética, como aconteció en los Estados Unidos.

La Economía de la Energía Eólica.

Desde principios del siglo XXI, la energía eólica destaca como la mayor promesa de las energías renovables para producir electricidad en forma abundante a bajo precio y a corto plazo. Su desarrollo explosivo se debe al aplicar nuevas tecnologías y a la promoción del mercado mediante subsidios de los gobiernos, en este sentido los principales líderes son Alemania, España y Estados Unidos (Gutín, 2001 y 2002).

El crecimiento acelerado de la industria eoloeléctrica se refleja en sus estadísticas, por su mayor competitividad; en el 2001 la producción mundial alcanzó los 24,313 MW de capacidad instalada y en el 2002 fue aún mayor de 30,379 MW, representa un incremento de 6,066 MW (24.94%) en un año (Eurobser, 2003). Superior en tres veces al crecimiento de la industria nucleoeleéctrica, de 1,748 MW, en el 2000. Así, por ejemplo, de 1995 a 2001 la generación eoloeléctrica crece 487% y en el mismo periodo el empleo de las carboeléctricas decrece 9% (REW, 2002a). Durante el 2002, la Unión Europea alcanzó una capacidad de 22,331 MW, un 30.4% más que el año anterior. En la India se alcanzó 1,702 MW es decir 12.90% más que en 2001. En los Estados Unidos, se cuenta con una capacidad de 4,708 MW la cual es 10.90% más que en el 2001 (Eurobser, 2003), obteniendo un costo promedio de generación de 2.5 ¢US/kWh (REW, 2002b).

En el mercado mundial de aerogeneradores, alcanza un alto volumen de ventas las de 600 kW, seguidas de los de 750 kW hasta el 1.5 MW, y los de 50 kW que cada vez son más ligeras y económicas (Ruiz y Garre, 2000).

INGENIERÍA Investigación y Tecnología VI. 3. 187-205, 2005

Los generadores de gran capacidad entre 1 y 2 MW, (clase megavatio), son viables en lugares con grandes espacios y vientos estables. En Alemania se están incorporando los aerogeneradores de 3.5 MW (dewind 9), donde hacia el 2006 se dará un salto a los de 5 MW (Infoenergía 2001a y 2002b).

En México, al 2002 la capacidad instalada es de apenas 3 MW, equivalentes a dos aerogeneradores de clase megavatio de 1.5 MW. Hasta el 2006, entrará en operación la *Central Eólica La Venta II* (Oaxaca), de 83.3 MW que contará con 98 aerogeneradores modelo Gamesa G52-850 kW, con una inversión de 111 millones de dólares y evitando emplear 19.784 Toneladas Equivalentes de Petróleo al año y evitará la emisión de 124.950 toneladas de CO₂/años (IBERDROLA, 2005) . De acuerdo a la SENR (2003), el costo estimado es de 3.0 ¢US/kWh, en una región que cuenta con un potencial para 3000 MW.

Por tanto, y debido a su éxito, en varios países se está intensificando el desarrollo de parques de aerogeneradores con programas nacionales, implicando incentivos de mercado. Sobre todo porque a corto plazo es posible elevar el potencial de generación de electricidad que difícilmente se logra con otras tecnologías. Los avances tecnológicos incrementan el aprovechamiento de las regiones favorables, al cubrir su potencial con menor número de aerogeneradores de mayor capacidad, y menor costo de generación.

La Economía de la Energía Nuclear

La industria nucleoelectrica desde sus inicios, de 1954-56 y durante unas tres décadas, mantuvo un desarrollo y crecimiento sostenido. Sin embargo, a partir de 1986, tuvo un serio revés por causa del accidente de Chernobyl que llevó a frenar totalmente su crecimiento en Europa Occidental y en Estados Unidos, incluyendo el cierre de centrales en ciertos países, como Italia y el cese gradual en Suecia, Bélgica y Alemania. Entre tanto, su expansión cobró gran impulso en los países asiáticos y de la cuenca del Pacífico Oriental, como Japón, Corea, China, Taiwán, India; y de Europa Oriental, como Rusia, Ucrania, Bulgaria, Eslovaquia (CNEA, 2002).

Al inicio del siglo XXI, se presenta un progresivo proceso de revalorización del potencial de la energía nuclear, en donde nuevos países se han sumado para implementar sus bases de desarrollo. Los factores técnicos y económicos que la impulsan son: a) Inestabilidad ante el alza de los precios de los hidrocarburos en general, y en particular del gas natural en los Estados Unidos, Brasil y Argentina. b) Impactos negativos al medio ambiente por los gases de efecto invernadero (principalmente CO₂) por la quema de combustibles fósiles (tabla 1). c) El incremento de la demanda de electricidad por encima del crecimiento de la economía (PIB), en la gran mayoría de los países. d) El creciente interés y compra de centrales nucleares en operación por empresas privadas. e) Avances tecnológicos, mejoramiento en su operación y administración que propician elevar su factor de planta (figura 1). f) El decremento acelerado de los costos de generación de las nuevas nucleoelectricas. h) Las iniciativas del congreso de los Estados Unidos para reiniciar la construcción de plantas nucleares de III generación avanzadas a corto plazo y IV generación a mediano plazo. i) La opción simultanea de obtener otros productos a parte de la generación de electricidad, cómo cogeneración, hidrógeno, así como agua potable mediante la desalinización del agua marina.

Las actuales tecnologías de fisión nuclear de III generación, son resultado de los trabajos de investigación por compañías privadas, institutos de investigación, universidades y gobiernos. En algunos casos, se trabaja sobre tecnologías similares en versiones diferentes, o en proyectos integrados por varios países. Todas estas innovaciones se proyectan en seis características: 1) Mecanismos de alta seguridad y bajo riesgo de accidentes. 2) Competitividad económica por su menor inversión en la construcción, operación, mantenimiento y aumento de vida operativa a 60 años. 3) Empleo de materiales más resistentes y seguros, incluye transportación. 4) Alta seguridad en el manejo de

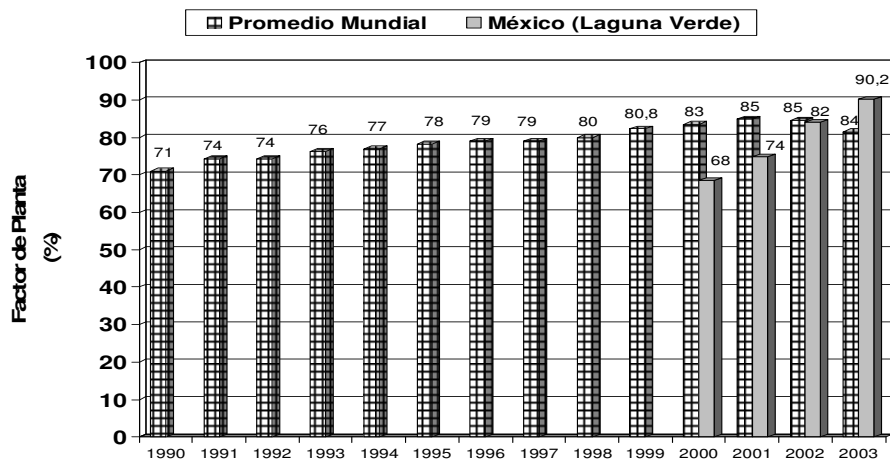
combustibles y sus desechos 5). Mayor eficiencia del reciclamiento de combustibles. 6) Incremento de la eficiencia de las plantas (IAEA a, 2002; WNA, 2003).

INGENIERÍA Investigación y Tecnología VI. 3. 187-205, 2005

Hacia el 2010, iniciarán su construcción diversos modelos de reactores de III generación avanzados (Generación III +). Los más acogidos, en el mercado Europeo para actualizar sus plantas nucleoelectricas es el reactor EPR (European Pressurized Water Reactor) de 1750 MW desarrollado por Francia y Alemania, (Framatome-ANP, 2003). En los Estados Unidos, hacia el 2012 estarán en construcción unos 30 reactores, el de mayor demanda es el Westinghouse AP 1000 de 1100 MW con un costo de generación de 3.5 ¢US/kWh. En Sur África se contempla construir hacia el 2010, de 10 a 14 plantas del Pebble Bed Modular Reactor (PBMR) cada una de 165 MW con costos de generación de 1.6 ¢US/kWh. Los costos de inversión son del orden de 1000-1400 \$US/kW instalado (NEI, 2003 c; WNA, 2003).

Figura 1. Evolución del Factor de Planta Promedio de las Nucleoelectricas de 1990 al 2003.

Se comparan con la planta nuclear de Laguna Verde en México de 2000 al 2003
 [Elaboración propia con datos de IAEA, 2002 y 2003; SENER, 2002 y 2003]



En cuanto a las reservas mundiales probadas de uranio convencional, se estiman en categorías por el costo del concentrado, de ≤ 80 \$US/Kg de U_3O_8 se tienen 3,107,000.0 toneladas y de ≤ 130 \$US/Kg de U_3O_8 se cuenta con 3,933,000 t, distribuidas geográficamente en los cinco continentes. En el 2000, la producción fue de 36,112 t y la demanda de los 438 reactores nucleares comerciales fue de 64,014 t. La diferencia de 27,902 t, se cubre de las reservas obtenidas del desarme nuclear, entre los Estados Unidos y los países de la antigua URSS, desde 1987. En el Convenio de 1993, titulado "Megatones para Megavatios", se acuerda convertir 500 toneladas de uranio enriquecido ruso, en combustible para las centrales nucleares comerciales.

Para el caso de México, de acuerdo a las estadísticas mundiales reportadas por Uranium (2001-2006), se aprecia que desde hace más de dos décadas no figura entre los 38 países que reportan inversión en la exploración de yacimientos de uranio y en la adquisición de tecnología minera para su extracción. Al año 2000, existen 21 países con tecnología para producir combustibles nucleares en sus diferentes fases, que garantizan la estabilidad de su precio en el mercado (WNA, 2000). Como comenta Cohen (1983), las grandes reservas de uranio y los avances tecnológicos llevan a que se tenga suficiente combustible nuclear para cubrir las necesidades de la humanidad por largo tiempo. La energía nuclear, suponiendo que usemos reactores de neutrones rápidos, durará por varios miles de años, es decir, mientras el Sol esté en condiciones de mantener la vida en la Tierra.

El Programa de Energía Atómica 2010, de los Estados Unidos.

Hacia finales del 2001, los Estados Unidos en respuesta al cambio de los escenarios del mercado de energéticos y de los avances tecnológicos, se decide por la energía nuclear como la mejor opción, que impulsa el mayor desarrollo económico en condiciones de sustentabilidad (NEI, 2002c).

INGENIERÍA Investigación y Tecnología VI. 3. 187-205, 2005

Su Programa de Energía Atómica 2010, es un plan energético al 2030. Contempla la entrada en operación comercial, a gran escala, de los reactores nucleares avanzados de III generación (Gen. III+) y de IV generación. Se considera del 2010 al 2020 la entrada en operación comercial de unos 50 reactores nucleares de generación III +; de 1000 MW ó su equivalente, para cubrir 50,000 MW enfriados por agua ligera o vapor, adicionales a los 12,000 MW que se espera incrementar con las actuales plantas. Del año 2015 al 2025, la entrada comercial de reactores nucleares de IV generación que incluye modelos para producir hidrógeno a partir del agua. Finalmente, antes del 2030 se pretende garantizar un mínimo volumen de combustibles nucleares gastados y un menor tiempo de duración, como emisores peligrosos (U.S. Government, 2003; NEI, 2003a y 2003 b).

Para el desarrollo de los reactores de IV generación, se adicionaron varios países que cuentan con tecnologías del ciclo de combustible nuclear, por ser la principal línea de investigación del programa. En julio de 2001, Argentina, Brasil, Canadá, Francia, Japón, Corea del Sur, Sudáfrica, Reino Unido y Estados Unidos firmaron una carta formal, para identificar y desarrollar tecnologías de la IV generación sobre una base multilateral (U.S. Government 2003).

De América Latina, participan Argentina y Brasil, que cuentan con desarrollo tecnológicos avanzados en el campo industrial de explotación, producción, enriquecimiento, reconversión y tratamiento de combustible nuclear, con los que han obtenido sus propias patentes, y participación internacional. En este aspecto, México desde 1984 no cuenta con la infraestructura, experiencia, personal técnico y científico especializado en la industria del ciclo de combustibles nucleares; cuando decidió liquidar a su personal con el cierre de Uranio Mexicano (URAMEX). De esta forma, México se excluyó de un campo de desarrollo tecnológico y científico que incluye todas las ramas de desarrollo profesional, desaprovechando las oportunidades del mercado; debilita sus posibilidades para participar en proyectos internacionales y de licitación de producción de combustibles nucleares para las nuevas tecnologías de reactores nucleares, por lo menos al nivel de Yellow Cake, que es la materia básica.

La Economía de la Energía del Hidrógeno

El hidrógeno, es el elemento más abundante del universo y en estado natural elemental no existe formando depósitos en la Tierra. La tecnología comercial para la producción limpia del hidrógeno se espera obtener a corto y mediano plazo, empleando principalmente la energía nuclear y renovable; ya que la actual forma de producirlo, a partir de combustibles fósiles, resulta costosa y contaminante (figura 2). A largo plazo, será una fuente de energía relevante en la generación de electricidad en diferentes escalas y principal sustituto de los combustibles del parque vehicular a base de hidrocarburos. En países como Alemania, Francia, Islandia, Estados Unidos, España, Inglaterra y Japón, entre otros más, ya cuentan con las primeras estaciones de despacho para que el hidrógeno sea empleado como combustible para el parque vehicular.

Como fuente de desarrollo energético de una nación el hidrógeno está en proceso, para pasar a una realidad. En los Estados Unidos está en marcha el programa que lo llevará de una economía del petróleo a una economía del hidrógeno, en un horizonte de planeación de **40** años (figura 3). Las bases de este programa se describen en la conferencia "National Hydrogen Vision Meeting" de noviembre del 2001.

Dos años después, en el 2003 los gobiernos de Brasil, Canadá, Australia, China, Alemania, Japón, Corea, Noruega, India, Italia, Francia, Islandia, Reino Unido y Estados Unidos crearon el IPHE (International Partnership for the Hydrogen Economy) como mecanismo de colaboración internacional para investigar, incorporar, desarrollar y financiar la producción y empleo del hidrógeno en sus economías (IPHE, 2003).

La economía del hidrógeno se determina en el concepto de fabricación artificial. La materia esencial comúnmente empleada es el gas natural que además obtiene como subproducto CO_2 que afecta el ambiente. El hidrógeno se puede obtener en forma limpia, a partir de la biomasa por pirolisis y del agua mediante electrólisis o por procesos termoquímicos.

INGENIERÍA Investigación y Tecnología VI. 3. 187-205, 2005

Hacia el 2015, se contará en el mercado con la tecnología para la producción del hidrógeno a gran escala, con costos bajos y en forma limpia; a partir del agua mediante procesos termoquímicos, empleando la energía de los reactores nucleares de III + y IV generación de alta temperatura (900°C). En este proceso, el hidrógeno se separa del agua por cracking, por etapas empleando azufre-yodo (NE, 2003). El costo de generación de electricidad empleando el hidrógeno en las celdas de combustible, de 2 ¢ US/kWh, es ya competitivo con la tecnología del gas natural por ciclo combinado, al igual que su eficiencia, procesos de producción y empleo práctico (DOE, 2002a).

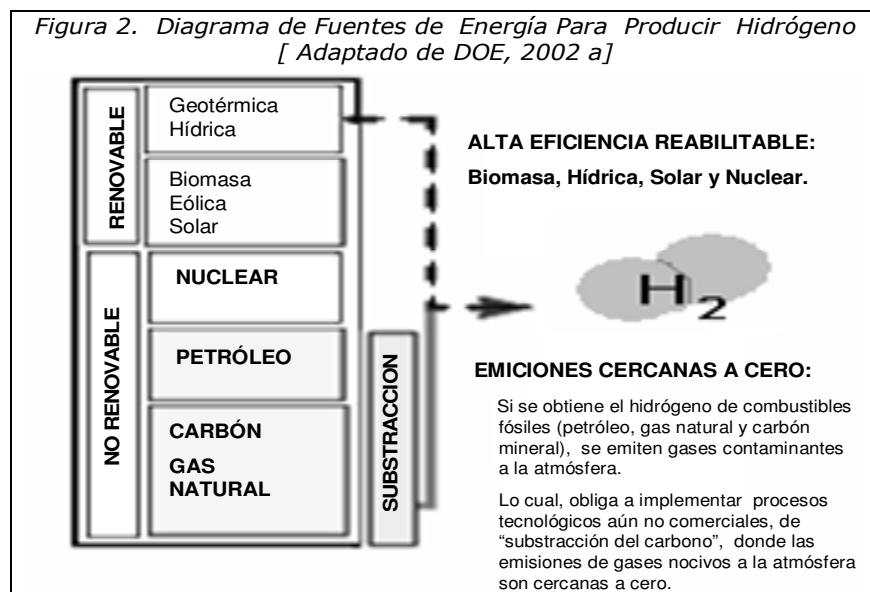
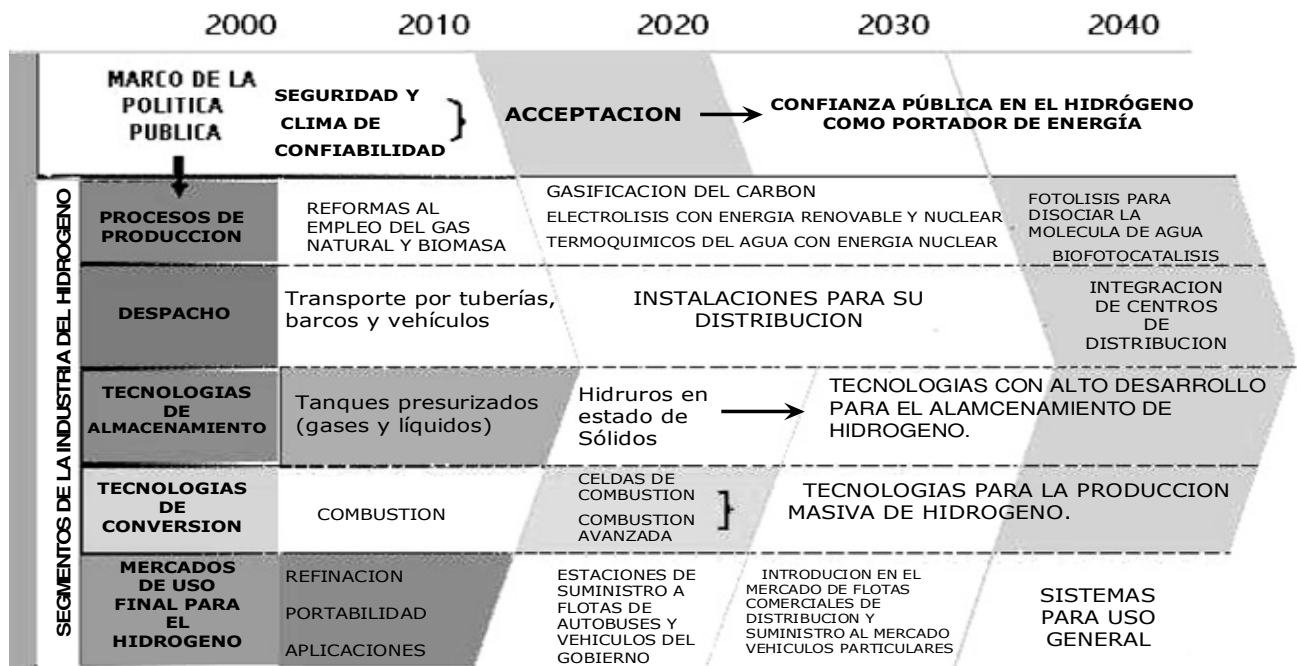


Figura 3. Programa Para la Transición a la Economía del Hidrógeno en Estados Unidos, 2000-2040 [Adaptada de DOE, 2002 a]



INGENIERÍA Investigación y Tecnología VI. 3. 187-205, 2005

FUENTES DE GENERACION ACTUAL

Las Reservas de Petróleo en el Mundo

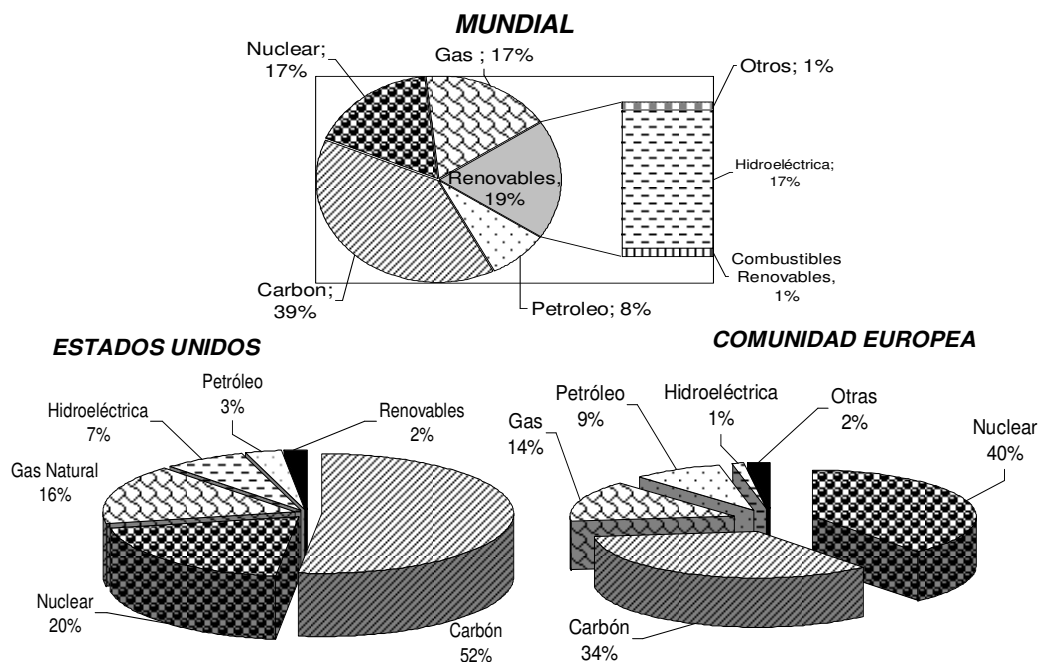
Es oportuno hacer un compendio de las materias energéticas mundiales, para su aprovechamiento en la generación de electricidad, como es el petróleo, gas natural, carbón mineral y uranio. Básicamente, dependiendo de su duración y tecnologías disponibles, se podrá planificar su horizonte de empleo mediante importaciones a través del comercio mundial, aunadas a las reservas domésticas de México; entonces, la pregunta básica sería ¿para cuánto tiempo se tienen a disposición las reservas convencionales de estos energéticos en el mercado global?

Según BP (2003), expone que el total de reservas de petróleo probadas convencionales en el mundo es de 104.7 mil millones de barriles y en la relación de reservas/producción alcanza para 40.6 años. Representa, el limite en que se podrá contar en el mercado internacional petróleo de menor costo de extracción. Considerando lo anterior, el plan de los Estados Unidos es pasar a una economía del hidrogeno hacia el 2040 (figura 3).

Sin embargo, Laherrere (2003) ha establecido otros factores adicionales, tomados de la base de datos de las principales empresas petroleras, como son el efecto de los nuevos desarrollos tecnológicos, ajustes de reservas 5 años después de su descubrimiento y la capacidad de producción de los campos. En suma, define el agotamiento de las reservas de petróleo crudo convencionales hacia el 2030, y las de gas natural en el 2050.

De hecho, el empleo del petróleo crudo en un país industrializado para generar en forma masiva electricidad, resulta un desperdicio económico, porque representa un alto costo. El petróleo tiene un valor agregado mayor en otros sectores económicos. Por ello, en el mundo el consumo de petróleo crudo para generar electricidad ha decrecido, en el 2001 era de un 8% (IEA, 2002), en los Estados Unidos de un 3%, que proyecta al 2020 menos de 1% (U.S. Government, 2001), actualmente en los países de la Comunidad Europea es de apenas 9% (figura 4).

Figura 4. Empleo de las Fuentes de Electricidad a Nivel Mundial, Estados Unidos y la Comunidad Europea, en el 2000 [Elaboración propia con datos de U.S. Government, 2001; IEA 2001 y 2002].



INGENIERÍA Investigación y Tecnología VI. 3. 187-205, 2005

Figura 5. Aportación de Las Fuentes de Energía Para La Generación de Electricidad en México, en 2000 y su Proyección al 2010 [Adaptado de SENER, 2001].

