



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ANÁLISIS DE SUSTENTABILIDAD DE  
DIFERENTES OPCIONES DE GENERACIÓN  
ELÉCTRICA PARA MÉXICO”**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRA EN INGENIERÍA**

ENERGÍA – ECONOMÍA DE LA ENERGÍA

P R E S E N T A :

**DEL VALLE CÁRDENAS BEATRIZ**

TUTOR:

**DRA. CECILIA MARTÍN DEL CAMPO MÁRQUEZ**

MÉXICO D. F. 2006



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Hiriart Le Bert Gerardo  
Secretario: Dra. Martín del Campo Márquez Cecilia  
Vocal: Dr. Francois Lacouture Juan Luis  
1<sup>er</sup>. Suplente Dr. Reinking Cejudo Arturo Guillermo  
2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. Rodríguez Padilla Víctor

México D.F.

**TUTOR DE TESIS:**

DRA. CECILIA MARTÍN DEL CAMPO  
MÁRQUEZ

---

FIRMA

## **AGRADECIMIENTOS:**

A mi Mamá por ser la fuerza que me guía y me impulsa a ser mejor

A Sol y Aldo

A mis Tías

A Sergio

A mi familia

A mis amigos

A mis maestros de toda la vida

A todos los que hicieron posible este trabajo

# Tabla de Contenido

<b>Introducción</b> .....	<b>2</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>4</b>
<b>1. Principales Conceptos de Sustentabilidad</b> .....	<b>6</b>
<b>2. Selección de Tecnologías de Generación Eléctrica a Evaluar</b> .....	<b>8</b>
Panorama Actual y Futuro del Sector Eléctrico en el Ámbito Internacional .....	8
Panorama Actual y Futuro del Sector Eléctrico Mexicano .....	9
¿Cuáles Tecnologías de Generación Eléctrica se Evaluarán y Porqué? .....	9
Termoeléctrica de Ciclo Combinado con Gas Natural como combustible .....	10
Hidroeléctrica .....	10
Eoloeléctrica .....	11
Nucleoeléctrica .....	11
Carboeléctrica .....	12
Definición de Tecnologías de Generación Seleccionadas .....	12
Termoeléctrica de Ciclo Combinado con Gas Natural como combustible .....	12
Hidroeléctrica .....	13
Eoloeléctrica .....	13
Nucleoeléctrica .....	14
Carboeléctrica .....	14
<b>3. Indicadores de Sustentabilidad</b> .....	<b>16</b>
Técnicas de Análisis .....	16
Definición y Evaluación de Indicadores de Sustentabilidad .....	19
Dimensión Ambiental .....	19
1. Cantidad de Sustancias Peligrosas Producidas .....	19
2. Régimen Térmico .....	20
3. Contaminación o Consumo de Agua .....	21
4. Gases de Efecto Invernadero .....	23
5. Gases Lluvia Ácida (SO <sub>2</sub> ) .....	25
6. Gases Lluvia Ácida (NO <sub>x</sub> ) .....	26
7. Gases que dañan la capa de ozono .....	27
8. Tiempo necesario de confinamiento .....	27
Dimensión Económica .....	28
9. Costos Internos .....	28
10. Costos Externos .....	30
11. Disponibilidad de Reservas Energéticas .....	32
12. Disponibilidad de la Tecnología .....	34
Dimensión Política .....	35
13. No-necesidad de estabilidad sociopolítica / financiera .....	35
14. Dependencia del Exterior .....	36
15. Robustez: no necesidad de intervenciones externas rápidas .....	37
16. Tratado de no proliferación .....	37
Dimensión Social .....	38
17. Accidentes / Riesgo Colectivo (Muertes por TW-año) .....	38
18. Aversión al riesgo (rechazo) .....	40
19. Extensión de Tierra Perdida por Operación de la Planta .....	41
20. Impactos sobre la salud humana en operación normal .....	43
21. Oportunidades de trabajo .....	44
Selección de Indicadores a Utilizar .....	45

<b>4. Metodología para Evaluación Global de Sustentabilidad .....</b>	<b>50</b>
Ecuación de evaluación de sustentabilidad .....	50
Ecuación para Evaluar la Sustentabilidad a través de 4 Dimensiones.....	50
Ecuación para Evaluar la Sustentabilidad a través de 3 Dimensiones.....	51
Metodología .....	51
1. Normalización de indicadores .....	51
2. Asignación de un porcentaje por indicador.....	52
3. Evaluación de Sustentabilidad.....	53
<b>5. Análisis de Sustentabilidad de las Tecnologías de Generación Eléctrica Seleccionadas.....</b>	<b>56</b>
Descripción de Análisis Realizados.....	56
Resultados .....	58
Comparación de Resultados Analizando las Dimensiones .....	58
Enfoque: 4 Dimensiones de Sustentabilidad .....	58
Enfoque: 3 Dimensiones de Sustentabilidad .....	62
Comparación de Resultados Analizando las Variantes .....	64
Comparación de Resultados Analizando los Valores Utilizados .....	65
Comparación de los Resultados de los Tres Enfoques .....	67
Una Visión de la Sustentabilidad a través de los Indicadores.....	71
<b>6. Conclusiones .....</b>	<b>76</b>
<b>Anexo 1. Resultados de los Análisis.....</b>	<b>78</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>82</b>