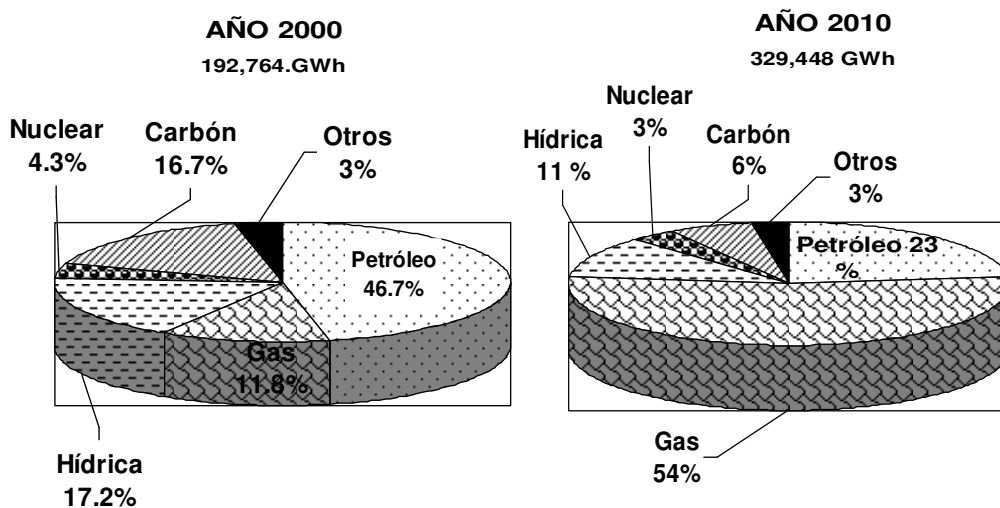


Tabla 1. Niveles de Afectaciones de las Tecnologías de Generación Eléctrica al Ambiente y a la Salud Humana (por Terajulio) [Elaboración propia con datos de APPA, 2002]

| TECNOLOGIA DE GENERACION | CALENTAMIENTO GLOBAL | DISMINUCION DE LA CAPA DE OZONO | SUSTANCIAS CARCINOGENAS | ACIDIFICACION |
|--------------------------|----------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------|
| CARBÓN MINERAL | 55% | 3% | 13% | 48% |
| PETRÓLEO | 22% | 86% | 83% | 47% |
| GAS NATURAL | 22% | 1% | 3% | 5% |

| | | | | |
|----------------|----|----|----|----|
| MINIHIDRAULICA | 0% | 0% | 0% | 0% |
| EOLICA | 1% | 3% | 1% | 0% |
| NUCLEAR | 0% | 7% | 0% | 0% |

En México los derivados del petróleo están entre las principales fuentes de generación de electricidad. De acuerdo con la CFE (2001), al año 2000 el 46.7% de la generación de electricidad se obtuvo del combustible y aceite diésel, no obstante existe un plan en proceso para que hacia el 2010 sea el gas natural la principal fuente de generación, en un 54% (figura 5).

Ante el agotamiento de las reservas mundiales de petróleo convencional hacia el 2030 y los altos precios del gas natural en el mercado, la alternativa para México sería orientar sus esfuerzos hacia una economía del hidrógeno, empleando fuentes de energía renovables y nuclear con tecnologías III+ y IV generación, obtenido del agua y la biomasa. Los argumentos, de esta propuesta se describirán en la segunda parte de este artículo, al considerar que las reservas domésticas probadas de hidrocarburos son bajas, las del carbón mineral son de mala calidad y se cuenta con alto potencial de reservas uraníferas que podrían ser convertibles en reservas probadas a corto plazo.

Existen pues, varias razones para no emplear los derivados del petróleo crudo como principal fuente de generación de electricidad y la producción de hidrógeno, como sus graves afectaciones al ambiente y a la salud. Esto es, que no obstante de un empleo mundial bajo (8%) en la producción de flujo eléctrico, sus consecuencias negativas son impactantes. Produce, el 22% de los gases de efecto invernadero, afecta en el decremento de la capa de ozono en un 86%, genera el 47% en la acidificación de la atmósfera, hidrosfera y suelos. Es el principal responsable, en 83%, de la formación de sustancias carcinógenas que provocan cáncer y aumenta la mortandad (APPA, 2002), (tabla 1).

INGENIERÍA Investigación y Tecnología VI. 3. 187-205, 2005

Las Reservas de Gas Natural en el Mundo

En cuanto al gas natural, para el 2002 las reservas mundiales eran de 5501.5 trillones de pies cúbicos (Tpc) y alcanzaban para 60.7 años. En América del Norte, los Estados Unidos cuentan con 183.5 Tpc, para 9.6 años y con el 3.3% de las reservas mundiales. Canadá cuenta con 60.1 Tpc, para 9.3 años y 1.1% de las mundiales y México tiene 8.8 Tpc, para 7.1 años que representan el 0.2% de las reservas del mundo (BP, 2003).

La Política Energética de Estados Unidos en Cuanto al Gas Natural

En junio de 2003, Greenspan (2003a y b) Presidente de la Reserva General de Estados Unidos, expuso ante el Senado la problemática del mercado del gas natural y sus efectos negativos en la economía de este país. En principio, reconoce que en los 90's se contaba con bajos precios del gas que ayudó a impulsar la economía de los Estados Unidos en particular a las industrias del acero, vidrio, química y fertilizantes, por lo que muchos transformaron sus plantas para un mayor consumo del combustible. Pero, hacia el inicio del presente siglo, la demanda ha superado a la capacidad de oferta y su precio va en ascenso. El precio del combustible es alto, en promedio al primer trimestre del 2003 es de 5.91 \$US/millón de Btu, en los Estados Unidos. En esta situación, señala que: "Si permanecemos en estos niveles muy elevado (precio), nosotros veremos alguna erosión en varias variables macroeconómicas," y el problema no se puede resolver a corto plazo. De tal forma que en el futuro, el energético no volverá a ser un combustible barato.

Evidentemente, la excesiva promoción de empleo del gas natural en los Estados Unidos para la generación de electricidad llevó a desequilibrios en su precio; hacia 1998, dejó de ser el más barato con respecto al mercado de gas de Francia, Alemania y España (IEA, 2002). A partir de un análisis preparado por el gobierno, se determina que con un precio del gas natural de 4.00 \$US/millón de Btu, los inversionistas estarán generando beneficios provechosos y podría continuar construyendo nuevas termoeléctricas a base de gas natural de ciclo combinado. Sin embargo, si su precio supera los 5.00 \$US /millón de Btu no recuperarían la inversión y el costo del capital y se recomienda cancelar la

construcción de nuevas plantas termoeléctricas a base de gas natural y suspender las que están operando (Herman et al., 2001).

En lo que va del 2003, los precios del gas natural se sitúa por arriba de los 5.00 \$US/millón de Btu en el mercado de los Estados Unidos. Esto tiene importantes implicaciones debido a que el 95% de las nuevas plantas termoeléctricas que operan en este país son a base de gas, se están convirtiendo en un sector débil y en un nicho de inversión de oportunidades para ser remplazadas por otras tecnologías más rentables, como nucleoeeléctricas y grandes carboeléctricas.

La Economía del Carbón Mineral en la Generación de Electricidad

En la actualidad, existe una aversión mundial por continuar empleando al carbón mineral como fuente de generación de electricidad, incluso por países que cuentan con grandes reservas de este energético. Es importante pues, conocer las causas que motivan el decremento de su empleo, de una fuente tradicional, de bajo costo de generación, con abundantes reservas y países productores que garantizan estabilidad del precio del energético.

En efecto, la mayor parte de la energía eléctrica del mundo se genera en termoeléctricas alimentadas con carbón, al 2001 aportaron el 39% (figura 4). Sus reservas, se estiman en 984,453 millones de toneladas, suficientes para 204 años con los actuales niveles de producción y consumo. A diferencia del petróleo, gas y uranio, los yacimientos de carbón mineral están distribuidos más equitativamente por todo el orbe. Clasificadas las reservas mundiales por regiones geoeconómicas, se advierte que tres son deficitarias en carbón mineral, como son: Medio Este (0.2%), América Latina (2.2%) y África (5.8%). En contraste, existen grandes concentraciones en Europa y Euroasia con el 36.1%; la Ex Unión Soviética con el 23.4%, Norte América con el 26.1% y, en Asia y Australia con el 29.7% de las reservas mundiales. Los Estados Unidos cuenta con el 25.4% y México menos del 0.1% (BP, 2002 y 2003).

INGENIERÍA Investigación y Tecnología VI. 3. 187-205, 2005

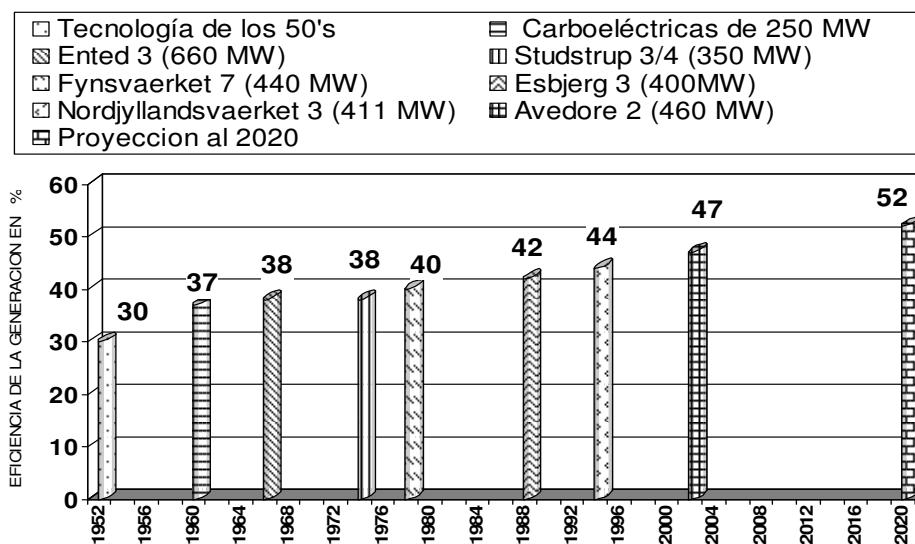
Los Estados Unidos, es el país con las reservas más grandes de carbón mineral, en fajas de cientos de kilómetros de largo, distribuidos en varias provincias, los: Apalaches, Campos Interiores, Las Montañas Rocosas. Además, cuenta con la provincia de carbón bituminoso más extensa y de mejor calidad del mundo de 180,000 Km², siendo el 75% explotables (Dunbar, 1980; Bateman, 1982).

Desde 1998, se aprecia el decremento de la tasa de crecimiento del consumo del carbón mineral para producir electricidad (Echávarri, 2002). La razón se debe al menor desarrollo económico que propicia y sus efectos nocivos a la salud y al ambiente (tabla 1). Existen aún algunos países cuya estructura energética depende en gran medida de ella para la generación de electricidad, como ocurre en Polonia y Sur África que representa el 95%, Australia el 75%, India y China cubre el 70%, Estados Unidos el 52% y Alemania el 51%. Así, por ejemplo China, que posee el 11.6% de las reservas mundiales de carbón mineral que la ubican en tercer lugar, ha decidido no invertir en nuevas carboeléctricas, por ser una tecnología obsoleta de bajo progreso económico, prefiere canalizar sus inversiones a otras tecnologías de generación más avanzadas y de efectos multiplicadores en su economía. En cambio, continuará promoviendo la exportación de carbón mineral por ser una fuente importante de generación de divisas extranjeras y empleos, siendo México uno de sus clientes más recientes (Diario del Pueblo, 2000, 2001a-b).

En efecto, la tecnología de las carboeléctricas es de las más atrasadas y esta tendencia se proyecta en el futuro, con consecuentes limitaciones en el progreso económico y social. Ron Knapp (2001), señaló que al año 2000 el promedio de la eficiencia de las carboeléctricas se ubica entre los 30 y 36 %, es aún baja, si se compara con la tecnología de gas natural a base del ciclo combinado que es del 57%. El lento desarrollo tecnológico de las carboeléctricas se aprecia históricamente. De acuerdo con Luque (2002), en los países de Europa hacia 1952 la eficiencia de las carboeléctricas era cuando más de 30%, en 2002 la más alta de 45% y se proyecta para el 2020 un máximo de 52% (figura 6). Bajo estas condiciones, hacia el 2100 se llegaría a alcanzar un 60% de eficiencia, pero su nivel de emisión de CO₂ sería nocivo y aún alto de 0.578 kgCO₂/kWh.

En síntesis, por su capacidad de generación, la tecnología de menor eficiencia es la del carbón mineral de 23 a 32%, comparadas con las de más desempeño que son las turbinas de gas de 20 a 34%, seguidas de las con base de aceite diésel de 32 a 40% y la del ciclo combinado a base de gas de 50 a 57%, y aún más eficientes son las pilas de combustible con base al hidrógeno de 50 a 70% (AENE 2001). En consecuencia, el término "tecnologías del uso limpio del carbón" que se empezó a utilizar en los 80's para describir una nueva generación de tecnologías avanzadas de producción de electricidad, a partir del carbón mineral, y que aún se sigue aplicando, es un "augurio prometedor que en la práctica no tuvo efecto." (González-Blas, 2002).

Figura 6. Evolución Tecnológica de las Carboeléctricas en la Unión Europea de 1952 al 2001 y su Proyección al 2020 [Elaboración propia con datos de Luque Cabal, 2002].



INGENIERÍA Investigación y Tecnología VI. 3. 187-205, 2005

Comparación de Costos de Generación por Tecnología Empleada

En los Estados Unidos las termoeléctricas con base en la energía nuclear y carbón mineral promedian desde hace varias décadas costos de generación (operación, mantenimiento y combustible) menores al de las que utilizan el petróleo y el gas como combustible, de estas cuatro tecnologías a partir de 1999 la nuclear es la de menor costo (NEI, 2001). En efecto, al 2001 los costos de generación con base al gas eran de unos 5.69 ¢US/kWh, las de petróleo de 5.28 ¢US/kWh, carbón de 1.79 ¢US/kWh y nuclear de 1.76 ¢US/kWh, siendo la energía nuclear la más competitiva, después de las grandes hidroeléctricas con costo de 1.2 ¢US/kWh (NEI, 2003a).

Actualmente, los costos de inversión típicos en plantas nucleoelectricas nuevas se encuentran entre los 1000-1400 \$US/Kw instalado (NEI, 2003c; WNA, 2003). Dicho valor es aún alto al contrastarlo con los 500-600 \$US/kW que requieren las de ciclo combinado a base de gas. En consecuencia, para promover la inversión en plantas nucleoelectricas nuevas el gobierno de los Estados Unidos apoya su financiamiento hasta en un 50%.

Adicionalmente, los costos de generación de las plantas nucleares de reciente instalación han tenido un rápido descenso, de 1996 al 2003 pasaron de los 7.1 ¢US/kWh a un 3.3 ¢US/kWh. Se proyecta, que hacia el 2010 los reactores de III + generación tendrán costos entre 1.6 a 3.5 ¢US/kWh. Entre tanto, hacia el 2015 los de IV generación entrarán al mercado con costos por debajo de los 3 ¢US/kWh. Esto se ilustra en la figura 7, donde se comparan el costo de generación de algunos modelos de plantas de III, III+ y IV generación y se observa la tendencia del decremento de sus costos. El Pebble Bed Modular Reactor (PBMR) es el de menor costo (1.5 a 1.7 ¢ US/kWh). Con base a estos resultados, para el caso de México, el PBMR podría ser una alternativa tecnológica de generación de electricidad a corto plazo, debido a su bajo costo de generación, alta seguridad, simplicidad de construcción mediante módulos, y reducido tiempo de construcción (24 meses).

En suma, al 2003 los costos totales nivelados de las plantas nucleoelectricas de III generaci3n estarían entre los 3.2 y 3.7 ¢US/kWh; en México estos costos son equiparables a los de las nuevas plantas de ciclo combinado a base de gas del orden de 2.5 y 3.6 ¢US/kWh (figuras 7 y 8). Adem1s, la viabilidad econ3mica de las nucleoelectricas se favorece por su mayor factor de planta, alcanzan un 92% mientras que las de ciclo combinado es de 80%. En estas condiciones, por ejemplo, si ambas tecnologías participaran con costos similares la de mayor factor de planta sería la m1s viable, es decir la nucleoelectrica.

Al contrario de lo que acontece con otras tecnologías, la viabilidad de las termoeléctricas que emplean el gas como combustible son muy sensibles a los cambios del precio de su combustible, al representar el 70% del total (NEI, 2002). Entre tanto, seg1n GE (2000), para el caso de las nucleoelectricas los costos de inversi3n representan el 70%, operaci3n y mantenimiento el 15% y los combustible un 15%. Para los reactores de neutrones r1pidos el costo del combustible es de menos del 1% (Cohen Bernard, 2002). Por todo lo anterior, en las plantas nucleoelectricas una fuerte alza del precio de su combustible tendría menor impacto. Entre tanto, en los mercados con precios ascendentes de gas natural, como ocurre recientemente en Estados Unidos, México, Brasil, Argentina y otros países, las plantas de ciclo combinado a base de gas pierden competitividad.

El primer reactor de III generaci3n comercial, el Advanced Boiling Water Reactor (ABWR) se construy3 en Jap3n, inici3 su operaci3n en 1996 con costos de unos 7.1 ¢US/kWh hacia el 2003 se situ3 en 3.68 ¢US/kWh (WNA, 2003). En general, el decremento de los costos de generaci3n de las plantas nucleoelectricas se favorece en aquellos países que compensan los altos costos de su inversi3n mediante depreciaci3n acelerada (IAEA b, 2002). Así, en los Estados Unidos sus centrales nucleoelectricas, la mayoría construidos en los 70's, promediaron para el 2001 costos de 1.76 ¢US/kWh (NEI, 2003a). Por ser instalaciones m1s amortizadas compiten con ventaja. Recientemente, los Estados Unidos para impulsar las inversiones en nuevas plantas nucleoelectricas otorga una depreciaci3n m1s acelerada, al pasar de los 15 a 7 ańos.

INGENIERÍA Investigaci3n y Tecnología VI. 3. 187-205, 2005

Figura 7. Costos de Generación de Reactores Nucleares Nuevos, de 1996 al 2003 y su Proyección al 2020 [Elaboración propia con base a 6 referencias bibliográficas] costo de capital de 7-10% y horizonte de planeación a 30 años

- European Pressurized Reactor (EPR):1495 MW
- ▣ Gas Turbine-Modular High Temperature Reactor (GT-MHR):288 MW
- ▤ Advanced CANDU Reactor (ACR-700): 730 MW
- ▥ Advanced Pressurized Water Reactor 1000 (AP 1000):1100 MW
- ▦ Advanced Boiling Water Reactor (ABWR):1300 MW
- ▧ European Fast Reactor (EFR):1500 MW
- ▨ International Reactor Innovative and Secure (IRIS): 335 MW
- ▩ Advanced Pressurized Water Reactor Plus (APWR):1100 MW
- Pebble Bed Modular Reactor (PBMR):165 MW
- ▬ Advanced Ligth Water Reactor (ALWR):1000 MW

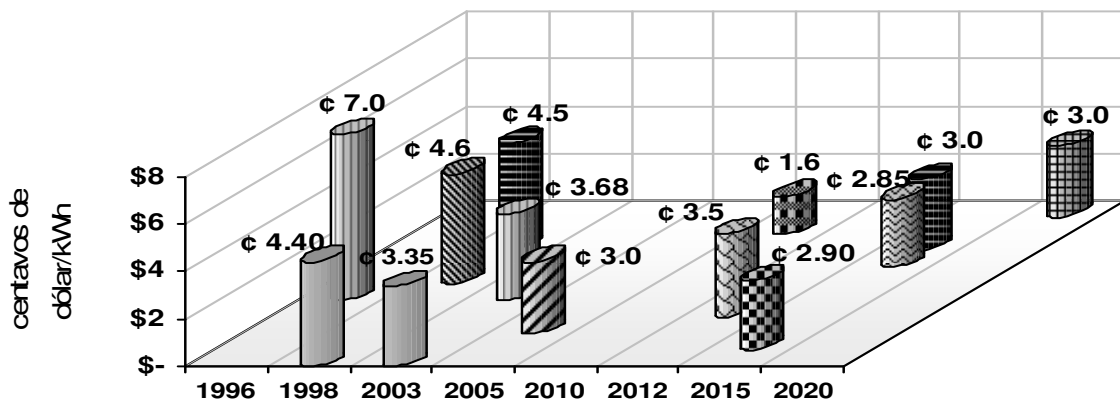
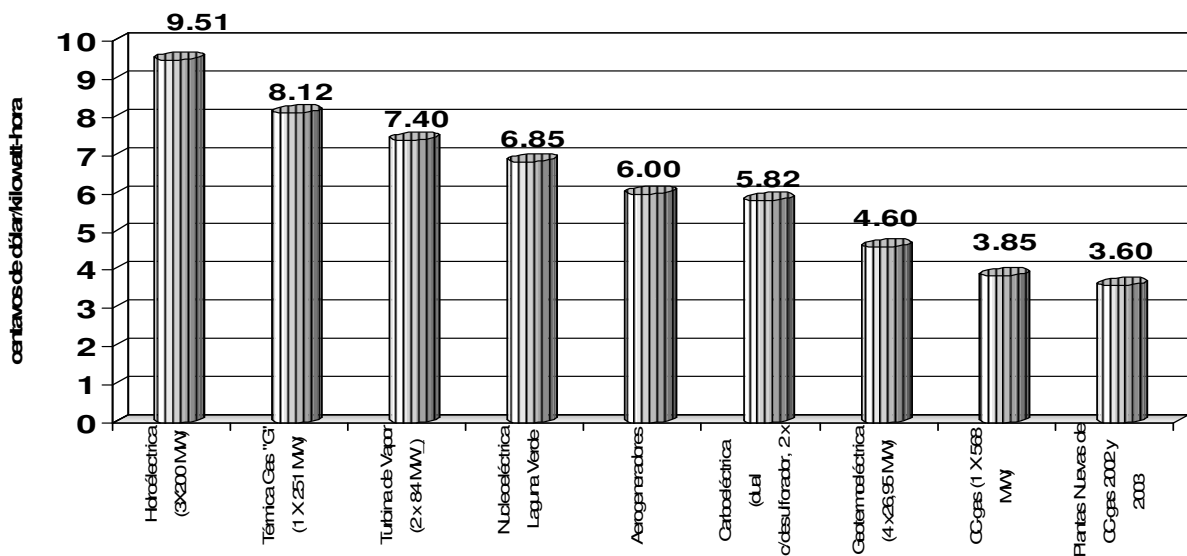


Figura 8. Costos de Generación de Electricidad en México, al 2003 [Elaboración propia con datos de COPAR 2003 y SENER, 2003]

Plantas nuevas de ciclo combinado (CC-gas) de 2.5 a 3.6 ¢ US/kWh



EFFECTOS NOCIVOS AL AMBIENTE

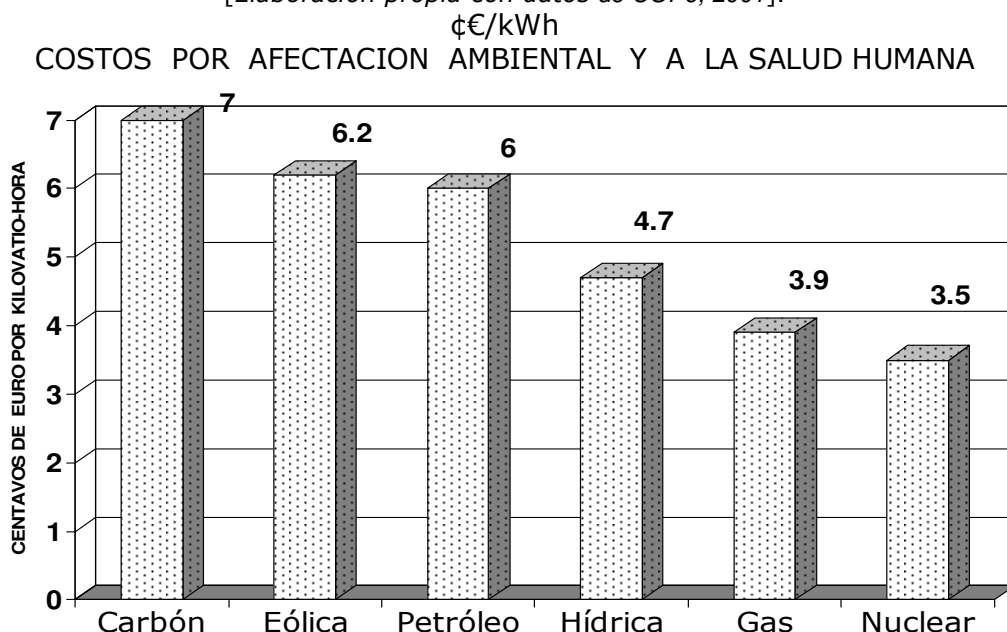
Efectos a la Salud y al Ambiente de las Fuentes de Generación de Electricidad

La electricidad, que es un servicio básico para mejorar la calidad de vida del ser humano, en su proceso de generación provoca una serie de trastornos negativos al ambiente y a la salud humana; tales como: enfermedades, accidentes, reubicación de asentamientos humanos, muertes prematuras y daños a los ecosistemas, al suelo, al agua y al aire. Todo esto, debido al calentamiento global, adelgazamiento de la capa de ozono, acidificación, intrusión visual, deforestación, degradación de las aguas, cenizas, radiaciones ionizantes, residuos industriales y radiactivos, contaminación por metales pesados, sustancias carcinógenos y niebla tóxica (COP 6 bis, 2001; APPA, 2002).

Antes, se desconocía el efecto y costo total de estas afectaciones, desde la prospección del recurso energético hasta la generación de electricidad, cierre, desmantelamiento y saneamiento de la planta. A mediados del 2001, a partir de once años de investigación en 15 países de la Comunidad Europea y los Estados Unidos, se publicaron los resultados obtenidos del Proyecto Externe EE.UU.-CE (2000-2001), que definen por primera vez los costos de las externalidades de las tecnologías de generación de electricidad. Los resultados generales, determinan altos costos ambientales para las tecnologías del carbón mineral, eólica y petróleo (figura 9).

Sin este criterio, casi todos los proyectos de generación de electricidad altamente nocivos al ambiente se aprueban como viables. Se contempla que en el futuro cada país se le responsabilizará con un costo a sus productos, de las consecuencias negativas de su política energética, que atenta contra la salud de la población mundial. En efecto, los aspectos ambientales son un factor determinante en la elección de las fuentes de energía de cada país, repercute en las relaciones bilaterales y conlleva en algunos casos a requerir la modificación o descalificar proyectos de infraestructura energética de otras naciones, a fin de aminorar las afectaciones de sus plantas generadoras de electricidad, en solidaridad.

Figura 9. Proyecto Externe EE.UU.- CE, 2000-2001
Costo de las Externalidades de la Generación de Electricidad por Tecnología Empleada
[Elaboración propia con datos de COP6, 2001].



prospección → explotación → generación de electricidad → cierre → desmantelamiento → saneamiento

Figura 10. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, por Tecnología Empleada en la Generación Eléctrica al 2000, rangos de variación [Elaboración propia con datos de Spadaro et. al, 2000] .

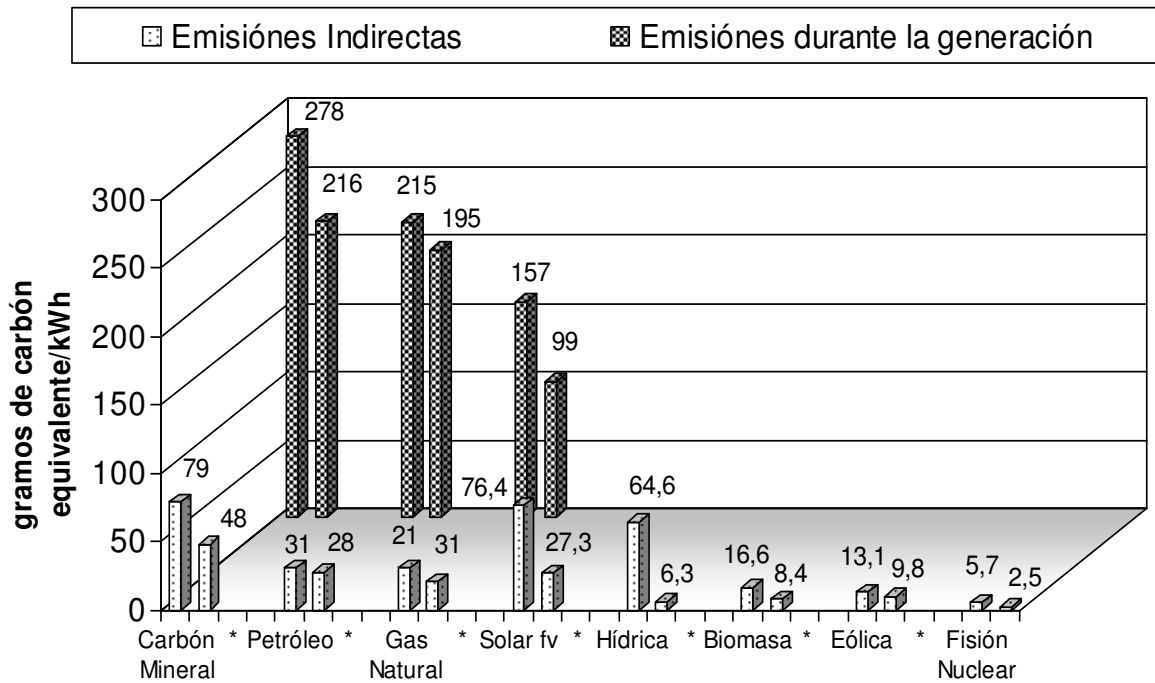
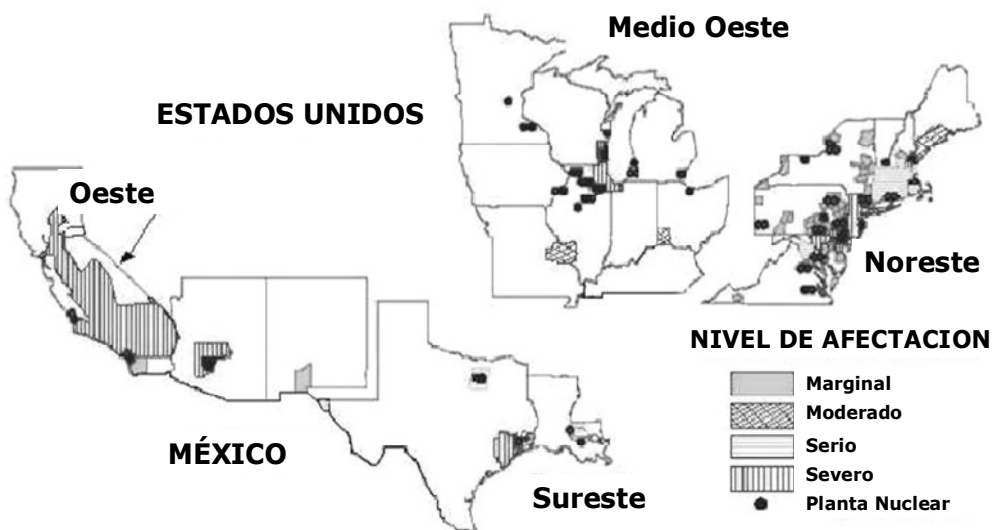


Figura 11. El Programa de Energía Atómica 2010 de los Estados Unidos , Ayudará al Decremento de la Contaminación del Aire por Ozono Superficial, la Región Oeste Requiere un Mayor Número de Planta Nucleoeléctricas [Adaptado de NEI, 2003 a].

La exposición al ozono superficial, propicia importantes problemas a la salud y al ambiente, como asma, infecciones respiratorias y problemas de aprendizaje. Inhibe el crecimiento de la biosfera y el rendimiento de las cosechas. También, degrada los materiales y estructuras de construcción. El ozono superficial, se produce cuando los óxidos de nitrógeno, aportados por las termoeléctricas que queman combustibles fósiles, reaccionan con compuestos orgánicos en presencia de luz solar.



En el caso de México, las carboeléctricas del noreste del país al 2003 se encontraban entre las de menor costo de generación (figura 8). Sin embargo, sus sistemas anticontaminantes son insuficientes, según Rincón y Emerson (2000) y Sage (2000) contribuyen en la formación de la neblina tóxica que afecta a las cuencas atmosféricas de Big Bend, Sunland Park, El Paso y Ciudad Juárez. Con los consecuentes secuelas de reclamos ambientales de Estados Unidos hacia México. Las Naciones Unidas (ONU, 1998), proponen desvincular los beneficios económicos por no cumplir las normas ambientales adecuadas en los países en desarrollo, mediante impuestos ambientales y transferencia de tecnologías ecológicamente racionales. En este sentido, la experiencia obtenida señala que mediante asociaciones comerciales se obtienen espectaculares incrementos de capacidad de tecnología sustentable en los países en desarrollo.

Actualmente, las normas ambientales en Estados Unidos, por arriba de las normas internacionales, han detenido la explotación de los grandes campos de gas natural ubicados en las regiones federales (Refugio Nacional Ártica, De Fauna en Colorado, Utah, Nuevo México y Golfo de México). También ha restringido la autorización de obras civiles para el almacenamiento de gas licuado en puertos, por su alta peligrosidad (Greenspan, 2003 a y b). A su vez, el programa de Energía Atómica 2010, de Estados Unidos, favorece la construcción de nuevas plantas nucleares hacia las regiones más contaminadas de este país, a fin de mejorar sus condiciones ambientales (NEI 2003a). El estado de California, es la región que presenta el mayor nivel de contaminación del aire por ozono superficial y con altas necesidades para que se incremente la generación eléctrica de cero emisiones, como sería la energía nuclear y las renovables, como sustitutos de las termoeléctricas a base de combustibles fósiles (figuras 9, 10, 11 y tabla 1).

Las plantas nucleares, además de no generar gases de efecto invernadero, las áreas en su entorno se convierten en zonas de preservación ecológica mucho más controlada y continuamente mejorada. Han restituido la calidad del agua de su entorno contaminados por otras industrias. Propician nuevas zonas de recreación y de ecoturismo, evitan el tráfico de especies y las actividades que provocan disturbios ecológicos. Participan en estudios técnicos y culturales, y ayudan a reintroducir especies extintas en la región, o en vías de extinción (NEI, 2002c). Entre los medios tecnológicos conocidos en la actualidad, la energía nuclear contribuye a la perseveración del ambiente y a la salud humana en una medida mucho mayor que las energías renovables, tanto en lo que respecta al costo de sus externalidades (Figura 9), como el volumen de emisiones de efecto invernadero aportadas directa e indirectamente.

Disposición de los Desechos Radiactivos

La mayoría de los países que cuentan con plantas nucleoeeléctricas, ocupan los combustibles nucleares una vez, para su posterior almacenamiento en cilindros de acero, cercas de las plantas, como es el caso de los Estados Unidos, España y México. Otros países, como Francia, Inglaterra, Suiza y Japón, recuperan y procesan el uranio y el plutonio de los combustibles gastados, lo utilizan para hacer nuevo combustible y transmutan los inaprovechables a otros de menor vida de toxicidad, reduciendo de esta forma el almacenamiento.

En el futuro se pretende obtener un costo bajo en el procesamiento de los combustibles gastados y contar con un mayor número de reactores de neutrones rápidos en el mercado. En consecuencia, al intensificar estas dos líneas de desarrollo se modificaría radicalmente el paradigma de la generación de energía. Al reducir en gran medida, tanto la explotación de las materias energéticas primarias mundiales (carbón, petróleo, gas, uranio y biomasa) como los inventarios de los combustibles nucleares gastados.

En este sentido, los reactores nucleares de IV generación, que entrarán al mercado del 2015 al 2025, incluyen, en tres de sus seis modelos básicos, a reactores comerciales de neutrones rápidos (fast reactor), diseñados para consumir el plutonio y uranio agotado y transmutar los tóxicos, producido por otras centrales nucleares. De esta forma, se pretende resolver la principal preocupación del empleo de la generación nuclear, concerniente a la proliferación y al volumen de residuos que esta industria produce (DOE, 2002b y 2003), (figura 12).

Figura 12. Decremento del Combustible Nuclear Gastado Almacenados en el Mundo al Integrar Sistemas de Reactores Rápidos y de Agua Ligera Proyección al 2100 [Adaptado de DOE, 2002]



Conclusiones y Recomendaciones (Primera Parte)

- [1] Del conjunto de oportunidades de generación de electricidad disponibles en México, la basadas en la energía nuclear en conjunción con las renovables, podría ser la opción más viable; conforme a los nuevos avances tecnológicos y de mercado de los energéticos, analizados en perspectiva global y nacional. Su desarrollo en el país requiere de un cambio radical en la forma de pensar, un reto para asumir tecnologías más avanzada que requieren de miles de profesionistas y técnicos calificados en todas las áreas. Representa, en síntesis, la mejor forma de impulsar un gran número de actividades tecnológicas, de mercado, comercial, bursátil y desarrollo de centros de investigación en el país.
- [2] El emplazamiento del desarrollo de la energía nuclear repercute en México en el limitado y lento desarrollo de las fuentes de energía renovables. Se trata de una estrategia porque al integrarlas, se compensan los altos costos de las renovables con los bajos costos de la nuclear. Con ambas tecnologías se podría producir combustibles avanzados para el transporte vehicular, el hidrogeno y la biogasolina. En sí, por su alto factor de disponibilidad la energía nuclear puede respaldar a las renovables dependientes de la climatología y producir agua potable comercial para el sector doméstico, agrícola e industrial.
- [3] Por consecuencia, la tecnología nuclear en conjunción con las renovables podría cubrir la demanda de electricidad en México en forma eficiente y producir excedentes para su exportación en forma masiva y competitiva, como fuente importante de ingresos del país. Lo anterior se puede mediante acuerdos bilaterales con Estados Unidos y Centro América para suplir la energía eléctrica generada por procesos contaminantes en la región fronteriza, por la generación limpia. En consecuencia, la oportunidad que tiene México, de convertirse en gran abastecedor de electricidad, agua potable e hidrogeno al estado de California sería mediante el desarrollo de la energía nuclear.
- [4] La actual política energética, apostada en el gas natural para generar electricidad está en el umbral de la inviabilidad. Esto se debe, a la volatilidad y alto precio del gas natural en el mercado, que cada vez más supera los 5.00 \$US/millón de Btu, a partir de la cual las plantas de ciclo combinado pierden competitividad, según Herman et al., 2001. También por las bajas reservas domésticas de gas natural y petróleo, incluyendo sus afectaciones ambientales que provocan en la producción de electricidad.

- [5] Es necesario, por tanto, iniciar a corto plazo en México un programa para la construcción de centrales nucleares de III + y IV generación, cuyos primeros modelos entrarán en operación comercial hacia el 2010 y 2015, respectivamente. Este plan sería transformar la actual economía petrolizada a una economía del hidrógeno hacia el 2030, básicamente en sustitución de los actuales combustibles por el hidrógeno para el transporte automovilístico. Ahora la ventaja será que México puede empezar con tecnología de punta, lo que significa un gran ahorro económico y tiempo, el mercado tiene por fortuna a disposición reactores de diseño avanzado modulares para construir en seis años; dos años de planificación y cuatro años de obra de construcción, para 60 años de operación en condiciones de inversión competitiva. De estos nuevos desarrollos el Pebble Bed Modular Reactor (PBMR) con costo de un 1.6 ¢ US/kWh podría ser la mejor opción tecnológica para México.
- [6] Con base a la experiencia internacional, el carbón mineral para la generación de electricidad implica bajo progreso económico con mayor daño al ambiente y a la salud humana. Se trata de una tecnología deficiente de evoluciona lenta que no promueve mayor desarrollo tecnológico, en comparación con otras tecnologías de generación de electricidad. La internacionalización de los costos ambientales (externalidades) implica que al intensificar su empleo se incrementará el arancel por las afectaciones que genera y al mismo tiempo se le resta al país la oportunidad de exportar un flujo de electricidad limpia. Su excesivo empleo trasciende las fronteras e influye a nivel planetario en el efecto invernadero y consecuente cambio climático; como ya son reclamos fronterizos de los Estados Unidos a México, por supuestas afectaciones ambientales de las carboeléctricas del noreste del país, en la región de Big Bend, Texas.
- [7] Finalmente, las altas inversiones que requiere la etapa de construcción de centrales nucleares e hidroeléctricas, podrán ser administradas por el estado, a partir de un financiamiento de emisiones para ser ofrecidas en el mercado.

Referencias (Primera Parte)

- [1] AENE (2001). Generación Distribuida, más Económico, más Limpio, más Seguro, Jorandas Internacionales de Energía Eléctrica, Octubre, Colombia.
- [2] APPA (2002). Impactos Ambientales de la Producción de Electricidad, Análisis de Ciclo de Vida de Ocho Tecnologías de Generación Eléctrica, Asociación de Productores de Energías Renovables, España.
- [3] Bardwell S. (1981). El Modelo Económico La Rouche-Riemann, Revista bimestral Fusión, Vol. 1, No. 1, Enero 1981, USA, pp. 42-55, ISSN 0272-1147
- [4] Bateman A. M. (1982). Yacimientos Minerales de Rendimiento Económico, Editorial Omega, Sexta Edición, pp. 75.
- [5] BP (2001, 2002 y 2003). Statical Review of World Energy, 1965 to 2000, 1965 to 2001, 1965 to 2002.
- [6] Brundtland G. H. (1987). Our Common Future: From One Earth to One World. New York, Oxford University Press.
- [7] CFE (2002). CFE: Retos 2002-2011, Hacia Una Empresa de Clase Mundial, México.
- [8] CNEA (2002). La Política Nuclear Argentina, Atucha II, Argentina.
- [9] Cohen B. L. (1983). Breeder Reactors: A Renewable Energy Source, American Journal of Physics, vol. 51, (1).
- [10] COP 6 bis (2001). La Energía Nuclear en la Cumbre del Cambio Climático, Foro Nuclear, España, pp. 17.
- [11] COPAR (2003). De Generación, cuadro A.1, Gobierno pp. 21. México.
- [12] Diario del Pueblo (2000). Viraje favorable en las Ramas Clave de la Economía, 2000, 3, Agosto, 1 de Enero del 2001, 10:32(Gmt+8), China.
- [13] Diario del Pueblo (2001a, 2001b). Economía China Crece Ocho por Ciento el año 2000 y China Establece récord de exportación de Carbón, 1/Enero/2001, 10:32(Gmt+8), 10:32(Gmt+8), China.
- [14] DOE (2002a). A National Vision of America's Transition To a Hydrogen Economy, Department of Energy U.S., pp. 27.
- [15] DOE (2002b). A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, Committee and the Generation IV International Forum, GIF-002-00, Department of Energy U.S.
- [16] DOE (2003). Report to Congress on: Advanced Fuel Cycle Initiative: "The Future Path for Advances Spent", Department of Energy U.S., pp. 45.
- [17] Dunbar C. O. (1980). Geología Histórica, Editorial Continental, México, pp. 556.
- [18] Echavarrí L. E. (2002). Nuclear Energy and Sustainable Development in the OECD, Nuclear Energy Agency, Director-General, Winter Seminar, 19 February, 2002.
- [19] Eurober (2003). Wind Energy Barometer, Le Baromètre de L' éolien, pp.13.
- [20] Fernández-Zayas J. L. (2003). Posibilidades Actuales del Hidrógeno Como Energético en México, Director General de Investigación y Desarrollo, SENER, México.
- [21] FRAMATOME-ANP (2003). Reactors Models: The CNP-1000 reactor, The European EPR Reactor, SWR 1000 Model, The Magazine of Framatome ANP, France.
- [22] GE (2000). Advanced Boiling Water Reactor Plant General Description, First of the Next Generation, General Electric Company.

- [23] Gerber C. R., Hamburger R. y Seabrook H. E. W. (1966). Plowshare, Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos, USA, pp. 58.
- [24] González-Blas J. (2002). Uso limpio del Carbón, Jornada sobre tecnologías de uso limpio del carbón, España.
- [25] Greenspan A. (2003 b). Natural Gas Shortage Could Hurt Economy, Washington, artículo por Joseph Guinto, Web Jun 11, 10:16 AM ET, Yahoo News, sun, Jun 15, 2003.
- [26] Greenspan A. (2003a). Testimony of Chairman Alan Greenspan Natural gas supply Before the Committee on Energy and Natural Resources, U.S, July, 10, 2003, USA.
- [27] Gutín I. J. M. (2001). El Futuro Eólico ya Está Aquí, CIEMAT, 30 de Agosto del 2001, España.
- [28] Gutín I. J. M. (2002). Otro paso Adelante en la Generación Eólica, CIEMAT, España.
- [29] Herman J.. A. A., Lowe J. J. and Schoff R. L. (2001). The Economics of Gas Turbines in the PJM Region, Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, USA, pp.135.
- [30] IBERDROLA (2005). El Consorcio formado por Gamesa e Iberdrola logra un contrato para instalar 83 MW eólicos en México, 1/sept./2005, 17h06, noticias, finanzas yahoo, España.
- [31] IAEA a (2002). Latest News Related To Pris And The Status Of Nuclear Power Plants, Power Reactor Information System (PRIS).
- [32] IAEA b (2002). Nuclear Power and Sustainable Development, Maintaining and Increasing the Overall Assets Available to Future Generations, pp.4.
- [33] IEA (2002). Key World Energy Statistics, International Energy Agency, France.
- [34] Infoenergía (2001a). Dewind Instala y Desarrolla Nuevos Modelos, CIEMAT, España.
- [35] Infoenergía (2002b). La Última en Llegar: G80-1500 kW, CIEMAT, publicado el 4 de Junio del 2002, España.
- [36] IPHE (2003). International Partnership for the Hydrogen Economy Ministerial Meeting, <http://www.usea.org/iphe2.htm>
- [37] Laherrere J. H. (2003). Forecast of Oil and Gas Supply 2050, Hydrocarbons Resources, New Delhi, January 9 del 2003.
- [38] Luque C. V. (2002). El Papel de las Tecnologías Limpias del Carbón en el Contexto de la Seguridad del Aprovisionamiento en Europa, Jornada sobre tecnologías de uso limpio del carbón, España.
- [39] NE (2003). Nuclear Hydrogen Initiative, Office of Nuclear Energy, Science and Technology U.S. Department of Energy, March 2003, 2 páginas, USA, Web: nuclear.gov
- [40] NEI (2001). Nuclear Energy Surpasses Coal-Fired Plants as Leader in Low Cost Electricity Production, Nuclear Energy Institute, USA.
- [41] NEI (2002c). The Outlook for Nuclear Energy in a Competitive Electricity Business, Reliable, Economical Energy, Nuclear Energy Institute, Washington, DC, USA.
- [42] NEI (2003 a). Nuclear Energy and The Nation's Future Prosperity, Vision 2020, Nuclear Energy Institute, pp. 23, USA.
- [43] NEI (2003b). Powering Tomorrow..., With Clean, Safe Energy, Vision 2020, Nuclear Energy Institute, pp. 24, USA.
- [44] NEI (2003c). CBO Report Draws Faulty Conclusions in Cost Analysis of New Nuclear Plants, Nuclear Energy Institute, USA.
- [45] ONU (1998). Conferencia de las Naciones Unidas Sobre Comercio y Desarrollo, TD/B/Com.1/EM.7/2, pp. 32.
- [46] Rashad S.M. and Hammad F.H (2000). Nuclear Power and The Environment Comparative Assessment of Environmental and Health Impacts of Electricity-Generating Systems, Applied Energy, V. 65, Issues 1-4, April 2000, pp. 211-229.
- [47] REW (2002a). Another Record Year for European Wind Power, Rew News, Renewable Energy Woorld, March-April, 2002, London.
- [48] REW (2002b). Serious Megawatts, The US Taps into Wind's Enormous Potential, Rew News, Renewable Energy Woorld; March-April, 2002, London.
- [49] Rincón C. y Emerson P. (2000). La Gestión Binacional de la Calidad del Aire en la Zona Fronteriza Entre EE.UU. y México, Revista Borderlines, vol.8, No. 1, enero del 2000, USA.
- [50] Knapp R. (2001). Coal Technology for the Future-Reducing the Environmental Footprint, World Coal Institute, 24-25 September 2001, pp. 12.
- [51] Ruiz V. V. y Garre C. J. A. (2000). Normalización en el Campo de la Energía Eólica, CIEMAT, España.
- [52] Sage F. K. (2000). La Problemática Actual en Torno a la Contaminación del Aire en Big Bend, Texas, Revista Borderlines, vol. 8, No. 1, enero 2000, USA..
- [53] SENER (2002 y 2003). Prospectiva del Sector Eléctrico 2002-2011 y 2003-2012, Secretaría de Energía, México.
- [54] Spadaro J. V., Langlois Lucille and Hamilton Bruce (2000). Greenhouse Gas Emissions of Electricity Generation Chains, International Atomic Energy Agency, Bulletin 42, No. 2, pp. 6.
- [55] Suárez C. J. J. (2003). Padece Declive Cantarell, Economía y Finanzas, Periódico Reforma, reportaje de Shields David, 20 Enero del 2003, PEMEX, México.
- [56] U.S. Government (2001). Report of the National Energy Policy Development Group, Seal of President of The United States.
- [57] U.S. Government (2003). Nuclear Energy Program and Budget Details/Office of Nuclear Energy, Science and Technology, Energy Independence Initiative, President's Budget FY 2004.
- [58] Uranium (2000-2006). Ressources, production et Demande, OECD, Agence Internationale de l'Energie Atomique.
- [59] WNA (2000). A Weekly Summary of International News Relevant to the Nuclear Energy Industry, World Nuclear Association, 31 May - 6 June 2000.
- [60] WNA (2003). Energy For Sustainable Development, Advanced Reactors, World Nuclear Association, September 2003.