# Índice de Tablas

Tabla 1.	Matriz de indicadores de comparación de diferentes sistemas energéticos, cada uno considerando el mismo nivel de desarrollo.....	17
Tabla 2.	Matriz de indicadores de comparación de diferentes sistemas energéticos, cada uno considerando el mismo nivel de desarrollo.....	18
Tabla 3.	Régimen Térmico de Plantas de Generación Eléctrica .....	21
Tabla 4.	Consumo de Agua por Tipo de Tecnología de Generación.....	22
Tabla 5.	Emisiones de CO <sub>2</sub> para el Ciclo de Vida de la Planta .....	24
Tabla 6.	Comparación de Emisiones de GEI para el ciclo de vida de la planta.....	24
Tabla 7.	Emisiones Indirectas de GEI (tCO <sub>2</sub> eq/GWh) para Bélgica .....	25
Tabla 8.	Emisiones de SO <sub>2</sub> por el Ciclo de Vida de la Planta .....	26
Tabla 9.	Emisiones de NOx por el Ciclo de Vida de la Planta .....	27
Tabla 10.	Costo unitario de generación en dólares de 2004, precios medios de 2004 (US\$/MWh) .	29
Tabla 11.	Costos Externos por generación de energía eléctrica (centavos de euro por kWh).....	32
Tabla 12.	Porcentaje de Componentes Importados de los Insumos requeridos para la instalación de una planta de generación eléctrica.....	35
Tabla 13.	Porcentaje de Combustible Importado con Respecto al Consumo Total de Combustible para Generación de Energía Eléctrica .....	37
Tabla 14.	Muertes por Unidad de Energía Generada .....	40
Tabla 15.	Requerimientos de Recursos Territoriales para la Construcción de Plantas de Energía que Produzcan 1 billón de kWh/año para una Ciudad de 100,000 personas.....	42
Tabla 16.	Extensión de Tierra Requerida para la Instalación de Diferentes Plantas de Generación Eléctrica .....	43
Tabla 17.	Evaluación de los Indicadores de Sustentabilidad a Utilizarse de Acuerdo a Diferentes Fuentes de Información.....	45
Tabla 18.	Indicadores de Sustentabilidad (Valores Promedio) .....	47
Tabla 19.	Indicadores de Sustentabilidad (Valor Superior) .....	48
Tabla 20.	Indicadores de Sustentabilidad (Valor Inferior) .....	49
Tabla 21.	Porcentaje Asignado a Cada Indicador de Acuerdo con el Enfoque analizado.....	52
Tabla 22.	Normalización.....	53
Tabla 23.	Indicadores de Sustentabilidad ya Normalizados .....	53
Tabla 24.	Indicadores de Sustentabilidad Normalizados y con un Porcentaje Definido.....	54
Tabla 25.	Resultados por Dimensión.....	54
Tabla 26.	Lista de Enfoques Analizados .....	57
Tabla 27.	Resultados del análisis de sustentabilidad, comparación tomando en cuenta los tres análisis y los valores promedio de los indicadores .....	64
Tabla 28.	Resultados de Sustentabilidad con los Tres Enfoques .....	68

# Índice de Figuras

Figura 1. Resultados de la Sustentabilidad del enfoque 4 Dimensiones, considerando todos los indicadores seleccionados y tomando en cuenta datos promedio .....	59
Figura 2. Resultados de la Sustentabilidad por Indicador, del enfoque 4 Dimensiones, considerando todos los indicadores seleccionados y tomando en cuenta datos promedio	60
Figura 3. Evaluación de la Sustentabilidad con 4 Dimensiones, utilizando TODOS los Indicadores	61
Figura 4. Resultados del enfoque 3 Dimensiones, considerando todos los indicadores seleccionados y tomando en cuenta datos promedio .....	62
Figura 5. Evaluación de la Sustentabilidad con 3 Dimensiones, utilizando TODOS los Indicadores	63
Figura 6. Resultados del Enfoque con 4 Dimensiones, considerando 15 indicadores .....	66
Figura 7. Resultados del Enfoque con 4 Dimensiones, considerando 14 indicadores (Sin Costos Externos) .....	66
Figura 8. Resultados del Enfoque con 4 Dimensiones, considerando 13 indicadores (Sin SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> y GEI) .....	66
Figura 9. Evaluación de la Sustentabilidad con 4 y 3 Dimensiones y utilizando TODOS los Indicadores .....	69
Figura 10. Evaluación de la Sustentabilidad con 4 y 3 Dimensiones y EXCLUYENDO en los Indicadores el de COSTOS EXTERNOS .....	70
Figura 11. Evaluación de la Sustentabilidad con 4 y 3 Dimensiones y EXCLUYENDO en los Indicadores el de Emisiones de SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> y GEI .....	71
Figura 12. Evaluación de la Sustentabilidad con 15 Indicadores y Valores Promedio .....	72
Figura 13. Evaluación de la Sustentabilidad con 15 Indicadores y Valores Promedio (CARBOELÉCTRICA) .....	73
Figura 14. Evaluación de la Sustentabilidad con 15 Indicadores y Valores Promedio (CICLO COMBINADO) .....	73
Figura 15. Evaluación de la Sustentabilidad con 15 Indicadores y Valores Promedio (NUCLEOELÉCTRICA) .....	74
Figura 16. Evaluación de la Sustentabilidad con 15 Indicadores y Valores Promedio (HIDROELÉCTRICA) .....	74
Figura 17. Evaluación de la Sustentabilidad con 15 Indicadores y Valores Promedio (EOLOELÉCTRICA) .....	75