III.3 LA ENERGÍA NUCLEAR, UNA ALTERNATIVA DE SUSTENTABILIDAD PARA RESOLVER LA DEMANDA ELECTRICA EN MÉXICO.



(SEGUNDA PARTE)

S. D. Bazán-Perkins

División de Estudios de Posgrado

Facultad de Ingeniería

E-mail: bazanperkins@hotmail.com

(recibido: enero de 2004; aceptado: diciembre de 2004)

Resumen

La actual política energética propicia un alto riesgo en la economía de México, al no promover la expansión de la generación eléctrica mediante fuentes de energía alternas, como geotérmica, eólica, solar, biomasa, hidrógeno y nuclear. Por el contrario, se da prioridad al empleo del gas natural, ocasionando su desabasto, decremento de las reservas probadas y el aumento de su importación. En este sentido, y ante el descenso de la producción nacional de gas de 1999-2002, la principal expectativa se centra en obtener un abastecimiento suficiente a precios bajos de las supuestas grandes reservas comerciales de las Cuencas de Burgos y Chicontepec. Sin embargo, desde los 50's se confirmó que los campos de gas natural de la Cuenca de Burgos cuentan con un potencial geológico menor a de los del Sur de Texas. También, desde los 60's se encontró que los campos de gas-aceite de la Cuenca de Chicontepec requerían de costosas técnicas de producción para su aprovechamiento, debido su baja permeabilidad.

Primero la Comisión de Energéticos (1976) y más reciente PEMEX (2003), del 2003-2005 pronostican el descenso de la producción nacional de hidrocarburos al no integrarse con oportunidad nuevos campos productores. Se analiza, que existen escasas probabilidades de encontrar a corto plazo significativos campos de hidrocarburos comerciales, como sería en la región de aguas profundas del Golfo de México. El objetivo principal de este trabajo es proponer la diversificación en el consumo de energéticos de México con nuevas fuentes de abastecimiento basadas en la energía nuclear y las fuentes renovables. Entre las actividades iniciales, estaría concluir la evaluación económica de las reservas potenciales de uranio jurásico de la Cuenca de Tlaxiaco y terciario de la Cuenca de Burgos, que facilitarían la oportunidad de producir energía barata y limpia en condiciones de competitividad, al disponer de reservas de uranio de gran volumen.

Palabras Clave: electricidad, hidrocarburos, gas natural, petróleo, uranio, renovables, eólica, hidroeléctrica, geotérmica, reservas y producción.

Abstract

The present power policy causes a high risk in the economy of México, when not promoting the expansion of the capacity of the generation of electricity means alternating power plants, as they would be geothermal, aeolian, solar, biomass, hydrogen and nuclear. On the contrary, it has been based mainly on a greater consumption of the natural gas, that causes the accelerated decrement of the domestic proven reserves and the fast ascent of its imports. Before the reduction of 1999-2002 the national gas production, the main expectation is sustained in telling the future sufficient supplying competitive prices, the great commercial reserves in the Basins of Burgos and Chicontepec. Nevertheless, from 50's one noticed that the natural gas fields of the Basin Burgos have geologic potential minor that those of the South of Texas. Also, from 60's one was that the gas-oil fields of the Basin of Chicontepec required of expensive techniques production for their advantage.

The Comisión of Energéticos (1976) and more recent PEMEX (2003), of the 2003-2005 foretell the reduction of the national production of hydrocarbons when not integrating with opportunity producing new fields. It is analyzed, that exist few probabilities of finding in the short term significant commercial hydrocarbon fields, as it would be in the deep water region of the Gulf of México. The aim of this paper is to propose the diversification in the energy consumption in México using new sources based on the nuclear energy and the renewable. Between the initial activities, would be to conclude the economic evaluation of the potential reserves of Jurassic uranium of the Basin of Tlaxiaco and tertiary of the Basin of Burgos that would facilitate a clean and cheap opportunity to produce energy in conditions of competitiveness, al to have reserves of uranium of great volume.

Key words: electricity, hydrocarbons, natural gas, petroleum, uranium, renewable, aeolian, hydroelectric, geothermal, reserves and production

INTRODUCCION

En la primera parte de este artículo, se analizó la importancia de la energía eléctrica en las economías actuales. También las tendencias tecnológicas y de los mercados de energéticos de principios del siglo XXI, orientados a mejorar la producción de electricidad de un modo sustentable, al emplear fuentes de energía como las renovables, nuclear y el hidrógeno. El propósito es la preservación del ambiente mundial, mediante tecnologías que aceleren el progreso humano. Estas opciones tecnológicas son una mejor alternativa, ante el incremento de los precios de los hidrocarburos en el mercado internacional, particularmente el del gas natural que ya no será un energético de precios bajos.

Como se analizó en la primera parte del artículo, las plantas nucleoelectricas de III generación presentan una tendencia decreciente en sus costos de generación, alcanzando en la actualidad altos niveles de competitividad. Para el 2003, sus costos de generación son equiparables en México a las nuevas plantas de ciclo combinado a base de gas. Igualmente, del conjunto de opciones tecnológicas proyectadas al 2015, se encontró que el Pebble Bed Modular Reactor (PBMR) podría ser una opción tecnológica para implementarse en México, por su bajo costo de generación de 1.6 ¢US/kWh, construcción modular en corto tiempo (2 años) y alta seguridad, disponibles hacia el 2013.

De este modo, se planteó la necesidad de desarrollar en México un programa energético a largo plazo, para transformar su actual economía basada en el petróleo a una economía basada en el hidrógeno, hacia el 2030. Por ser el tiempo de duración estimado de las reservas convencionales de petróleo crudo en el mercado mundial, según investigaciones de varios analistas.

En está segunda parte, se analiza la disponibilidad de los recursos energéticos primarios comerciales de México, para la generación eléctrica a corto y mediano plazo. También. las probabilidades de encontrar nuevas reservas de hidrocarburos significativas, en las aguas profundas del Golfo de México. Se describe en términos generales el potencial de las reservas de uranio en México, para su aprovechamiento a mediano plazo. Finalmente, se analizan las ventajas y desventajas de las fuentes de energía renovables. Su mayor empleo se podría incrementar en menor tiempo al dársele mayor peso a la generación nucleoelectrica.

CAPACIDAD DE GENERACION ELECTRICA ACTUAL

Panorama Nacional, Para la Generación de Electricidad.

Entre los puntos debatibles de la actual política energética de México es desarrollar una expansión eléctrica con mayor empleo de los combustibles fósiles, que propician las mayores afectaciones ambientales. Bauer y Quintanilla (2000) al analizar la expansión del sector eléctrico de 1997-2006, concluyeron que la notoriedad del aplazamiento del empleo de las fuentes no-fósiles entra en contradicción con los compromisos nacionales e internacionales para aminorar las emisiones de gases de efecto invernadero, tanto en lo local como global.

Como ha sido descrito por SENER (2001), en el 2000 la generación eléctrica de 192,764. GWh, se obtuvo en un 75% de los combustibles fósiles (46.7% petróleo, 11.8% gas y 16.7% carbón mineral y dual) y para el 2010 se estiman 329,448. Gwh, de los cuales un 83% se obtendrá de los combustibles fósiles (54% gas, 23% petróleo y 6% carbón mineral), ver figura 5. Esto es, el empleo de los hidrocarburos en la producción de electricidad se incrementará de 58.5% a 77%. Por lo anterior, es importante conocer sus posibilidades de suministro con reservas domésticas, cómo en seguida se expone.

Disposición de Recursos Energéticos Primarios Para la Generación de Electricidad en México.

En México, la seguridad del suministro de los recursos energéticos para generar electricidad plantea serios problemas, debido al acelerado agotamiento de sus reservas de hidrocarburos y el alto avance de su explotación (madurez). Aunado a las dificultades geológicas y técnicas que repercuten en altos costos para aprovechar el 40% de las reservas; ubicadas en la Región Norte y en particular, los de la Cuenca de Chicontepec (figuras 13 a la 20 y tablas 2 y 3).

A lo anterior, se suma la baja calidad del carbón mineral del país en mantos delgados y plegados y su alto costo comercial que conlleva a su bajo aprovechamiento, González-Reyna (1956). Así como, la falta de desarrollo tecnológico y de recursos humanos para aprovechar el uranio doméstico. Por ello, en la actualidad se acude al comercio exterior para proveer materias de generación de electricidad, como ocurre con el gas natural, carbón mineral, gasolinas y combustible nuclear de las que México es importador, implicando dependencia energética externa y fuga de divisas.

Estas conclusiones conllevan en considerar un cambio en la política energética del país, para remplazar las tecnologías de generación eléctrica basada en los hidrocarburos por las de disponibilidad confiable y suficiente a precios razonables, con menores impactos al ambiente y alto progreso humano.

Las Reservas de petróleo en México

La seguridad del suministro de hidrocarburos de México, en sus distintas modalidades como es petróleo crudo, líquidos del gas y el gas seco, se refleja en la variación anual de sus reservas probadas, probables y posibles. Durante el período 1980-1984 se obtuvo el mayor incremento de las reservas, al pasar de 45,803 millones de barriles a los 72,500 millones de barriles, esto es un 58.2% de aumento. Desde entonces, es decir, desde 1984 las reservas totales de hidrocarburos del país decrecen año con año (figura 13).

A su vez, recientemente la estructura de las reservas de hidrocarburos del país se han deteriorado sustancialmente con la caída de sus reservas probadas. En efecto, entre 1999 al 1 de enero del 2004, las reservas probables y posibles crecen en un 51 y 22% respectivamente, mientras tanto, las probadas se reducen en un 46%. La discrepancia se debe a que no existió, en su oportunidad, suficiente inversión en exploración para incrementar a los ritmos adecuados las reservas probadas, a partir de las probables y posibles o mediante la incorporación de nuevos campos (figura 14).

Esta situación, también repercute desde 1995 en el acelerado decremento de las reservas probadas de petróleo crudo de México, reportadas por la EIA (2003), con fuertes caídas en el 2000 y 2003. En 1995, se reportan 50,776 millones de barriles que en aquel entonces garantizaban por unos 53 años la producción. Sin embargo, al 1º de enero del 2003 se ubican en 12,622 millones de barriles y, con la producción del 2003 su tiempo de duración es de apenas 10 años (tabla 2).

| Tabla 2. Reservas Probadas de Petróleo Crudo, Producción Anual, y Tiempo Estimado de Duración, en México [Elaboración propia con datos de EIA (2003 y 2005); PEMEX (2001-2005); INEGI (1993, 2001, 2002 y 2003)] | | | | |
|--|---|--------------------------|---------------------------------|------------------|
| Año | Reservas probadas Millones de barriles | Producción | | Años de duración |
| | | Miles de barriles Día | Millones de barriles Anuales | |
| 1992 | 51,298 | 2,667.7 | 973 | 52 |
| 1993 | 51,298 | 2,673.4 | 975 | 52 |
| 1994 | 50,925 | 2,685.1 | 980 | 51 |
| 1995 | 50,776 | 2,617.2 | 955 | 53 |
| 1996 | 49,775 | 2,858.3 | 1,043 | 47 |
| 1997 | 48,796 | 3,022.2 | 1,103 | 44 |
| 1998 | 40,000 | 3,070.5 | 1,120 | 35 |
| 1999 | 47,822 | 2,906 | 1,060 | 45 |
| 2000 | 28,399 | 3,012 | 1,099 | 25 |
| 2001 | 28,2600 | 3,127 | 1,141 | 24 |
| 2002 | 26,941 | 3,177 | 1,159 | 23 |
| 2003 | 12,622 | 3,370.9 | 1,230 | 10 |
| 2004 | 15.674 | 3,383 | 1,234 | 12 |

El mayor decremento histórico de las reservas probadas de petróleo crudo del país acontece en el 2003. Tal como fue expuesto, en prensa nacional el 20 de enero del 2003, por Suárez (2003), director Corporativo de Finanzas PEMEX. Aclara que las reservas de petróleo crudo probadas, son de 12,622 millones de barriles al excluir de plano a las no desarrolladas de la región de Chicontepec, consideradas se incrementan en 18,767 millones de barriles. Por otra parte, anunciaba también la caída de la producción de hidrocarburos de los yacimientos de Cantarell después del 2004. En efecto, a mediados del 2003 la EIA y BP reportan en la estadística mundial de reservas probadas de petróleo crudo por país, que las de México eran de 12,622 millones de barriles, referidos al 1 de enero del 2003. Por tanto, México pasó por sus reservas de petróleo en el mundo del décimo al decimocuarto lugar.

Las Reservas de Hidrocarburos de La Región Norte y sus Implicaciones en el Sector Eléctrico

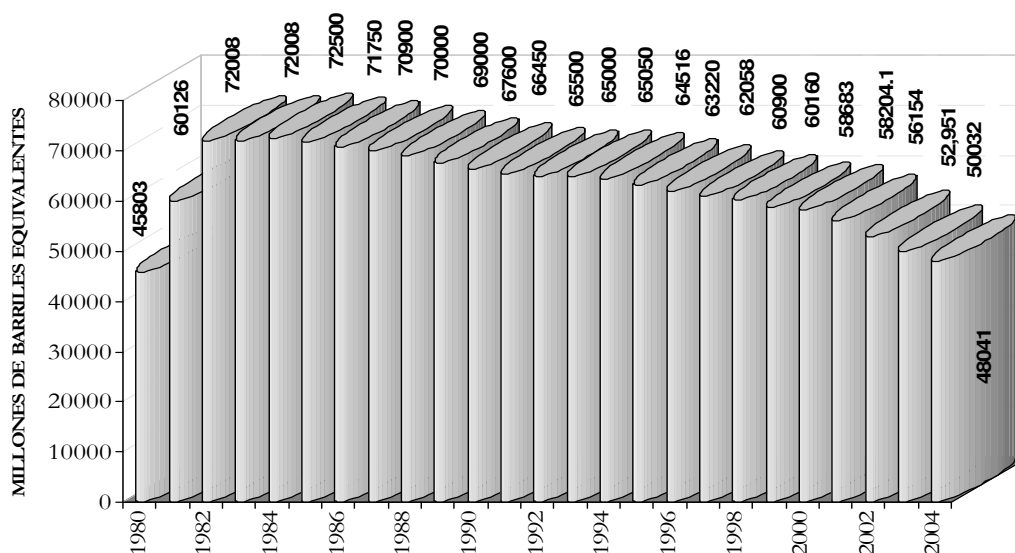
La problemática económica de la Región Norte es que no obstante de contar con el 40% de las reservas totales de hidrocarburos del país, su producción de petróleo crudo es decreciente y mínima, en 2002 representó el 1.4% del total (figura 15). Sin embargo, en la próxima década se requerirá elevar su producción a fin de cubrir las necesidades energéticas del país, en particular la del sector eléctrico que hacia el 2010 dependerá al menos de un 77% del petróleo y gas. Las perspectivas de la viabilidad económica de los campos de la Región Norte (Cuenca de Chicontepec), se definen por sus características geológicas, las tecnologías disponibles y el nivel de inversión para su desarrollo. Para servir de base a la presente discusión, se consideran dos posibles escenarios económicos, como reservas convencionales y otra como no convencionales, que se exponen en seguida.

Si se plantean las reservas de Chicontepec, como reservas de hidrocarburos convencionales, significa que como tal, tendrán la capacidad para cubrir los decrementos de la producción, que acontece en la mayoría de las regiones productoras del país, y así mantener los niveles de producción. En esta situación, podrá compensar, por lo menos, el descenso de la capacidad de producción de los campos de Cantarell esperada para el 2005 (figuras 15 y 19).

En cambio, si los campos que quedan por explotar de la Región Norte (Cuenca de Chicontepec) son de tipo no convencional, entonces su aprovechamiento serán mínimos hasta que hacia el 2030 se estén agotando las reservas mundiales de hidrocarburos convencionales y entonces, ante un mercado de hidrocarburos de precios altos podría alcanzar la competitividad comercial. Los argumentos que sostienen éste modelo son los más sólidos, y se relacionan con el comportamiento de la curva de producción y la naturaleza geológica de la región, como se expone a continuación.

Campbell (2002) concluye que el descubrimiento de un campo de hidrocarburos de tipo convencional, en una economía de mercado, se identifica por su patrón de producción en forma de campana. El modelo se refiere a la curva de producción de Hubbert, que inicia en forma logarítmica y obtiene un máximo cuando se han extraído poco menos de la mitad, para después entrar en rápida declinación. Resulta evidente, como se muestra gráficamente en la figura 15, que la producción de la Región Norte ha estado en decremento y no corresponde a este modelo, aun con periodos de precios altos del petróleo no se incrementa su producción.

Figura 13. Evolución del Nivel de Reservas Totales de Hidrocarburos en México, 1980-2003 [Elaboración propia con datos de la SENER, 2001 y PEMEX, 2005] (Millones de Barriles Equivalente)



En general, se puede afirmar que la curva de producción de Hubbert se ha cumplido para todos los campos de hidrocarburos convencionales, por región, por país y a escala mundial, cuando se sujetan a la política energética de una economía de mercado. En México, como ejemplo, tal comportamiento se apreció en la producción histórica de la Faja de Oro, dentro de la misma Región Norte. La producción de La Faja de Oro, formó la curva típica en forma de campana de 1915 a 1932; su producción máxima se alcanza en 1921 con 193,397,587 barriles, que llevó a México a ocupar el segundo lugar en producción mundial, después su producción decrece para alcanzar en 1932 un nivel menor comparable al de 1915 (figura 16).

De la Fuente y Mejía Isidro (1969) realizaron el estudio geológico y económico de los campos de gas-aceite de la Cuenca de Chicontepec. Estos autores determinan las limitantes de su viabilidad debido a la consistente falta de permeabilidad de la roca. Las altas dificultades en la perforación que conlleva a una labor de lento avance y frecuente abandono de la operación. También, una falta de continuidad de los campos que se interrumpen a corta distancia en virtud de los cambios de facies en los sedimentos del Jurásico Superior. Por otro lado, en las pruebas de producción no hay flujo de hidrocarburos por falta de permeabilidad de la roca. Por tanto, los hidrocarburos son básicamente gas y muy poco aceite ligero que fluyen mezclados con agua salada.

Figura 14. Estructura de las Reservas de Hidrocarburos en México, 1999-2004
 [Elaboración propia con datos de PEMEX (2001, 2002 y 2003) / anuarios y memorias]

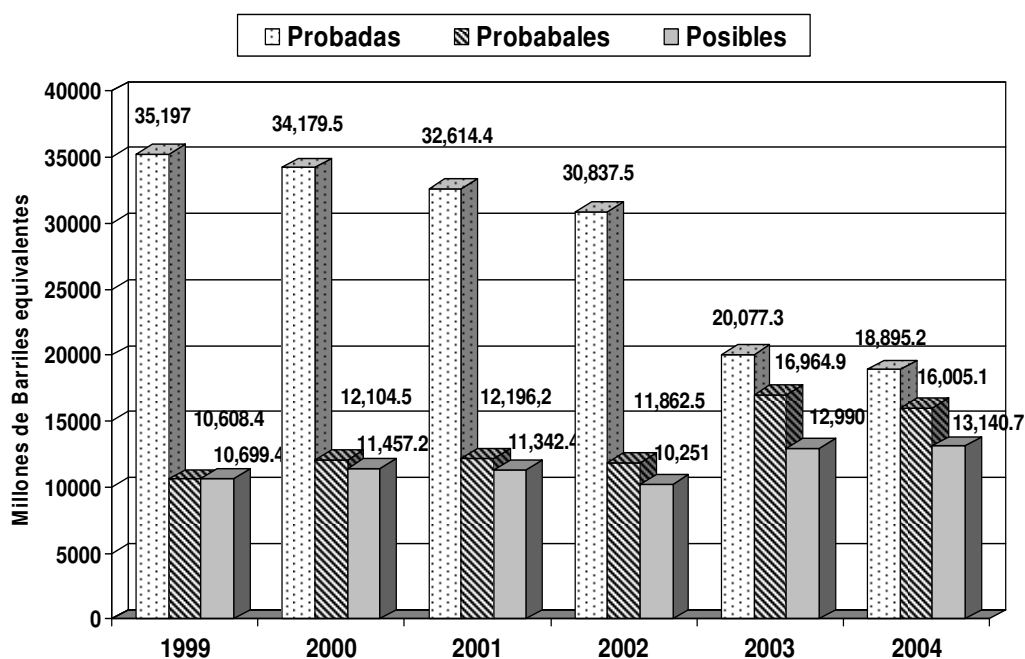


Figura 15. Producción de Petróleo Crudo Por Región Geográfica en México, 1990-2002
 [Elaboración propia con datos de PEMEX, 2003 y 2002 / Exploración Producción, anuario 2001 y 2002]

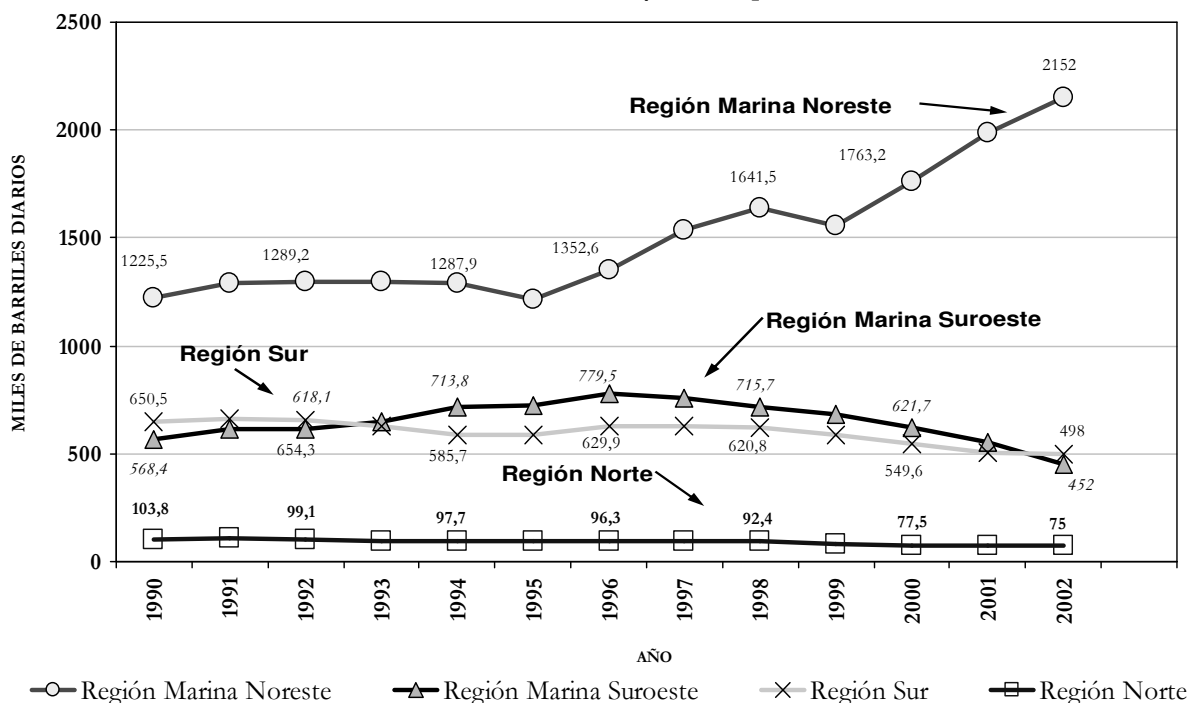


Figura 16. Evolución Histórica de la Producción de Petróleo en México, 1901-2002 y su Proyección al 2020 [Elaboración propia con datos de INEGI (2003) y EIA (2003) y PEMEX (2003)].

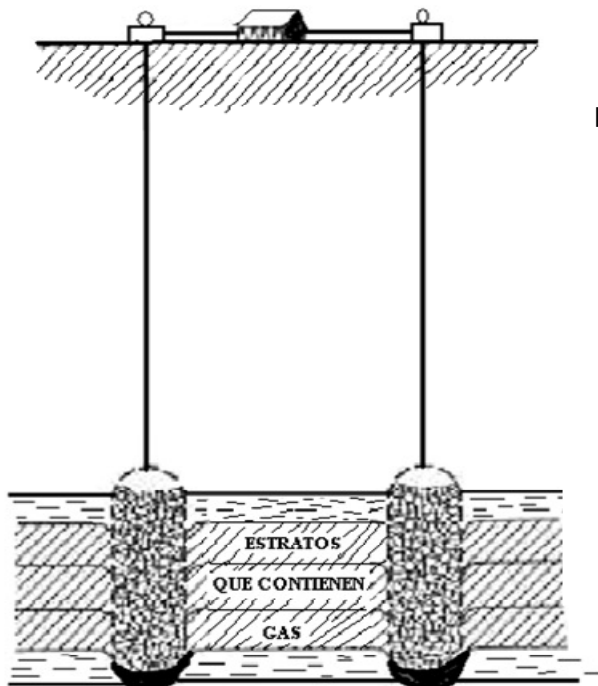
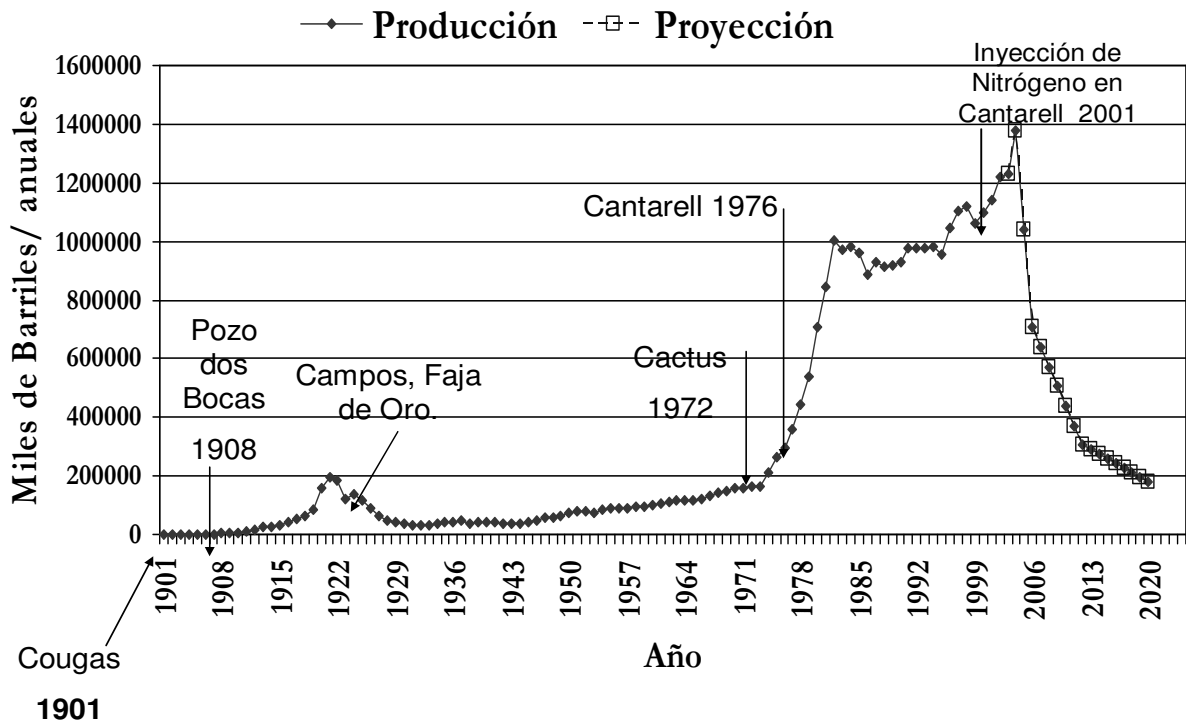


Figura 17. Método Plowshare

[Adapatdo de Gerber Carl R. et al., 1966]

Una chimenea de material permeable muy triturado creado por una explosión nuclear puede aumentar la productividad de los pozos de *gas natural* en una formación poco permeable. La explosión nuclear produciría un gran "pozo" en el que se almacenaría el gas y del que sería bombeado a la superficie.

Por sus características geológicas y los resultado de las pruebas de producción, los campos de hidrocarburos de la Cuenca de Chicontepec difícilmente podría llegar a tener a corto y mediano plazo, un papel significativo como reservas convencionales. A diferencia de los campos marginales de Alberta Canadá recién integradas a las reservas mundiales (EIA, 2003), los de la paleotrinchera de Chicontepec son campos de escasa continuidad lateral; con rápidos cambios litológicos laterales y verticales acompañados de acuíferos, los configuran como microcampos discontinuos, aislados y de formas irregulares, difícil de ubicar con exactitud y costos de producción altos. En adición, a la nula permeabilidad de la roca en las zonas no fracturadas, se requiere de tecnologías costosas para fracturarla (hidráulico o plowshare, figura 17). Estos factores elevan los costos para ser aprovechables en gran escala comercial, mientras exista en el mercado internacional reservas de hidrocarburos convencionales.

Dinámica de los Niveles de Reservas y de la Capacidad de Producción de Hidrocarburos

Del análisis de la evolución decreciente de los niveles de reservas probadas y de la capacidad de producción de los campos de hidrocarburos se estima que hacia el 2010, el país ya estará importando petróleo crudo. El primer método se ilustra en forma gráfica en la figura 18, construidas con los datos de la tabla 2. El análisis comprende el nivel de reservas probadas en años, desde 1990 al 1 de enero del 2003, a excepción del aumento de 1999 se tiene un comportamiento regular de decremento. Este comportamiento, al ser ajustada a una proyección lineal, define que al año 2009 la producción habrá igualado el monto de las reservas. Por tanto, hacia el 2010 se estará importando el energético si se mantiene la capacidad de producción a los niveles de 2002 y sí no se incrementa en forma significativa la producción de la Región Norte.

Otra apreciación se obtiene de la capacidad de producción que se espera de los campos de hidrocarburos de Cantarell contra la demanda interna, basándose en la información expuesta por Suárez (2003) y suponiendo que el resto de los campos mantienen su proporción de producción y no se eleva en gran medida la producción en la Cuenca de Chicontepec, resulta que al 2009 se estará importando petróleo (figura 19). Por todo lo expuesto, se concluye que hacia el 2010 el escenario energético del país estará determinado por la insuficiencia de hidrocarburos. Esto es que, desde el año 2000 era oportuno iniciar la construcción de plantas nucleares de III generación, en sustitución de las termoeléctricas a base de combustibles fósiles y para la expansión de la capacidad de generación de electricidad.

Figura 18. Reservas Probadas de Petróleo Crudo en México, **1990-2003**
 [Elaboración propia con datos de EIA,2005; PEMEX, 2001-2005; INEGI 1993.
 2001-2003]
 (años de duración)

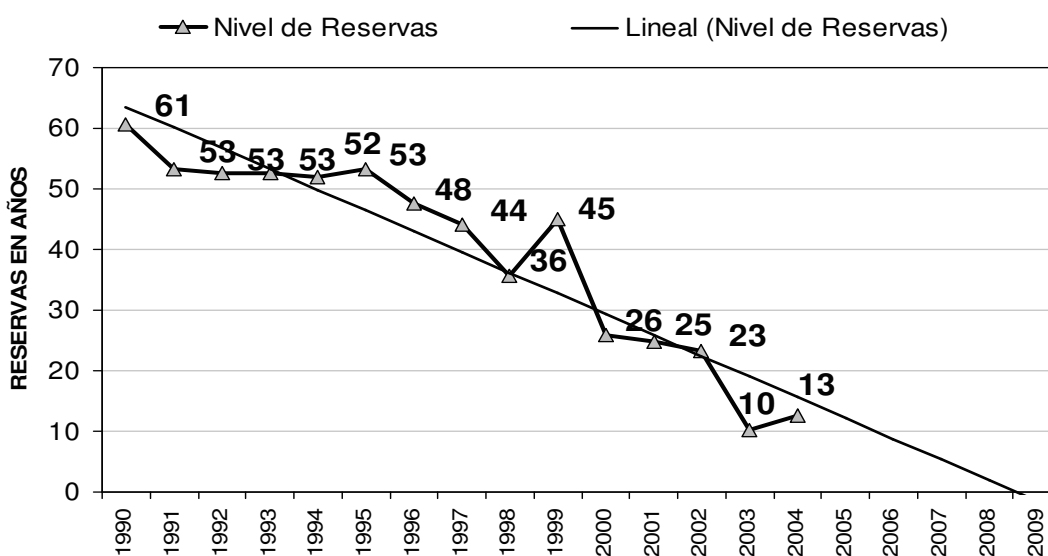
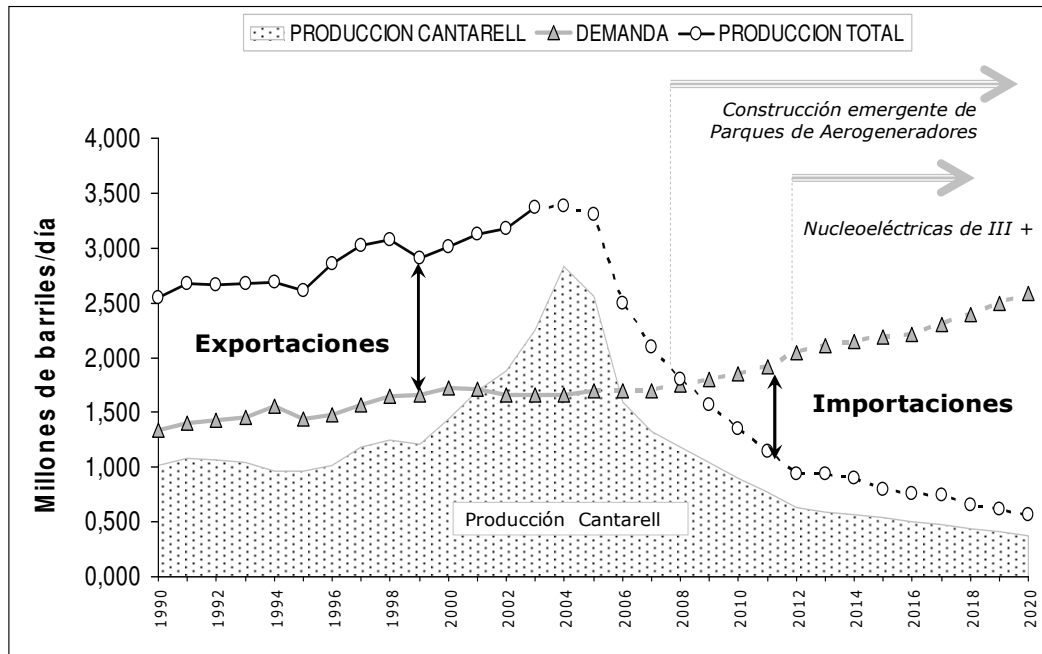
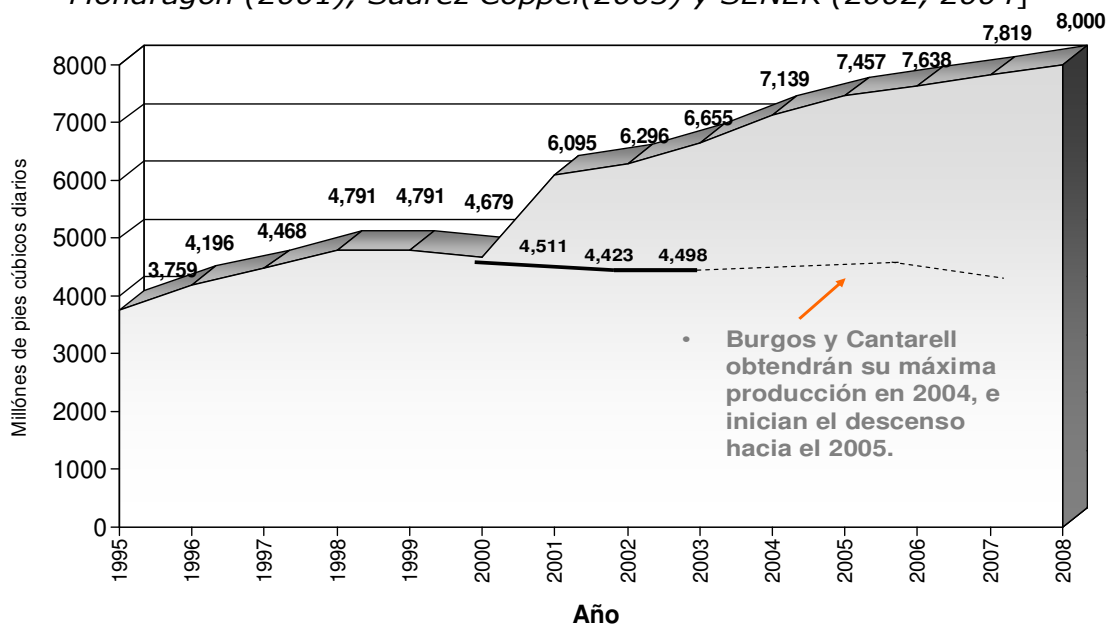


Figura 19. Petróleo Producido y Consumido en México de 1990 al 2003 y su Proyección al 2020 [Elaboración propia con datos de Suárez Coppel (2003), INEGI (2003) y PEMEX (2002 y 2003 a y b)].



6. Las Reservas de Gas Natural en México

Figura 20. Producción de Gas Natural en México Comparativa, Proyección 2000-2008 Ascendente y la Real en Descenso [Elaboración propia con dato de Arriola Torres(2000), Barbosa Fabio(2000), Yañez Mondragón (2001), Suárez Coppel(2003) y SENER (2002, 2004)]



Para la economía del país, de fundamental importancia sería la generación de electricidad mediante recursos energéticos domésticos, que propicien altos niveles de desarrollo tecnológico, a costos razonables y de mayor efecto multiplicador hacia todos los sectores de consumo. Esta posibilidad de alcanzar una producción competitiva, permitirá generar excedentes para su exportación, por su calidad, cantidad y limpieza. Este conjunto de condiciones de sustentabilidad no pueden ser alcanzadas basándose en los combustibles fósiles, en particular con el gas natural que al emplearlo en la generación eléctrica, afecta al ambiente en un 22% del calentamiento global.

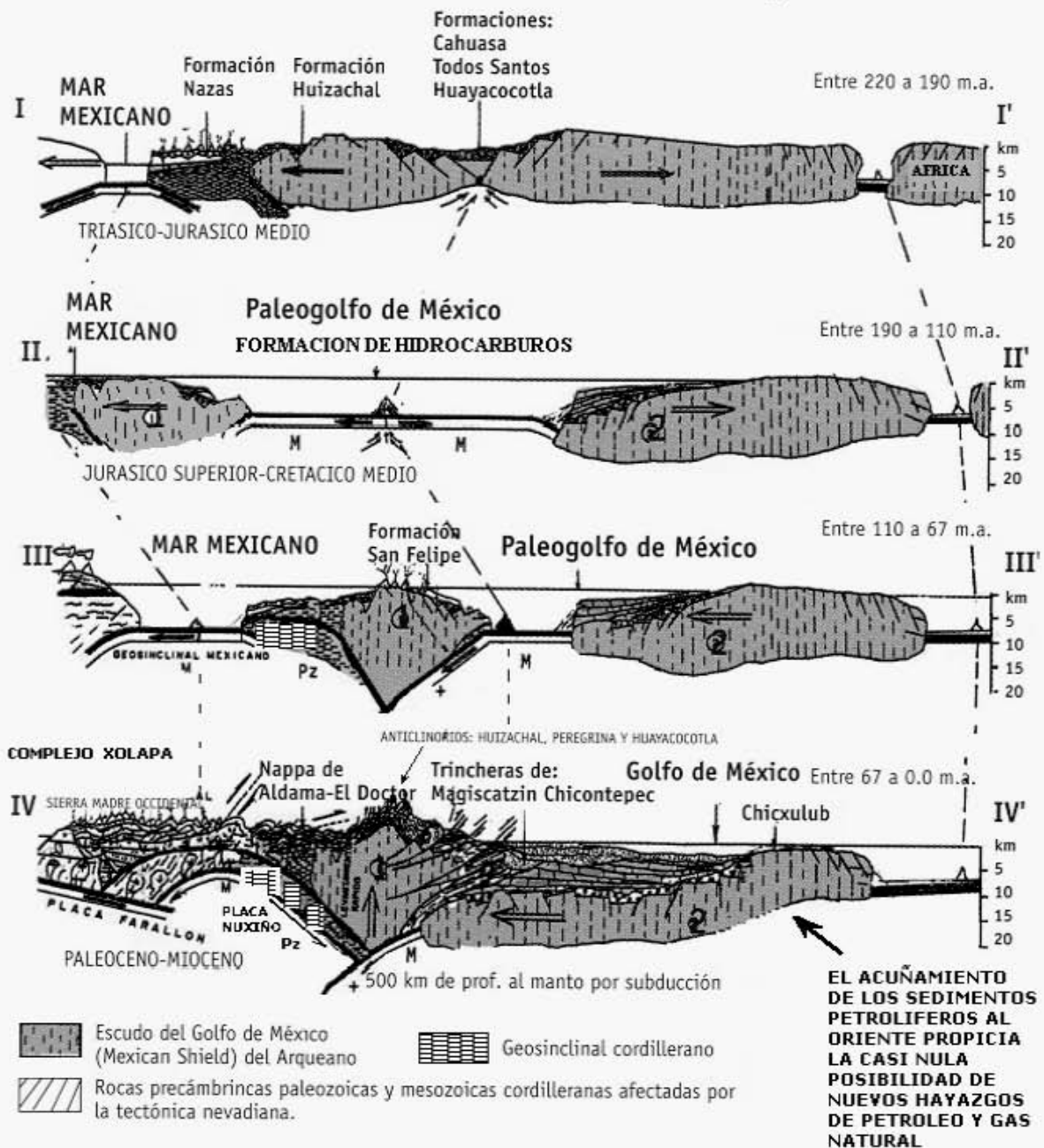
En efecto, el escenario actual de los campos productores del gas natural en México es su insuficiencia de reservas probadas para sostener la actual producción por más de 7 años, y con escasas posibilidades de incrementarlas en forma significativa en Chicontepec y Burgos. También, desde 1999-2002 la producción de gas natural está en franco decremento por el estado avanzado de explotación de los yacimientos. Aunado a la intensificación de la volatilidad al alza de los precios del gas natural en el mercado americano, en las que ya no será un combustible barato. Todo esto repercute en que de no modificarse a corto plazo la actual política energética de México, orientada a intensificar la generación eléctrica basándose en el gas natural, se incrementará el riesgo de la seguridad energética del país.

Dentro de los tres primeros años del presente siglo, las reservas de gas natural probadas de México ya registran significativas reducciones. Hacia el 2002 se cubican 38.95 trillones de pies cúbicos (Tpc), en el 2003 se reportan 8.776 Tpc, para ubicar al país en el cuadragésimo lugar en el mundo, que sería apenas para 7.1 años. El descenso se da desde el 2000, cuando se valoraban 43 Tpc de reservas probadas de gas y ubican al país en decimoquinto lugar en el mundo (BP, 2000 y 2003). Así, por ejemplo, las reservas de gas natural probadas de México en el 2003 se reducen al 20% de las valoradas en el 2000, que infieren fallas técnicas y de cálculo. Desglosadas en cifras de 2000, las reservas totales eran de 78.286 Tpc, de las cuales 43.167 Tpc se determinaban como probadas, 14.884 Tpc como probables y 20.233 Tpc como posibles (Silva 2001, en Arriola 2001).

La principal expectativa para el mercado del gas natural en México, se fundamenta en la posibilidad de incrementar las reservas y su producción en la Cuenca Terciaria de Burgos (Tamaulipas), en grandes volúmenes y a precio bajo. Este supuesto se basó en una comparación del número de pozos desarrollados en la exploración de gas al Sur de Texas, Estados Unidos, que en gran proporción son mayores a la Cuenca de Burgos; por lo mismo se propuso desarrollar un programa de perforación similar y así cubrir la demanda nacional. Sin embargo, existe inconsistencia geológica y de menor marco de posibilidades, debido a que desde los años 50's las supuestas similitudes potenciales de ambas regiones quedaron anuladas, al comprobarse cambios litológicos y tectónicos derivados de la información geológica y geofísica.

| Tabla 3. Principales Reservas de Gas Natural en América Latina por País del 2002 al 2003 [Elaboración propia con datos de la EIA, 2003, BP *2005] (Trillones de pies cúbicos). | | | |
|--|--------------|-------------|--------------|
| País | 2002 | 2003 | 2004* |
| Venezuela | 149.21 | 148.00 | 21.4 |
| Argentina | 26.78 | 26.96 | 21.4 |
| Bolivia | 27.36 | 24.00 | 31.4 |
| México | 38.95 | 8.78 | 14.9 |
| Perú | 8.66 | 8.66 | 8.7 |
| Brasil | 7.86 | 8.09 | 11.5 |
| Colombia | 5.00 | 4.51 | 3.9 |

Figura 21. Evolución Geodinámica para el Golfo de México
 [Referencia Bazán Perkins 2001] .



1) Gneis Carrisalillo, Gneis Novillo, Gneis Huiznopala, Complejo Daxaqueño y Macizo de Chiapas. Hacia el Poniente en conexión estructural con el Paleozoico cordillerano.

2) Macizos de: Tamaulipas, Tuxpan, Arenque, del Atolón de la Faja de Oro, Tezuitlán, Plan de Las Hayas, del Golfo, de los Tuxtlas y de Yucatán; de la planicie costera del Golfo de México, en subducción hacia el Poniente.-Representan el antepaís de la orogenia mexicana de edad laramide, que se han comportado como plataformas estables desde finales del Paleozoico.- por lo cual, las secuencias Mesozoicas y Cenozoicas que les sobreyacen se presentan en homoclinales.

En efecto, en las clásicas "Notas Sobre la Geología Petrolera de México" de Benavides (1956) razonaba que ya desde 1934 se sabía que la Cuenca de Burgos, aunque es la misma estructura de los yacimientos del suroeste de Texas, los campos de gas se empobrecen hacia el territorio de México por ser más pequeños y distribuirse en forma más aislada, debido a los abruptos cambios por fallamiento, reducción de las facies sedimentarias y cambios en los ambientes de formación. En donde su producción inicial es alta pero su declinación ocurre rápidamente. En este sentido, los mejores campos serían los que se encuentran próximos a la frontera con los Estados Unidos (Reynosa, Misión, La Presa, Treviño, 18 de Marzo y otros) que se restringen y diluyen hacia el territorio de México, hasta prácticamente desaparecer.

En la práctica, las proyecciones que auguraban grandes incrementos en la producción de gas natural en México, con base a las posibilidades de la Cuenca de Burgos, se modifican bastante ante el decremento de la producción nacional. En efecto, a mediados del 2000 aparecieron indicios de recuperación y se vislumbraba un incremento continuo de la producción para alcanzar los 8000 millones de pc/d hacia el 2008. La situación real sería un decremento de la producción de gas natural desde 1999. Se considera que este decremento se intensifique después del 2005, al alcanzar su máxima producción en los campos de gas no asociado de la Cuenca de Burgos (Yáñez-Mondragón, 2001), y del tipo asociado en Cantarell (Suárez, 2003). La gráfica de la figura 20 compara los dos escenarios de producción de gas natural; la proyectada del 2000 que preveía incremento de la producción y el real que es en descenso.

Desde el 2003, por la falta de suficiente producción doméstica de gas natural, PEMEX restringe el suministro a la CFE, llegando a 1700 Mpc/d; 200 Mpc/d equivalen a 1,100 MW, que es como la cuarta parte de lo que consume la ciudad de México. Por lo mismo la CFE empleará el aceite diésel en vez del gas natural en termoeléctricas de tecnología dual (Muñoz, 2003).

Escasas Probabilidades de Encontrar Significativas Reservas de Hidrocarburos, en las Aguas Profundas del Golfo de México

Con base a diversos modelos paleogeográficos del Golfo de México, podemos asumir la casi nula posibilidad de nuevos descubrimientos de petróleo y gas natural en sus aguas profundas, debido al acuífamiento de los sedimentos marinos hacia el oriente. Por otra parte, al occidente se restringen considerablemente toda posibilidad, al advertir el contacto tectónico de la Trinchera de Chincontepic, propuesta por Bazán (1990) a consecuencia de la colosal cabalgadura de la Sierra Madre Oriental sobre la secuencia de la Planicie del Golfo de México, condiciones que sellaron su migración definitiva. De hecho, existen otras regiones con mejores posibilidades (figura 21).

Partiendo de estas ideas podemos arribar a la conclusión que la actual política energética propicia un alto riesgo en la economía de México, cada vez es mayor la dependencia en las importaciones de gas natural, debido a los altos consumos que obliga el sector eléctrico, sustentadas con escasas reservas probadas. De acuerdo con la SENER (2003), se proyecta que hacia el 2006 el sector eléctrico consumirá un 37% del gas natural y en el 2010 el 40.7% y, de las importaciones absorberá hacia el 2006 el 26% y para el 2010 un 50%, cifras que se consideran conservadoras.

Reservas de Uranio en México

El desarrollo de los combustibles nucleares en México constituye un caso singular, desde las primeras fases de exploración y explotación están bajo control del estado, en esta forma las fluctuaciones que sufre el precio del uranio en el mercado internacional, afectarán la economía nacional en la medida del volumen de reservas probadas, o en la carencia de tecnología para producir combustibles que conduzcan al abastecimiento de los programas nucleares. Es de enfatizar que para el desarrollo de la Industria Nuclear en México, por fortuna se cuenta con potenciales reservas de minerales de uranio susceptibles de ser explotadas, descubiertas y desarrolladas parcialmente hasta la clausura de la empresa paraestatal URAMEX en el año de 1984. En sus respectivas modalidades de potenciales, probables, posibles y probadas.

Existen condiciones favorables para incrementar estos rubros a muy corto plazo; pero la escasez de capital y la carencia de tecnología doméstica ocasionó que estas perspectivas quedaran de plano truncadas y olvidadas ante el "boom petrolero" que se desató durante la década de los 80's, originando la debacle de endeudamiento en la que nos encontramos y que aún no se tiene respuesta en el futuro próximo.

En efecto, hacia finales de la administración del Presidente Luis Echeverría Álvarez (1970-1976) la solución programada por el gobierno del país, hacia el 2000, radicaba en emplear principalmente la energía nuclear y en un mínimo a los hidrocarburos para la generación de electricidad, y no obstante que ya se habían descubierto los campos de Cactus y Cantarell. Lo anterior se fundamentó en un estudio a largo plazo, elaborado por la Comisión de Energéticos, al determinar que entre el 2003 y 2005 se alcanzaría la máxima producción de hidrocarburos y el inicio de su descenso (CE, 1976), similar a la prevista por Suárez (2003). Desafortunadamente, la perspectiva de una programa energético a largo plazo quedo en el olvido, lo cual ha sido una de las principales preocupantes (Viqueira, 1979; Fernández-Zayas, 2003).

Desde 1957, se ha venido promoviendo la búsqueda de yacimientos de uranio en el territorio nacional por medio de exploraciones terrestres y reconocimientos aeroradiométricos, lográndose definir más de 200 anomalías radiométricas, entre prospectos y depósitos uraníferos de menor a mayor importancia. Desde entonces, varios distritos regionales investigados como Peña Blanca, Chihuahua, Coneto-El Rodeo, Durango; La Coma-Buena Vista, Tamaulipas y Los Amoles, Sonora formalizaron concentraciones económicas explotables, de reservas minerales en los ambientes hidrotermales y sedimentarios. Posteriormente, hacia el cierre de URAMEX se descubrían los gigantescos yacimientos mesozoicos de la Cuenca de Tlaxiaco, estado de Oaxaca (figuras 22 y 23). Los que básicamente vendrían a resolver la problemática de abastecimiento de combustible nuclear para el programa de instalación de plantas nucleoelectricas (Bazán, 1981).

Hacia los años de 1978 a 1980, de acuerdo con estudios científico desarrollados por Sergio Bazán Barrón de URAMEX, en un proyecto de tesis doctoral se programó explorar áreas favorables del Jurásico y Cretácico similares a las estudiadas en otros países, desarrollando la infraestructura geológica básica en regiones donde de hecho no existían referencias de manifestaciones uraníferas, pero condiciones favorables que a muy corto plazo resultara positiva, localizándose las extensas concentraciones diseminadas en terrenos mesozoicos de la región de Tlaxiaco, evidenciando y acreditando así la teoría científica. Fue así como se promovió la exploración de la cuenca mesozoica de Tlaxiaco por medio de brigadas terrestres.

Según Bazán (1981), las brigadas de geólogos a cargo de Ernesto Manjares (1978), a 3 Km. al sur de San Juan Mixtepec, encontraron una anomalía radiométrica en metareniscas del Jurásico Inferior que acusaba entre 1500-2300 cps. Uribe Arriaga (1979) determinó una zona anómala de 950 cps al sur de Tezoatlán. Finalmente, Vivanco Flores (1980) detectó geológicamente una zona anómala con valores que oscilaran entre 500 y 12,000 cps, en el poblado de Santa Catarina Tayata, a unos 20 Km, al noreste de Tlaxiaco, en tobos y areniscas del Mesozoico continental, a partir de 50 cps de fondo radiométrico ambiental litológico. Las figuras 23 y 24 respectivamente, muestran las áreas potencialmente uraníferas pendientes de ubicar al cierre de Uranio Mexicano, entre otras más de la Región de Tlaxiaco, Oaxaca.

Los yacimientos de uranio sedimentario de la Cuenca de Tlaxiaco se encuentran diseminados hacia la base y la cima de secuencias litoestratigráficas del Jurásico y Cretácico continental y litoral, en una faja potencial de 15-20 Km. de ancho, con longitud aproximada entre 350-400 Km. Las que comprenden secciones geológicas de 350-550 m de espesor que afloran esporádicamente, cubriendo el frente continental mesozoico del cartón Precámbrico-Paleozoico denominado Complejo Basal Cristalino de Oaxaca y Guerrero. Estos depósitos, se encuentra en condiciones semejantes a los extensos yacimientos sedimentarios del Colorado Plateau de EUA, una de las provincias de mayor riqueza y producción uranífera (Bazán, 1981).

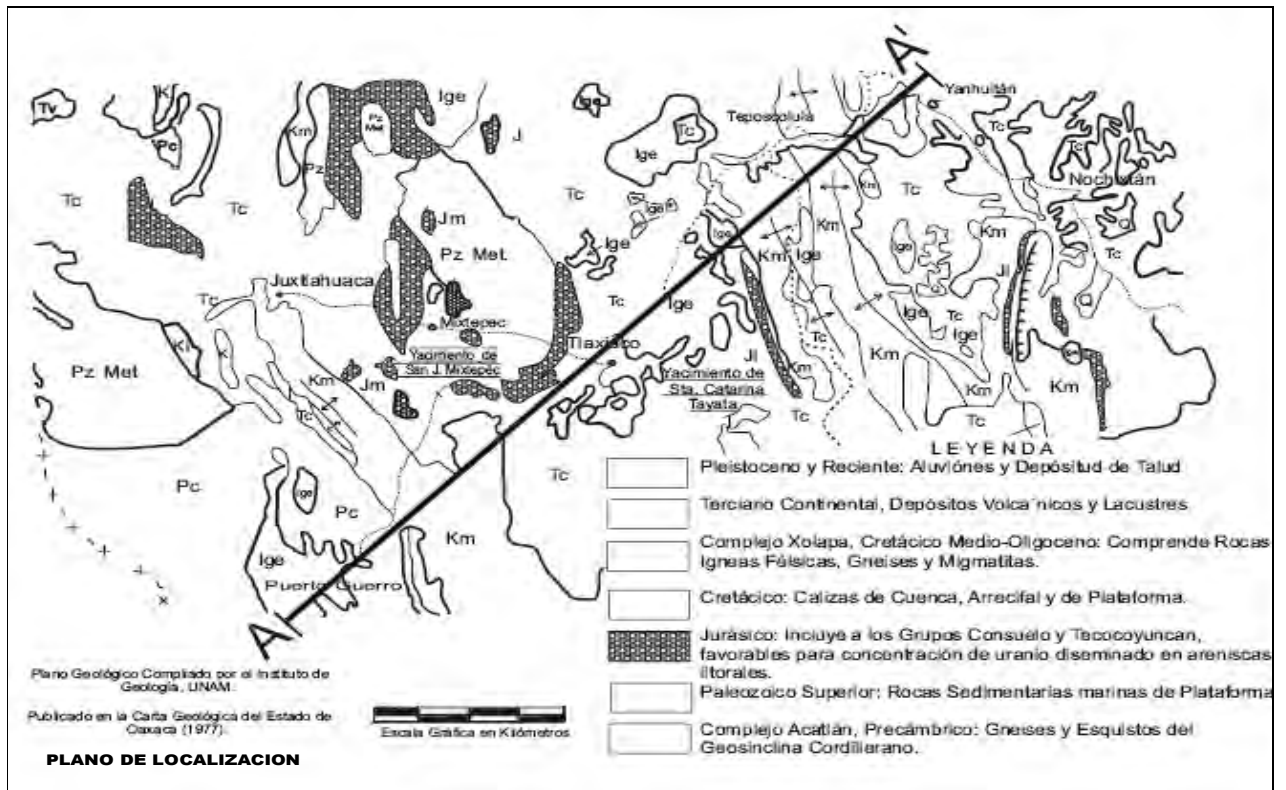
También, como reservas no convencionales, es decir económicamente no competitivos pero de gran magnitud como subproducto, serían los depósitos de uranio asociado a depósitos de fosforita, en sedimentos de ambientes marinos de la región de San Juan de la Costa y Santo Domingo, Baja California (Escofet et al., 1984; Salas et al., 1988).

Con respecto al potencial y situación económica de las reservas probadas de uranio en México, podemos partir de las publicaciones de Castañeda (1986) y Salas et al., (1988), fundados en información técnica de la Comisión Nacional de Energía Nuclear, del Instituto Nacional de Energía y de Uranio Mexicano. Si bien estos profesionistas describen la distribución y características de las reservas uraníferas, su valoración es incierta hasta el año 1981, cuando se contaba con 14,522 t de U_3O_8 "in situ" como reservas probables y 35,000 t de posibles. En la práctica se trata de verdaderas estimaciones de U_3O_8 difíciles de recuperar comercialmente, por su escaso volumen y con gran parte de refractarios para su recuperación metalúrgica, lo que en conjunto elevaban su costo de concentración entre 4 a 8 veces, según el yacimiento, más de lo que se podría adquirir en el mercado internacional.

Figura 22. DISTRIBUCION DE DIVERSOS YACIMIENTOS DE URANIO DESCUBIERTOS EN MÉXICO



Figura 23. DISTRIBUCION DE LAS VENTANAS DE EROSION DEL JURASICO INFERIOR Y SUPERIOR DE AMBIENTE CONTINENTAL Y POTENCIALMENTE URANIFERAS DE LA CUENCA DE TLAXIACO, ESTADO DE OAXACA



En resumen, son pocas las reservas probadas de uranio en México, en 1999 las reportadas en la estadística mundial, son de 1,700 t (≤ 130 \$US/Kg de U_3O_8) (Uranium, 2000). Sin embargo, se cuenta con un gran potencial de reservas que en poco tiempo podrían ser cubiertas en detalle y convertirse a reservas probadas de grandes dimensiones, teniendo como principal región a las de la Cuenca Mesozoica de Tlaxiaco (Oaxaca-Guerrero). Su desarrollo puede colocar a México entre los países con mayores reservas probadas y un mayor interés económico para el desarrollo tecnológico y aprovechamiento energético, con participación internacional.

Por lo expuesto, las regiones más favorables de México por sus condiciones potenciales son: En primer término, la Cuenca de Tlaxiaco, estado de Oaxaca y Guerrero (Mesozoico); Cuenca de Burgos, Tamaulipas (Terciario); Secuencia Formación Trancas, Querétaro (Mesozoico), las tres en ambientes sedimentarios continentales de litoral. En un segundo término, los yacimientos de uranio asociado a rocas volcánicas e hidrotermales, como los del Distrito Uranífero de Villa Aldama, Chihuahua. En tercer término, los no convencionales de San Juan de la Costa y Santo Domingo, Baja California, al obtenerse como subproducto de la roca fosfórica.

Las Fuentes Renovables Versus Nuclear para la Generación de Electricidad

Al desarrollar México la generación de electricidad basándose en la energía nuclear y renovables, en sustitución de los combustibles fósiles, estaría participando activamente al decremento de los gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 , N_2O , HFCs, PFcs, SF_6) y en condiciones de competitividad a largo plazo (figura 10 y tabla 1). De hecho, en el 2001 durante el XVIII Congreso Mundial de la Energía, se concluyó que las únicas fuentes de generación de electricidad capaces de cubrir las necesidades de un país y sin emisiones contaminantes a la atmósfera sería la nucleoelectrica y la hidroeléctrica (WEC, 2001).

Actualmente, México cuenta con un amplio potencial comercial hidroeléctrico del orden de 53,000 MW de las que se aprovecha el 17%. En geotérmica, se tienen 950 MW instalados, su potencial comercial es de 2400 MW, de estas 2000 MW son de temperatura alta ($>250^\circ$) y 400 MW de temperatura media ($250-180^\circ$). De la eoloelectrica se cuenta con 3 MW conectados al Sistema Eléctrico Nacional; su potencial comercial en el Istmo de Tehuantepec es de 3000 MW y a nivel nación de 5000 MW, las probables se estiman en 15,000 MW (SENER, 2002 y 2003).

Torres (1969) investigó los sitios ventajosos para construir plantas de generación de electricidad a base de la energía del mar, la desembocadura del Río Colorado y la zona comprendida entre la isla de Tiburón y la tierra firme de Sonora, ambos en el Golfo de California.

En suma, del conjunto de alternativas renovables para la generación de electricidad, como sería la hídrica, eólica, solar, biomasa, mareas, y geotérmica; la única que por si sola es capaz de generar electricidad en forma masiva para cubrir las necesidades de un país sería la hidroeléctrica. De estas opciones, la única que no depende de la climatología es la geotérmica. Bardwell (1981) concluye que cuando se produce electricidad empleando a la biomasa como energético, se requiere de mayor energía humana con decremento de la productividad y calidad de vida. Ahora bien, no es valido considerar que todas las fuentes de energía renovables son sustentables y de mercados de "energía verde" cuando en realidad hay varias excepciones, como son las grandes hidroeléctricas y las "granjas eólicas".

Así, las grandes hidroeléctricas son responsables del descenso de las poblaciones de peces en el Mar Negro, el Mar Caspio, La Bahía de San Francisco, Mar Mediterraneo Oriental y Golfo de México. Debido a sus graves impactos a los ecosistemas, varios estados de los Estados Unidos restringen su desarrollo y aceptan las pequeñas (<30 MW), como en Nueva Jersey, Arizona, California, Iowa, Missouri, Maine, Rhode Island. En Missouri no se acepta ninguna generación hidroeléctrica como ambientalmente aceptable. Si se generaliza su restricción en los Estados Unidos, afectaría las exportaciones de electricidad de Canadá y México al obligarlos a regresar a la mesa de negociaciones del Tratado de Libre Comercio (Knight, 2003).

Por otro lado, para intensificar la participación de las fuentes renovables como la hídrica, eólica y solar, cuyo factor de disposición es bajo por depender de la climatología, se requiere de una

infraestructura de respaldo para no interrumpir su operación. Es decir, su empleo significa duplicar la infraestructura de generación y una mayor inversión. Las tecnologías de respaldo son las que podrían operar las 24 horas del día todo el año, como son las termoeléctricas con base al carbón mineral, gas, petróleo y nuclear.

En efecto, las "granjas eólicas" requieren al instante que aminora el viento del respaldo de las termoeléctricas, comúnmente a base de combustibles fósiles que emiten gases de efecto invernadero. También por su baja disponibilidad, de un 30%, se necesita construir un gran número de unidades; por ejemplo, una planta de ciclo combinado de 1000 MW y de un 80% de disponibilidad, equivale a instalar 2,666. aerogeneradores de 1 MW. Además, para cada aerogenerador se necesita construir un camino de acceso preferentemente pavimentado, una base de cemento del tamaño de una alberca y línea de alta tensión. Lo que significa afectar grandes extensiones de terreno, impacto visual, perturbación del hábitat silvestre, alto ruido, en ocasiones muerte masiva de aves y el tránsito de vehículos pesados que contaminan el medio (Duchamp, 2002).

Finalmente, Rashad y Hammad (2000) concluyen que al emplear la generación nuclear en sustitución de las fuentes de energía a base del gas, petróleo, carbón mineral, hidráulica y eólica, se reduce en gran medida la degradación ambiental, el número de accidentes y muertes humanas, a lo largo de todas las etapas de la cadena energética. Siendo, en consecuencia, el papel fundamental de la energía nuclear la protección del ambiente global. Para el caso de México, Eibenschutz (2001) considera que el desarrollo de la energía nuclear propiciaría seguridad económica, fomento industrial y tecnológico, sustentabilidad y diversificación de fuentes.

No obstante, como lo comentan Bardwell (1981) y Bauer (1984), el desarrollo de las tecnologías de generación de energía de sustitución y diversificación, llave en mano, importadas, resultan ilusorias si no se vinculan a la inversión en la capacitación de los recursos humanos y de producción de capital propios. Siendo esencial, maximizar la participación de nuestros sectores públicos, privados y universidades en estos proyectos. De lo contrario, como lo discuten Castañeda-Pérez et al., (1984), al desarrollar un programa nucleoelectrico o carboelectrico implicaría la dependencia tecnológica y de recursos financieros de gran magnitud.

Conclusiones y Recomendaciones (Segunda Parte)

1. Por los resultados de esta exposición, bajo distintos criterios, se determina que hacia la próxima década la generación de electricidad en México basándose principalmente en los hidrocarburos, será inviable y difícil de sostener por la insuficiencia de sus reservas probadas y sus altos precios. Por tanto, es prioritario reformar el plan energético nacional al otorgándole mayor peso al empleo de la generación nucleoelectrica y de las fuentes renovables; que implican mayor progreso económico y mejoramiento ambiental, para alcanzar la sustentabilidad y competitividad.
2. La política energética, apostada en el gas natural para generar electricidad está en el umbral de la inviabilidad, por la volatilidad y alto precio del gas natural en el mercado. También por las bajas reservas domésticas de gas natural y petróleo, incluyendo sus afectaciones ambientales que provocan en la producción de electricidad.
3. Es recomendable adoptar medidas preventivas para decrementar el consumo de gas en el Sector Eléctrico Mexicano. El programa incluiría a corto plazo, la construcción de un mayor número de parques de aerogeneradores, termoeléctricas a base de energía geotérmica y biomasa. A mediano plazo, el reemplazo de las termoeléctricas que consumen combustibles fósiles, incluyendo las de ciclo combinado, por minihidráulicas y pequeñas unidades nucleoelectricas de construcción modular. Estas cinco tecnologías, pueden encarar ambas crisis, la ambiental y la de abastecimiento interno de gas natural, a costos de generación competitivos.

4. Por la experiencia que se tiene en México, a partir del descubrimiento y desarrollo de un yacimiento de uranio comercialmente explotable, de origen sedimentario y diseminado en areniscas del Mesozoico (Cuenca de Tlaxiaco, Oaxaca) y del Terciario (Cuenca de Burgos, Tamaulipas), se estima 10 años para ponerlos en explotación y obtener el Yellow Cake. No obstante, el término de 10 años se puede reducir a 6 años considerando las siguientes alternativas.
 - Primero.- Otorgar concesiones a las empresas mineras mexicanas con tecnología suficiente, adquirida del extranjero, ya sea en proyectos de coinversión o adquisición de patentes, y
 - Segundo.- Otorgar concesiones a empresas con tecnología de punta para la exploración y explotación de los yacimientos, pagando para el efecto un precio equitativo por Kg. producido de Yellow Cake, en condiciones estándares y de pureza competitiva del comercio internacional.
5. Las tecnologías de los renovables, y no obstante sus altos costos para generar electricidad, se deben impulsar para garantizar la seguridad nacional. La energía geotérmica, debe ser desarrollada al máximo ya que disminuye el nivel de riesgo del portafolio energético por no depender de la climatología y la disposición de combustibles. La energía de la biomasa, puede ser la mejor alternativa para áreas específicas del país de clima y suelos fértiles. La energía eólica, tiene importante ventaja logística al incrementar la generación de eléctrica a corto plazo, en las áreas geográficas favorables del país; aunque requiere de una planificación cuidadosa para amortiguar sus afectaciones ambientales. Finalmente, la energía hídrica debe procurarse hacia las unidades pequeñas, de menos de 30 MW de capacidad, a fin de favorecer la competitividad en la exportación de electricidad.
6. Se recomienda considerar, en los modelos económicos del Sector Eléctrico de México que el 40% de las reservas de hidrocarburos (Región Norte) no obedece a las reglas de una economía de mercado, de oferta-demanda, debido a que no están completamente desarrollados e integrados; además, se estimaron en un marco geológico que no es favorable para la explotación.

Referencias (Segunda Parte)

- [1] Arriola T. A. (2001). La Tecnología en la Estrategia de Exploración y Explotación del Gas Natural en México, el Sector Energía en México, de Cara al Siglo XXI, Instituto Mexicano del Petróleo, México.
- [2] Barbosa Fabio (2000). PEMEX: Histórico Proyecto de Producción Gasera, gas natural, México: nueva geografía de petróleo y gas, gas natural, Revista petróleo y Electricidad, México.
- [3] Bardwell S. (1981). El Modelo Econométrico La Rouche-Riemann, Revista bimestral Fusión, Vol. 1, No. 1, Enero 1981, USA, pp. 42-55, ISSN 0272-1147
- [4] Bauer M. (1984). Apertura y Presentación del Foro, Carbón y Uranio Como Fuentes Energéticas en México, Programa Universitario de Energía, UNAM, Reimp. 1990, pp. 17-18.
- [5] Bauer, M. and Quintanilla, J. (2000). Conflicting energy, environment, economy policies in México, Energy Policy, 28 (2000), pp. 321-326.
- [6] Bazán B. S. (1981). Distribución y Metalogénesis de La Provincia Uranífera del Mesozoico de México, Revista GEOMIMET, No. 112, México, pp. 65-96.
- [7] Bazán B. S. (1990). Subducción Paleogénica en la Margen Oriental de México, X, Conv. Geol. Nal, Resúmenes, México.
- [8] Bazán B. S. y Bazán Perkins (2001). El Impacto en el Chicxulub, Referencias Geológicas que destruyen la teoría de la extinción de los dinosaurios por impacto de un meteorito, primera parte, Revista GEOMIMET, No.233, México, pp. 6-26.
- [9] Benavides G. L. (1956). Notas Sobre la Geología Petrolera de México, XX Congreso Geológico Internacional, México, pp. 350-562.
- [10] BP (2001, 2002, 2003). Statiscal Review of World Energy, 1965 to 2000, 1965 to 2001, 1965 to 2002.
- [11] BP (2005). Statiscal Review of World Eneergy 2005.
- [12] Campbell C. J. (2000). Peak Oil-a Turning Point for Mankind, Presentation at the Technical University of Clausthal, December.
- [13] Castañeda P. M. (1986). La Producción de Uranio en México, Recursos Uraníferos, Programa Universitario de Energía, UNAM, pp.165.
- [14] Castañeda P. M. Quintanilla J., Medina M. (1984). Carbón y Uranio como Fuentes Energéticas en México, editores y coordinadores, Programa Universitario de Energía, UNAM, Reimp. 1990, México, pp. 9-15 y 19-37.

- [15] Comisión de Energéticos (1976). Propuesta de Lineamientos de Política Energética, Secretaría de Patrimonio Nacional, Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Energía Nuclear, Petroleos Mexicanos, Gobierno, México, pp. 97.
- [16] De la Fuente y Mejía I. (1969). Problemas de la Exploración Petrolera de la Cuenca de Chicontepec, Seminario Sobre Exploración Petrolera, IMP, PEMEX, México, pp. 31.
- [17] Duchamp Mark (2002). Las Granjas Eólicas Como una Desgracia para el Paisaje, Fundación Argentina de Ecología Científica, España.
- [18] EIA (2003). World Crude Oil and Natural Gas Reserves, Most Recent Estimates. International.
- [19] Eibenschutz J. (2001). Energía Nuclear, Programa Universitario de Energía, IV Congreso de la Asociación Mexicana Para la Economía Energética, UNAM, México. pp.19
- [20] Escofet R. A. y Castillo F. E. (1984). El Uranio en Méxco, carbón y uranio como fuentes energéticas en México, Programa Universitario de Energía, UNAM, Reimp. 1990, México, pp. 55-67.
- [21] Fernández Zayas J. L. (2003). Posibilidades Actuales del Hidrógeno Como Energético en México, Director General de Investigación y Desarrollo, SENER, México.
- [22] Gerber C. R., Hamburger R. y Seabrook H. E. W. (1966). Plowshare, Comision de Energía Atómica de los Estados Unidos, USA, pp. 58.
- [23] González-Reyna J. (1956). Riqueza Minera y Yacimientos Minerales en México, Banco de México, S.A., pp.498.
- [24] Herman J.. A. A., Lowe J. J. and Schoff R. L. (2001). The Economics of Gas Turbines in the PJM Region, Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, USA, pp.135.
- [25] INEGI (1993). Estadísticas Históricas de México, Tomo 1, México, pp. 596.
- [26] INEGI (2001). El Sector Energético en México, Estadísticas 2001, México, pp. 289.
- [27] INEGI (2002 y 2003). Banco de Información Económica, Oferta Interna de Energía Primaria, México.
- [28] Knight D. (2003). Estados Unidos: Canadá Resiste Plan de Energía Verde, Medio Ambiente y Desarrollo, Tierraamérica.
- [29] Muñoz L. (2003). Cierran el Gas a CFE, comentarios de Eduardo Andrade (AMEE) y Elias Ayub (CFE), 02-02-2003, Reportaje Mayela Córdoba, fuente Intéllite
- [30] PEMEX (2000, 2001, 2002 y 2003). Memorias de Labores 1999. 2000, 2001 y 2002, Resultados Operativos y Financieros, México.
- [31] PEMEX (2001 y 2002). Anuario Esatdístico 2001 y 2002, informes, México.
- [32] PEMEX (2001). Reservas del 2000, Anuario Esp, Enero del 2001, Petroleos Mexicanos, México.
- [33] Rashad S.M. and Hammad F.H (2000). Nuclear Power and The Environment Comparative Assessment of Environmental and Health Impacts of Electricity-Generating Systems, Applied Energy, V. 65, Issues 1-4, April 2000, pp. 211-229.
- [34] Salas G. P y Castillo N. F. (1988). Geología de los Yacimientos Uraníferos en México, Geología Económica de México, Ed. Fond. Cult. Econ., pp. 219-224.
- [35] SENER (2001). El Futuro del Sector Eléctrico Mexicano, Secretaría de Energía, México.
- [36] SENER (2002 y 2003). Prospectiva del Sector Eléctrico 2002-2011 y 2003-2012, Secretaría de Energía, México.
- [37] SENER (2002). Prospectiva del Mercado del Gas Natural 2000-2009, Secretaría de Energía, México, pp. 183.
- [38] Suárez C. J. J. (2003). Padece Declive Cantarell, Economía y Finanzas, Periódico Reforma, reportaje de Shields David, 20 Enero del 2003, PEMEX, México.
- [39] Torres H. F. (1969). Energía y Electricidad, Revista Ingeniería, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, vol. XXXIX, núm.1, pp. 69-82.
- [40] Uranium (2000 y 2001). Ressources, production et Demande, OECD, Agence Internationale de l'Energie Atomique.
- [41] Viqueira L. J. (1979). Energéticos: La Perspectiva para Después del Petróleo, Revista Ingeniería, Facultad de Ingeniería, UNAM, vol. XLIX, núm. 4, México, pp. 11-21.
- [42] WEC (2001). Borrador de Conclusiones y Recomendaciones, del 18 Congreso Mundial de la Energía, World Energy Council, Argentina.
- [43] Yáñez-Mondragón M. E. (2001). La Región Norte en el Umbral del Siglo XXI, PEMEX, El Sector Energía en México.

III. 4 TRANSITION STRATEGIES FOR A HYDROGEN ECONOMY IN MEXICO

Sergio Dale Bazán-Perkins

División de Estudios de Posgrado

Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, México, DF.

bazanperkins@hotmail.com

Abstract. The economic viability of the energy sector is fundamental for the development of Mexico. The main objective of the economic sectors is to reduce the cost of energy production. The application of the nuclear and renewable energy sources can be developed in Mexico with a limitless potential for the electricity production, heat, hydrogen and seawater desalination. Without of Greenhouse Gases (GHG's) emissions and under acceptable economic conditions. For the future development of this potential, it is required to make deep institutional changes by state promotion and with the public acceptance. However, in the present is where we most to settle down the bases for a new energy politics by means of appropriate clear objectives. For these intentions it is required the participation of the universities, institutions, public administration and companies. The proposed energy program until the 2030 includes mainly for the period of the 2007-2015 expansion of the electrical sector using the renewable energy resources, hydro, geothermal, biomass and wind, for being more competitive for the country instead gas-based combined cycle plant. This paper analyses the benefits to develop the power sector mainly using High Temperature Gas-cooled Reactors (HTGR's), to 2015-2030, in adding to renewable power technologies.

Key words: Zero emissions, Renewable, Nuclear, HTGR systems, Electricity, Hydrogen, Cogeneration, Desalinization

1 Introduction

Since the first oil embargo in the early 1970s, the preoccupation for the security of the power provision has increased in the world. The developed countries chose to diversify the power supply. Also, the atmosphere acidification generated by fossil fuels and their consequences in environment and human health deterioration, incentive new technologies for the reduction of the emissions of NO_x, SO_x and NH₃ (United Nations 1979).

Towards 21st Century, the worldwide efforts to reduce the Greenhouse Gases (GHG's) effect, CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs and SF₆, have become the main subject of the political agendas international. Beér (2000) expressed that the control for these emissions, is centered mainly in the technologies that allow diminishing those of CO₂.

The initiative to reach "zero emissions" is new and appears assumed by a growing of number of nations to reach a sustainable society (Suzuki 2002). This initiative was presented in the University of the United Nations of Tokyo in 1994. The proposal included the recycling of industrial products not to create wastes and contamination, by means of the use of new technologies and the natural systems like model. By means of this political one plans to reach concrete objectives as "zero emission power plants", "zero loss of potable water", "zero solid wastes", among others more (United Nations 1996).

Otherwise, Williams (2001) exposed the causes by which at the beginning of 21st Century, the nations chose to promote the sustentability of their economies with the policy of "zero emissions". This is, the necessity of reduction of emissions of gases of effect hothouse, using alternative energy to the hydrocarbons, being aided by technological advances that allow to cover the increase in energy demand.

One of the main economic reasons that have propitiated the employment of new energy sources for the transports sector, is due to the high prices of the petroleum have been accentuated from 2000 (EIA, 2006). In 1999, Iceland astonished to the world when announcing the creation of an economic sustainable of low carbon dioxide emissions to the using the hydrogen, in a term of 30 years. The hydrogen will produce it in large-scale, using the hydro and geothermal power stations (WI, 2002).

Due the increasing interest of several nations to use hydrogen in their economies, in the Century present, multinational organisms have been created to accelerate their implementation. Like the International Partnership for the Hydrogen Economy (IPHE). The European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform (EU TP H-FC) and Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF). In case of Mexico, the first steps to reach the future potential which is in hydrogen with own technologies, develop to the civil associations, integrated by universities, research centers, private institutions and companies. Like the Mexican Society of Hydrogen A.C. (SMH, 1999) and the National Network of Hydrogen A.C. (RNH) according to Fernández-Zayas (2005).

Nevertheless, the research of Dunn (2002) also indicates that those initiatives of technological investigation and isolated promotions they are not enough to reach a sustainable hydrogen economy. The governments represent the essential part to implement decisive public policies and the educational efforts that accelerate the transition toward sustainable hydrogen economy. Barry & Abhijit (2004), conclude that for this transition, the main requirement it is to have a competitive economy. As well as, to have a long-term strategic energy plan, accepted by the consumers.

The present paper includes a series of strategies for the future development of the energy sector of Mexico. It outlines as objective the development of a sustainable economy in Mexico and lowers the carbon dioxide emissions significantly. In this sense, the production of electricity, cogeneration, seawater desalination and hydrogen, will be able to be obtained from the nuclear energy and the renewable ones. To reach these objectives towards the 2030, it is required to modify the program of expansion of electrical sector 2005-2014 and of other inadequate proposals. Due to economic inviability for the country of continuing installing gas based Combined Cycle power plant (CCPP). To reach these objectives will require of big technological, social and political transformations.

2 Economy of hydrogen with zero emissions

The development of an economy of hydrogen not necessarily it implies the reduction of the polluting emissions; it depends on the technologies used to produce it. The countries that have big commercial deposits of coal, like the United States, India and China, they promote the coal gasification, as energy source, as much for their CCPP and possible future hydrogen production, causing polluting emissions. The technologies of "zero emissions" to obtain hydrogen are mainly: Of the biomass by means of pyrolysis, as well as of the water by electrolysis or the thermochemical processes, witch nonfossil energies.

The technologies to produce energy with "zero emissions" appear examined in detail by Williams (2001), concludes that the nuclear and renewable power, allow reaching a sustainable economy. However, he puts in doubt this objective can be reached by dioxide capture and geologic storage, when using the fossil fuels. Equally, Miller & Romney (2004) discussing the use of hydrogen as fuel in the transport sector, they conclude that transition to a sustainable economy it happens if three conditions exist: 1) Zero emissions. 2) High availability and accessibility of the matter of where the hydrogen will be obtained, and 3) Should possess, a system of continuous primary energy, in big quantities and of low cost. They conclude that the two-first are only possible when the hydrogen is obtained from the water. The third criterion, it only happens using the nuclear power.

3 Security of energy supply in Mexico

In the world, the interruptions of the electric power supply associated to the climatic change are more frequently and with greater intensity. The reason derives from the insufficient infrastructure in power plants that are not sensitive to the climate variability. Fore example, in the American Continent, these inefficient patterns cause periods of multiple power blackouts in: California (2000-2001), Brazil (2001-2002), Argentina (2004), Chile (1998-1999 and 2003-2005) and Uruguay (2005-2006). In order to solve this problem, they have considered nuclear power generation.

Therefore, the dysfunction for the global climatic change has become a decisive factor in the selection of the technologies for the energy offer. When categorizing those for their sensibility to the climatology, it is found that the most sensitive correspond to most of the renewable energy, as the hydro, wind, waves and tides. The fossil fuels would be in an intermediate position. Then, the sources of energy of smaller vulnerability to climatic change are the nuclear, geothermal and biomass under special conditions.

Hore-Lacy (2002) exposed the importance of the nuclear energy in countries that consider the transition towards renewable energy system. He argues that in the power efficient systems, nuclear and the renewable they are complementary. The nuclear one contributes stability, viability and security to provide base-load electricity. This does not happen when the renewable energy that depends on the climatology is used. By the same, the nuclear technology does not count on the flexibility to cover the resounding variations with the electrical demand; the hydropower plan can cover these variations with high efficiency.

In fact, in Mexico to the restricting the development nuclear energy, limited employment of the renewable energy sources. It is a strategy because when integrating them, the high costs of the renewable ones are compensated with the low costs of the nuclear one. With both technologies could be produced advanced fuels to vehicular, hydrogen and the bio-oil (Bazán-Perkins 2005). Due to the high capacity factors of nuclear, geothermic and biomass energy, their employment will allow supporting the renewable energy whose operation depends of the variations of the climate, to produce electricity, desalination of the seawater and the hydrogen for the transport. For that exposed, it is considered that when maximizing the use of these three energy sources in Mexico, will be able to have security in the base-load energy, with low carbon dioxide emissions and cost competitive electricity.

3.1 Energy-economic model

In Mexico, the presage of the long-term national energy consumption is difficult, due to the uncertainty of the economic growth. In passed decades, the high discrepancies among the predicted energy demand and carried out, they were due to the recurrence of economic crisis, as those of 1976, 1982, 1985-1986, 1987 and 1994-1995. For this Century, the growth of the Gross Domestic Product (GDP) is smaller of the one that was projected. This way, the Sener (2005) exposes that from the 2001 the growth of the national electric demand has decelerated significantly, causing that the generation capacity is bigger to required optimal level. All these presage is still a very imperfect undertaking, they have considered the prospective growth of the GDP, population, housing, prices of the fuels, inflation, exchange rate, energy saving, pluvial precipitation, among other more.

On the other hand, econometric models that they use a number smaller than variables, has been more effective in recent years than in the past, for the predict of the growth of the national electric demand to medium and long term. When they based on historical data, accumulated during more than 100 years. By means of econometric methodology, toward the year 2030 the demand of the Mexican electric system will be of about 537,000 GWh, considering the historical trajectory from 1900 to 2005. For the national transport sector, is considered that toward the 2030 the vehicular park. For the national transport sector, is considered that toward the 2030 the vehicular park will be 40.0 million vehicles, by means of historical data of 1970 to 2005. The effectiveness of these projections is evidenced by its high correlation coefficients, of 0.982 and 0.956, respectively.

The planning process for the expansion of the Mexican electric sector 2007 to 2030, considered for this paper, it includes the obtaining of the optimal mix of energy resources for electricity generation and their technologies, that guarantee the long term energy supply and at the smallest cost. This way their synergies are developed. According to Massé & Gibrat (1957), Carpentier & Merlin (1982) and Dechamps (1983), the optimal mix of energy resources that minimizes the costs of production of a derived electric system of a single producing agent, like it is the case of Mexico, can be obtained by mathematical models of programming. Therefore, the proposal for the case of Mexico derives of a conventional stochastic programming-based methods. The database includes the information projections, for each one of the projected years. In general, during the next decades the new energy

plants that take advantage of the renewable and nuclear energy, will continue reducing their production costs. Long term, It is expected that these decrements are bigger for the technologies than use solar and tidal power (RWG, 2004; Hirst, 2006).

For example, in Table 1, they are illustrated by technological and economic parameters of new power plants of the year 2005. Of these results, we can appreciate that the new technologies that take advantage of the nuclear, geothermal, biomass and wind energy, would be the most competitive. Of these four, the biggest advantages are for the nuclear energy, when minimizing the electric systems production cost. Currently, the Mexican electric system doesn't include the employment the energy sources derived from biomass, tides and solar (Figures 1). For the commercial production of electricity from nuclear energy, Mexico has a single plant located in Laguna Verde (Veracruz), integrated by two BWR-5, each one with capacity of 680 MW.

| New power plant | Capacity power factor (%) | Total lifecycle leveled cost (¢US/kWh) ^a |
|---|---------------------------|---|
| ^c Nuclear III Gen. (2 x 1400 MW) | 93.0 | 3.4 |
| Geothermal power (4 x 26.60 MW) | 80.0 | 4.5 |
| ^c Thermalelectric-biomass (1 x 1 MW) | 80.0 | 4.0-9.0 |
| Wind power (7 x 0.750 MW) | 40.0 | 5.0-6.0 |
| ^b Combined cycle gas (1 x 585 MW) | 80.0 | 5.09 |
| Thermalelectric Coal (2 x 350 MW) | 85.0 | 5.4 |
| ^c Tide power (1 x 1 MW) | 40.0 | 6.0-9.0 |
| Thermalelectric Oil (2 x 84 MW) | 80.0 | 8.6 |
| Hydro power (3 x 200 MW) | 38.0 | 9.9 |
| Thermalelectric-gas (1 x 85 MW) | 25.0 | 12.3 |
| ^c Solar power, PV (1 x 0.5 MW) | 26.0 | 35.0 |

^a Life time 30 to 40 years and capital cost 10 to 12%.

^b Natural gas with subsidy

^c These technologies are not still integrated to the Mexican Electric Sistem

Table 1. Technical and economic parameters of new power units, in 2005 (Elaborated with data of COPAR, 2006; Kutscher, 2006; RWG, 2004; NEI, 2006)

The linear programming model, for this study it contemplates the employment of new power generation technologies, using physical life of 30 to 40 years and capital cost 10 to 12%. The equations of balance and restrictions of the system are defined by the maximum and minimum benchmarks of the variables of decision. In their group, they associate to restrictions of the power resources, restrictions of the plant factor (technological and operative), restriction of costs, load and peak reserves, balance of the offer and demand of flow of power. The model is applied for every projected year, includes the parametric analysis of different scenarios. These variables have lineal restrictions, and they structure their participation in an electric system. In symbolic terms:

$$\text{Min } z = f(x_1, \dots, x_n) = (\text{PLLC}_1)X_1 + (\text{PLLC}_2)X_2 + \dots + \sum (\text{PLLC}_n)X_n = \text{PLLC}_i X_i \text{ from } i, j = 1 \rightarrow n$$

- Linear constraints

$$a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1N}X_n \leq b_1$$

$$a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2N}X_n \leq b_2$$

•

$$a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mN}X_n \leq b_m$$

- And the variables may be located between the extreme values

$$x_1^{\min} \leq x_1 \leq x_1^{\max}$$

$$x_2^{\min} \leq x_2 \leq x_2^{\max}$$

•

$$x_N^{\min} \leq x_N \leq x_N^{\max}$$

$$x_1 \geq 0 + x_2 \geq 0 + x_3 \geq 0 \dots x_N \geq 0$$

X_j : variables of decision, $j = 1, 2, \dots, n$; n : number of variables; m : number of restrictions; a_{ij} , b_i and LEC , $i = 1, 2, \dots, m$, are well-known constants.

PLLC 1, PLLC 2, ... PLLC n correspond to the Projecting Lifecycle Levelized Cost for each technology for electric generation. The $x_1, \dots, x_n, x_J \geq 0, J = 1, 2, \dots$, represent the installed capacity of each technology for electric generation. The restrictions, a_1N, a_2N, \dots, a_mN , are the technological coefficients that use the same type of power source. Then, b_1, \dots, b_m , are the vectors of terms to the right or constant associated to the demand, and are limited by the total capacity of each technology to supply electricity.

4 Renewable power program for 2007 to 2015

Mexico enters a new energy economy; its model of expansion of the sustained electrical sector mainly with the natural gas is not sustainable. The nation requires of a new energy program that breaks the scheme that lasts from principle of the 70's, in where exists an inadequate optimal mix of power sources for the electrical system (Eibenschutz et al., 1976). In effect, the employment of the fossil fuels is favored and ostensibly decreases the participation of the sources of energy non fossil (Figure 1). All this, causes high production costs for the Mexican electric system, as well as the necessity of the subsidy to price of the electricity for the consumers. Also, it doesn't allow the diversification of energy sources, the economic growth and deteriorates the country's environment.

Along with the environmental reasons, the economic ones are. In Mexico, it has not been a suitable option to continue the increase the use of fossil fuels for the electric power, due the high and volatile hydrocarbons price and their small commercial reserves in the country. The mineral coal deposits, they have been of low quality and high use costs. Its use for electrical sector expansion, implies an increase in import of fossil fuels and increased energy dependence. In fact, since the year 2000 hydrocarbon proven reserves of the country, are insufficient to sustain the 30 year-old operative life of new thermoelectric plants, using these fuels. For the 2005, in agreement with statistical data of BP (2005) and the INEGI (2006), proven natural gas reserves in Mexico are sufficient for about 8 years (14.9/1.75 Tpc). The proven crude oil reserves would last 10 years (14.6/1.46 barrels) (Figure 2).

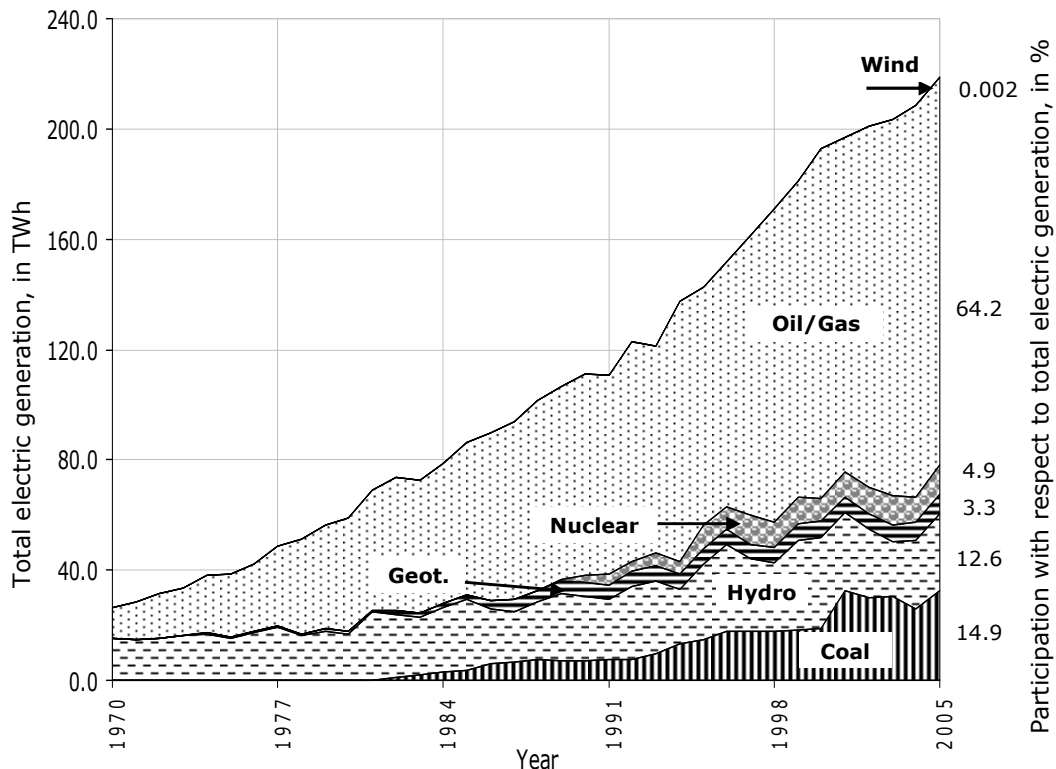


Fig. 1. Electric power generation in Mexico 1970 to 2005, is based mainly on hydrocarbons (Elaborated with data of CEF, 2001; Sener, 2003-2006).

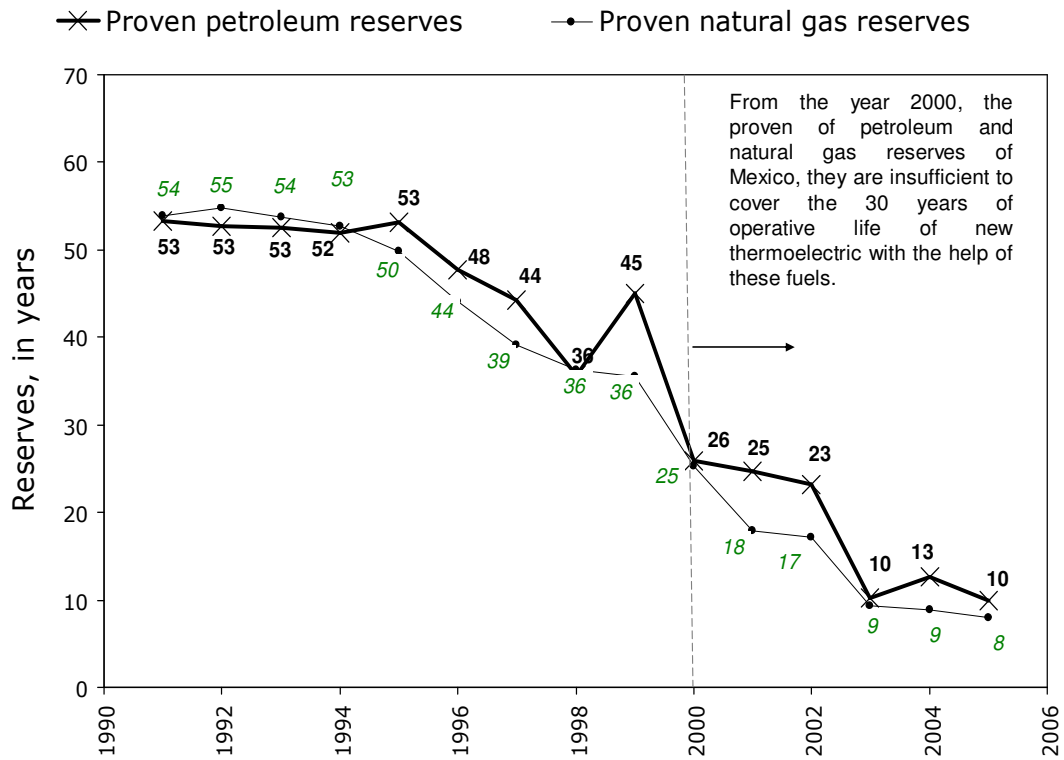


Fig 2. Proven crude oil and natural gas reserves in Mexico 1991-2006 (Elaborated with data of PEMEX, 2001-2005; BP 2005, INEGI, 2002-2006).

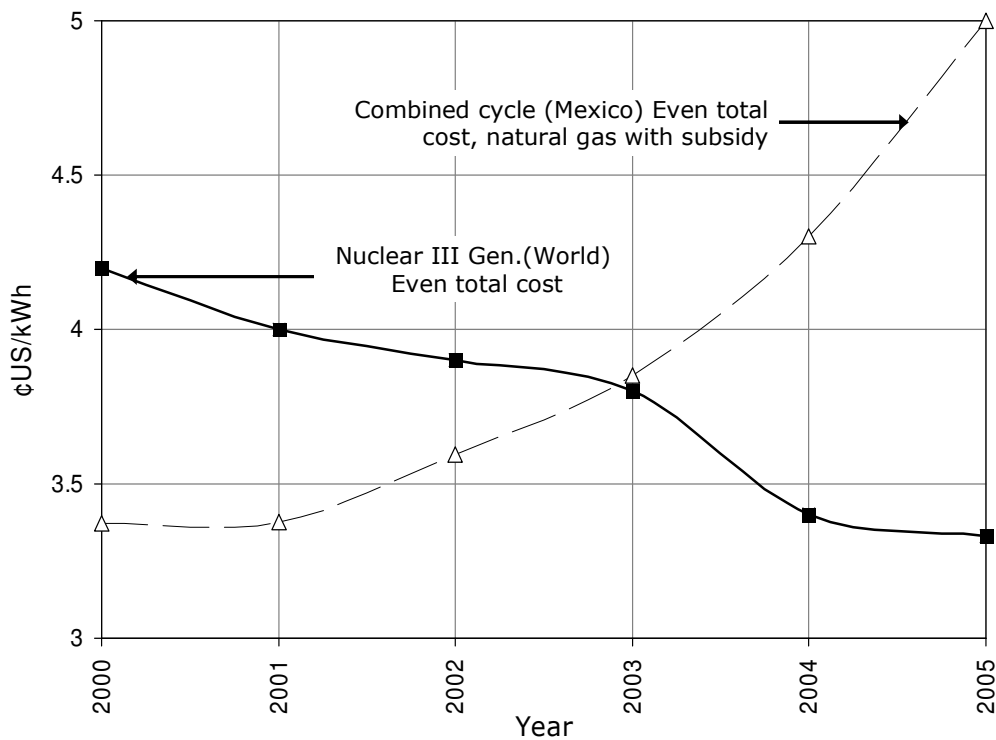


Fig. 3. Even total costs, gas-based combined cycle plant in Mexico and Generation III reactors of other countries, 1995-2005. Cost of Capital 10-12% (Elaborated with data of Kadak, et al., 1998; GE, 2000; COPAR, 2001-2006; WNA, 2003; UC, 2004)

Since 1998, the expansion of the Mexican electrical sector was developed mainly using CCPP. This way, starting from 2004 most of electricity of Mexico it is sustained mainly by natural gas. Actually, it is not viable for the expansion of the electrical sector for the inadequacy of proven reserves. Also the high prices of the natural gas in the national market, the costs of production of CCPP in Mexico grow exponentially from the year 2002

From the year 1990, the CCPP in Mexico lost their competitiveness with respect to the amortized nuclear plants in the United States. Similarly, in 1998, new geothermal power projects in Mexico they were more competitive than CCPP, situation that continues until the present time (Hiriart & Andaluz 2000; Bazán-Perkins 2004). Also, since 2003, the CCPP that operate with subsidized natural gas prices in México, they have a bigger level total cost of the electric production that new nuclear power plants of other countries (Bazán-Perkins 2005) (Figure 3).

An additional comparison on the lost one of competitiveness of the CCPP with respect to the renewable energy, like the geothermal one, biomass, hydro and wind, is demonstrated during 2002. For this year, the level cost of the electric production for CCPP is 3.8 ¢US/kWh (COPAR, 2003). At the same time, according to Mexican's Government (2002) the new projects of renewable energy obtain the following costs: geothermal 3 to 5 ¢US/kWh, minihydraulics 3 to 20 ¢US/kWh, wind 3.5 to 4 ¢US/kWh, biomass 4 to 6 ¢US/kWh. Being the solar, from 25 to 150 ¢US/kWh, the one that obtain the biggest costs.

In sum, the fall in proven hydrocarbon reserves in the country and its high prices, imposed paradigm shift for model of the Mexican power sector. Conjuncture that represents enormous possibilities so that Mexico develops to other technologies selections, for the energy production, based on the renewable, nuclear energy and hydrogen. When implementing their use, would be reduced or annulled greenhouse gas emissions, creating as well new industries and greater opportunities to the national technology (Fernández-Zayas 2001, 2003; Bazán-Perkins 2004, 2005).

In other words, the national energy program for electrical sector expansion, based on the installation of CCPP, represents commitments and different fastenings to the national interests. It avoids the economic growth, reducing social progress and environment is deteriorating. The most worrisome scene is in which it causes the fast exhaustion of the proven reserves of natural gas required for the economic sectors of the country (Bazán-Perkins 2006).

That is, in the measurement that are increased the participation of nuclear, geothermal and biomass energy, the electric power production costs of Mexico would be reduced and the security of the electrical system would be increased. Anther consideration is the use of hydropower, the data reported by COPAR (1997-2006); determine that level total costs of production of hydropower are greater to the CCPP. Nevertheless, from a macroeconomic perspective the hydroelectric power are more competitive, when avoiding the import of great volumes of natural gas. (Table 1, Figure 2 and 3).

Therefore, a change is required in the Mexican energy sector, congruent with the necessities of the country, the tendencies of the technological advances and the worldwide markets. In order to raise the competitiveness and innovation the Mexican energy sector in a short time ago, if from now on the efforts are canalized to invest in the renewable energy and the nuclear one. In effect, the best strategy is to create for each nonfossil energy sources, his own economy. This excludes to install new thermoelectric energy obtained from coal, petroleum and natural gas.

During the period of 2007-2015, the proposal included to use renewable energy for the expansion of the Mexican electrical sector. These sources include hydro, geothermal, wind and biomass power. Inside these four energy sources, it is required mainly hydroelectric power (Figure 4). At the same time, it would be developing the new human resources training, to develop plans and contracts for new nuclear power plants. The final decision, to modify the present power policy must be by means of the presidential initiative.

Besides, during this period, would be focused to the economic evaluation of the uranium deposits of the country. The most favorable regions in Mexico based on their potential conditions, are: In the first term, the Tlaxiaco Basin, state of Oaxaca and Guerrero (Mesozoic); Burgos Basin, Tamaulipas (Tertiary); sequence Trancas Formation, Querétaro (Mesozoic), the three in sedimentary environments of continental coastline. In a second term, uranium deposits associated with volcanic rocks and hydrothermal, how those of the uranium mining in the Villa Aldama, Chihuahua. In third term, non-conventional uranium deposits of San Juan de la Costa and Santo Domingo, Baja California, when being obtained as a by-product from phosphate rock (Bazán-Perkins, 2005).

5 Nuclear and renewable power program for 2015 to 2030

After the period of 2015 to 2030, the Mexican electrical sector must reach a high level of economic viability, without polluting emissions. This is, to maximize the participation of the renewable energy in Mexico, to reach the energy autonomy and competitiveness; it would be by means of a mix of renewable and nuclear energy. To arrive at this objective, is required that its expansion comes mainly from the nuclear one and the renewable ones. According with the plan, thermoelectric plants ones with fossil fuels would be substituted progressively in their entirety before the 2030. This proposal represents to reach the sustentability after the Mexican electrical industry, using the technological innovations.

The data in Figure 4, shows the results of the optimal mix of generation sources of the Mexican electrical system in the year 2030, minimizing the production costs. In general, this mix would consist of a 57% of nuclear power and 43% of renewable energy (Table 2). Then, during the 2015 to 2030 the total capacity of the new nuclear power plants fore the production of electricity is of the order of 36,000. MW. In this scheme, is considered the extension of the operative life of the nuclear power plant of Laguna Verde (Veracruz) to 60 years. The nuclear technology strategic would be integrated with small modular High Temperature Gas-cooled Reactors (HTGR's), as the one Pebble Bed Modular Reactor (PBMR) and Gas Turbine Modular Helium Reactor (GT-MHR). In addition to the HTGR`s, are more attractive by inherent safety characteristics and efficiency operative (Fujimoto et al., 2004; Nakagawa et al., 2004).

According to DOE (2002), PBMR and GT-MHR, are within the 16 technologies of Third Generation that GIF (Generation IV International Forum) recommends for its international implementation of the 2002 to 2015. Tuohy (2006) exposes that new version of the PBMR's, it can be categorized as a first commercial Generation IV reactor, by its technological characteristics of sustentability. An analysis by Bazán-Perkins (2005), of the economic viability of nuclear power plants of III, III+ and IV Generation, concludes that the PBMR`s could be a the main technological option to implement in Mexico.

In fact, international interest in HTGR technology has been increasing in recent years due to high efficiency, cost effective electricity generation. Appropriate for the conditions in developing countries. Several international research and development as well as power projects are under way in China, France, Japan, South Korea, Russia, South Africa, USA, European Union and others, for nuclear hydrogen and nuclear desalination applications (Methnani, 2006).

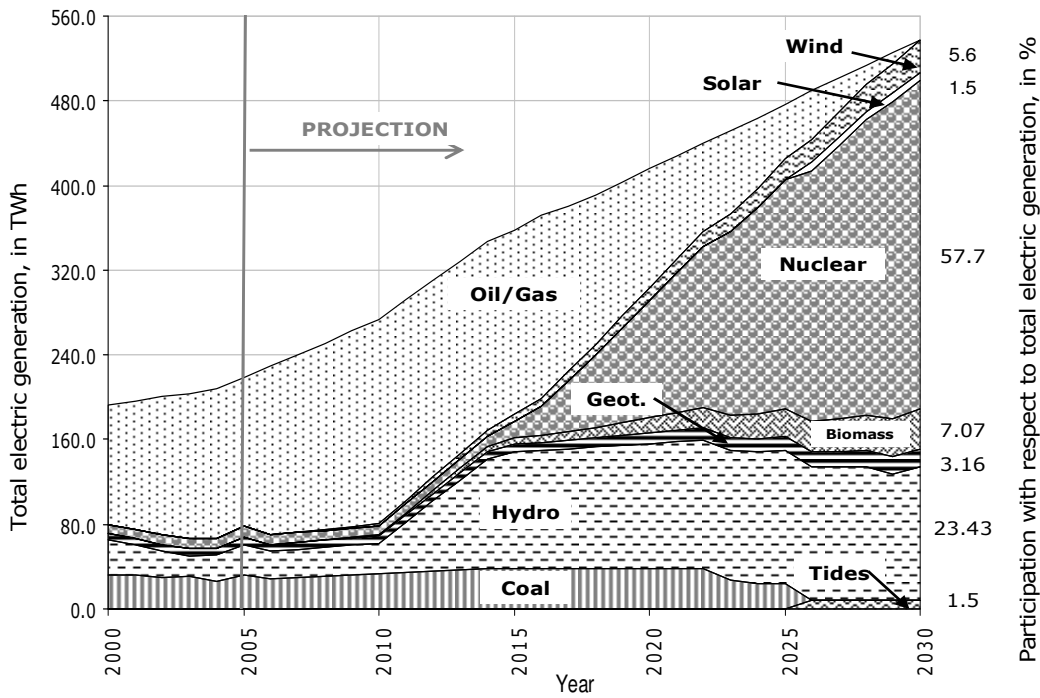


Fig. 4. Proposal for the expansion electric power generation in México 2007-2030

| Energy resources | Year 2030 | |
|------------------|--------------------------|---------------------------|
| | Optimal power mix, in MW | Optimal power mix, in GWh |
| Coal | 0.00 | 0.00 |
| Oil | 0.00 | 0.00 |
| Gas | 0.00 | 0.00 |
| Nuclear | 38,000 | 310,000 |
| Geothermal | 2,400 | 17,000 |
| Biomass | 5,400 | 38,000 |
| Hídrica | 38,000 | 125,850 |
| Wind | 10,000 | 30,000 |
| Solar | 3,500 | 8,000 |
| Tide | 2,300 | 8,000 |
| Total: | 99,600 | 536,850 |

Table 2. Optimal mix energy resources: minimizing the overall cost with "zero emissions" proposed for the electric sector of Mexico, at the 2030.

In summary, the new technology of HTGR's represent a strategic advantage for Mexico. This due to its high versatility, modular construction and significant reducing costs, for production of electricity co-generation, seawater desalination and hydrogen. Still more, its viability is in the program to standardize its construction, according to the required specific necessities for the electrical, transportation, industry, agricultural and residential sectors. Conclusively, for the case of Mexico in where the production costs of the hydroelectric ones are elevated, the small reactors of modular construction could represent the future towards great operative and economic advantages. When settling next to the main regions of consumption, they would make the electrical office more efficient, to cause the saving of energy and water. All this in order to lower or to reduce the production costs of the electrical system, due to the reduction of the hydroelectric ones.

The proposal for the expansion of the Mexican transport sector 2007-2030, that it bears to reach "zero emissions" toward the 2030 using the hydrogen, it would require starting from the 2015 the installation a new nuclear capacity of 4050 MW per year. Then, toward the 2030 with an installed capacity of 64,800 MW of HTGR's coupled with thermochemical plants to drive a sulfur-iodine (SI), to obtain a production of 21,600 t/day of hydrogen that would cover the operation from about 40.0 million vehicles to base combustion cells.

7 Northwest region, opportunity to Impel the new clean energy technologies

The Northwest region of the country, embracing the states of Baja California, Sonora and Sinaloa, like an arid and uneven region, it could impel to their barely developed economy. When taking advantage of to their great potential of renewable energy geothermal ace the one, solar, wind and tides. Also, by means of the use of non-conventional uranium deposits of San Juan de la Costa and Santo Domingo in Baja California, where uranium would be recovered as a byproduct of phosphoric acid, in the exploitation of the phosphoric rock (Escofet & Castillo, 1984; Castañeda, 1986; Salas & Castillo, 1988; Bazán-Barrón, 1992).

In fact, the whole Mexican territory claims the uses of the nofossil energy. Therefore, by means of the external trade Mexico, will have the opportunity of accelerating the technological development of the clean energy, associated to the renewable ones and the nuclear one (PBMR and GT-MHR). In particular, can be potential exporter of the range of energy products required by the market of United States, great consumer of electricity, cogeneration, drinking water and in the future the hydrogen.

8 Conclusions

In the next years, Mexico it will have to make important decisions in their energy sector. Before the exhaustion of its proven reserves of hydrocarbon and their inviability from the year 2000, to use it as main energy source in the expansion of the electrical sector. The new plan should use the domestic energy resources, in where the nuclear and renewable energy and the hydrogen are acquiring greater importance.

Consequently, it is required of a national program of hydrogen, that it should be included in the National Plan of Development of Mexico, for its production, storage, transport, distribution and use. Within a development chronogram of long term. This including promotion, formation of specialized human resources and financial supports. This program must be in revision periodically by the Senate and Deputies House. The program must include the participation with the international organisms that promote the sustainable economic development with very low carbon dioxide emissions.

References

1. Barry D. & Abhijit B., 2004, *Energy Policy*, 34, 781
2. Bazán-Barrón S., 1992, *GEOMIMET*, 177, 39
3. Bazán-Barrón S., 1994, *El Universal Newspaper*, 4 oct., Mexico
4. Bazán-Perkins S., 2004a, *Geos*, 24, SS3-37
5. Bazán-Perkins S., 2004b, *Geos*, 24, SE15-14
6. Bazán-Perkins S., 2005, ISSN 1405-7743, VI
7. Bazán-Perkins V., 2006, *Edition EÓN*, 41
8. Beér J., 2000, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 26, 301
9. BP., 2005, *Statiscal Review of World Energy 2005*
10. Carpentier J. & Merlin A., 1982, *Energy Systems*, 4, 11
11. Castañeda P., 1986, *Programa Universitario de Energía*, UNAM, Mexico
12. CEFP, 2001, *Deputies House, H, CEFP/051/2001*, Mexico
13. COPAR, 1998-2006, *CFE, Table A.1*, Mexico
14. Dechamps C., 1983, *Hemisphere Publishing Corp, USA*, 2001
15. DOE, 2002, *GIF-002-00*
16. Dunn S., 2002, *Int. J. Hydrogen Energy*, 27, 235
17. EIA, 2006, *Annual energy outlook 2006, AEO2006*, USA
18. Eibenschutz J., Guillen S. & Fernández-Zayas J., 1976, *SePaNaI, Energy Commission, Mexico*
19. Escofet RA. & Castillo FE., 1984, *PUE, UNAM, México*
20. Fernández-Zayas J., 2001, *Cuaderno FICA, 1*, Mexico
21. Fernández-Zayas J., 2003, *Sener, Morelos, Mexico*
22. Fernández-Zayas, J., 2005, *May 18, Reforma Newspaper, Mexico.*

23. Fernández-Zayas, J., 2006, Mexican Academy of Science, AMC/08/06, Mexico
24. Fujimoto N., Fujikawa S., Hayashi H., Nakazawa T., Iyoku T., & Kawasaki K., 2004, IAEA-TECDOC, 899, 15
25. GE, 2000, Advanced Boiling Water reactor general, plant description
26. Hiriart G. & Andaluz J., 2000, World Geothermal Congress 2000, Japan
27. Hirst N., 2006, OECD/IEA, Tokyo, October 10
28. Hore-Lacy L., 2002, Green Books
29. INEGI, 2002-2006, Bank of economic information, Mexico
30. Kadak A., Ballinger R., Alvey T., Kang C., Owen P., Smith A., Wright M. & Yao X., 1998, MIT NED
31. Kutscher C., 2006, Aspen Climate Action Conference, NREL, October 12
32. Massé P. & Gibrat R., 1957, Management Science, 3, 149
33. Methnani M., 2006, IAEA, TWG-GCR, HTGR, Activities
34. Mexican's Government, 2002, Sener-Gtz, ISBN 970-9983-07-5
35. Miller A., Romney B. & Duffey, 2004, Energy, 30, 2690
36. Nakagawa S., Takamatsu K., Tachibana Y., Sakaba N., & Iyoku T., 2004, Nuclear Engineering and Design, 233, 301
37. NEI, 2006, AGMA/ABMA Annual Meeting, March 3
38. PEMEX, 2000-2005, Proceedings. Operative and Financial Results, Mexico
39. RWG, 2004, Navigant Consulting Inc, reference 119888, December 15
40. Salas G. & Castillo N., 1988, Fondo de Cultura Económica, Mexico
41. Sener, 2003-205, Prospective of the Electric Sector 2003-2012, 2004-2013, 2005-2014, Mexico
42. SMH, 1999, (<http://www.smh.org.mx/>, last access 01.10.2006)
43. Suzuki M., 2002, United Nations University, Japan
44. Tuohy J., 2006, American Nuclear Society
45. UC, 2004, University of Chicago, August 2004
46. United Nations, 1979, Protocol to the 1979, November 13, Geneva
47. United Nations, 1996, ISBN: 4-906686-01-X
48. Williams R., 2001, Nuclear Control Institute's 20th, Anniversary Conference, Washington, DC

ANEXO: RESÚMENES EN CONGRESO

IV REUNIÓN NACIONAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA, 31 DE OCTUBRE-5 NOVIEMBRE 2004
CIEN AÑOS DE LA UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA
GEOS, Vol. 24, No. 2, Noviembre, 2004, p. 375-376
MÉXICO, (JURIQUILLA, QUERETARO)
SE15-14 CARTEL L

LA COMPETIVIDAD ECONOMICA DE LA ENERGIA GEOTERMoeLECTRICA EN MÉXICO

Bazán Perkins Sergio Dale
Departamento. de Ingeniería en Energéticos, Posgrado de Ingeniería,
UNAM
bazanperkins@hotmail.com

De fundamental importancia para la seguridad del país es la generación de energía eléctrica mediante recursos energéticos domésticos, que propicien desarrollo tecnológico, a costos razonables y de altos efectos multiplicadores en sus sectores económicos. No obstante, la actual política energética de México, orientada a intensificar la generación de electricidad basada en el gas natural y carbón mineral de importación, implica mayor dependencia energética externa, fuga de divisas y mayores emisiones de gases de efecto invernadero, que no resuelven la problemática en forma eficiente y sostenida. Particularmente, la generación geotermoeléctrica resulta altamente viable para ser desarrollado al máximo en México. Su empleo favorecerá la seguridad del suministro eléctrico por no depender de la climatología y de los precios de los combustibles. Además de ser una fuente de energía renovable, se obtiene energía eléctrica sin emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido,

México está entre los países avanzados en el desarrollo tecnológico de la geotermoelectricidad, desde la prospección de los campos geotérmicos hasta su empleo para la generación eléctrica, y participa en su implementación en otros países. En el 2001, al comparar su costo de generación ($\$3.79$ US/kWh) y factor un aprovechamiento (76%) con la de otras fuentes de generación (CONAE-SENER, 2002); se deduce que la generación geotérmica estaría entre las más viables del Sistema Eléctrico Nacional. Sin embargo, de acuerdo con la información de la SENER (2003), durante el 2002 la capacidad de generación geotermoeléctrica fue de apenas 843 MWe, que es el 2.0% de la capacidad instalada, cuando su potencial estimado es de 2,400 MWe. Por tanto, únicamente se emplea un 35% del potencial de generación, si se aprovecharán además el 65% restante estaría cubriendo un 6% de la capacidad.

Si bien, el potencial de generación geotermoeléctrica es limitado e insuficiente para cubrir la demanda eléctrica, al intensificar la exploración y aprovechamiento de nuevos campos geotérmicos, se reduce el riesgo del suministro energético. En comparación, con la generación hídrica, solar y eólica, dependientes de la climatología. Recientemente, las termoeléctricas a base de gas representan un alto riesgo en la seguridad energética, por la volatilidad del precio del combustible y, crecientes importaciones de gas natural.

A su vez, al promoverse la importación de gas licuado por la vía marítima se agregan otros problemas de suministro, como acontece en Estados Unidos, asociado a la climatología y estabilidad política de los países exportadores. En suma, la actual política energética propicia un alto riesgo en la economía de México, al no promover la expansión de electricidad mediante fuentes de energía alternas, como serían geotérmica, solar, biomasa, hidrógeno y nuclear. Por el contrario, cada vez es mayor dependencia en las importaciones de gas natural debido a los altos consumos que obliga el sector eléctrico, sustentadas con escasas reservas probadas. La "Prospección del Sector Eléctrico 2003-2012", SENER (2003), proyecta al 2006 que el sector eléctrico consumirá un 37% del gas natural producido y en 2010 el 40.7%. De las importaciones, absorberá hacia el 2006 el 26% y para el 2010 un 50%, cifras que se consideran conservadoras.

IV REUNIÓN NACIONAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA, 31 DE OCTUBRE-5 NOVIEMBRE 2004

RECURSOS NATURALES E IMPACTO AMBIENTAL
GEOS, Vol. 24, No. 2, Noviembre, 2004, p. 406-407
MÉXICO, (JURIQUILLA, QUERETARO)
SS3-37 CARTEL

LA ENERGÍA NUCLEAR COMO BASE PARA RESOLVER LA DEMANDA ELECTRICA A LARGO PLAZO

Bazán Perkins Sergio Dale
Departamento. de Ingeniería en Energéticos, Posgrado de Ingeniería,
UNAM
bazanperkins@hotmail.com

México cuenta con una diversidad de recursos energéticos, como sería: petróleo, carbón mineral, gas natural, uranio y las renovables, que representan un conjunto de opciones. Su diversificación genera alternativas de abastecimiento y reemplazo que evitan crisis energéticas y económicas. El suministro de los energéticos en el país plantea serios problemas ante el acelerado agotamiento de sus reservas de hidrocarburos y explotación avanzada. Aunado a las dificultades geológicas y técnicas de elevados costos para recuperar el 40% de las reservas, en la Región Norte. En efecto, la EIA-BP (2003) para 1995 señala reservas probadas de petróleo de 50,776 Mb y 53 años de producción. Sin embargo, al 2003 se ubican en 12,622 Mb, con duración de unos 10 años. Las reservas de gas natural probadas, registran significativas reducciones; hacia el 2002 existían 38.95 Tpc, pero en 2003 se reportan sólo 8.776 Tpc, para unos 7.1 años.

De no modificarse la actual política energética de México, basada en los hidrocarburos, se corre el riesgo de la seguridad energética. La "Prospectiva del Sector Eléctrico 2002-2011" y otros programas, no contemplan nuevas alternativas para el Sistema Eléctrico Nacional, entre ellas la más importante como serían nuevas instalaciones de reactores nucleares, tampoco se involucra a la energía solar y al hidrógeno. Por el contrario, mis argumentos efectivamente determinan que la energía nuclear, en conjunción con las renovables, implicarían una alternativa barata, viable y concreta para resolver la demanda energética en las próximas décadas, con mayor progreso, mejoramiento ambiental y competitividad.

En este sentido, la tecnología para la producción masiva de hidrógeno en forma económica y limpia, recomendada por varios investigadores, sería la termoquímica producida por la energía de los reactores nucleares de alta temperaturas (>850 °C), como sería el MHR de la III+ generación; también los modelos GT-MHR, GFR, LFR, MSR y VHTR de IV generación, entrarán al mercado escalonadamente entre 2012-2025. Resta decir que las fuentes renovables, deben impulsar la garantía de abastecimiento energético y seguridad nacional. Al promover la geotérmica, se decremento el nivel de riesgo de abastecimiento por no depender de la climatología y combustibles. La biomasa, puede ser una alternativa doméstica para áreas específicas. La eólica, tiene importancia logística a corto tiempo, en áreas geográficas favorables del país. Finalmente, la hídrica debe proponerse hacia pequeñas zonas de abastecimiento, menores de 30 MW de capacidad.

Se concluye que para resolver el suministro de energía en México, se debe impulsar el desarrollo de la industria nuclear. El programa energético, debe planearse en función de las necesidades del país y las tecnologías disponibles. Del 2010-2015, mediante la tecnología de los reactores de III+ generación, se producirá así electricidad y cogeneración. Entre 2015-2030, instalando reactores de IV generación, se producirá hidrógeno y electricidad. En este sentido, la actividad mínima sería concluir la evaluación económica de las reservas potenciales de uranio del sistema Jurásico y en particular de la Cuenca de Tlaxiaco (Oaxaca) que facilita la oportunidad de producir energía barata y limpia en condiciones de competitividad, al disponer de reservas de uranio de gran volumen potencial.

GEOS, Vol. 24, No. 2, Noviembre, 2004, p. 406-407