## Introducción

Desde 1987, la Comisión Mundial de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo adoptó por unanimidad el documento Nuestro Futuro Común o Informe Brundtland, que constituye el acuerdo más amplio entre científicos y políticos del planeta y que sintetiza los desafíos globales en materia ambiental en el concepto de desarrollo sustentable, el cual se definió como “aquel que satisface las necesidades esenciales de la generación presente sin comprometer la capacidad de satisfacer las necesidades de las generaciones futuras”.

Dentro del concepto de sustentabilidad, los tres aspectos involucrados fundamentalmente son: el bienestar humano, el bienestar ecológico y las interacciones. Se trata de un enfoque integrado del desempeño económico y ambiental, que conforma un área de factibilidad, donde el crecimiento económico debería ser suficiente para resolver el problema de la pobreza y paralelamente sustentable para evitar una crisis ambiental, considerando además tanto la equidad entre las generaciones presentes como la equidad intergeneracional que involucra los derechos de generaciones futuras.

En sí, el desarrollo económico sustentable se define como las formas de crecimiento económico y actividades que no agotan o degradan recursos naturales de los que depende el crecimiento económico actual y futuro.<sup>1</sup>

Todo desarrollo tecnológico debe basarse en el principio de sustentabilidad y en este sentido se toma como ejemplo el Sector Energético en México, específicamente el Sector Eléctrico, el cual ha crecido a una tasa de 4.9% en el periodo de 1993-2003, y las tecnologías utilizadas para la generación se han modificado, tal es el caso de las plantas termoeléctricas convencionales (vapor y combustión interna) más las turbogás, que en 1993 proporcionaban el 54.4% de la generación eléctrica nacional y para el año 2003 sólo registraron una participación del 40%. En este mismo sentido, se observa la penetración de la tecnología de Ciclo Combinado, que en 1993 representaba el 6.3% de la generación eléctrica nacional y para el 2003 ya tiene una participación del 27%. Para el caso de las tecnologías Hidroeléctricas, también se observa una clara disminución en la participación de esta tecnología a la generación eléctrica nacional, al pasar de una participación del 20.7% en 1993 al 9.7% en 2003.

Hacia futuro se percibe una tendencia similar de crecimiento del sector eléctrico, dado que se estima que para el 2013 el 45.1% sea generado por plantas de Ciclo Combinado y sólo el 18.1% por las termoeléctricas convencionales; en cuanto a las tecnologías renovables, de la capacidad

---

<sup>1</sup> G. Tyler Miller, Jr., 1994, Ecología y Medio Ambiente

adicional para el periodo 2004-2013, éstas representan sólo el 1.6% por plantas eólicas y el 12.7% por plantas Hidroeléctricas; y en cuanto a las plantas de Ciclo Combinado, éstas representan el 51.9% de la capacidad a instalarse en el periodo mencionado. A pesar de lo anterior, todavía se tiene el 26.8% de capacidad para la cual no está definida la tecnología.

Conociendo la situación actual y futura en la que se encuentra México, vale la pena hacerse la pregunta acerca de si las tecnologías propuestas para instalarse en el futuro son las más sustentables y las razones de esta consideración. Para conocer la respuesta, es necesario realizar un análisis de sustentabilidad de las opciones de generación eléctrica tomando en cuenta los ciclos de vida de las plantas eléctricas, para que en función de los resultados del análisis, se puedan seleccionar las mejores tecnologías para cubrir la demanda creciente de generación eléctrica procurando acercarse lo más posible al desarrollo sustentable.

Como se observa con anterioridad, se continúa invirtiendo en tecnologías que utilizan energías no renovables y es la tendencia al futuro, y muy poca de la inversión se orienta en tecnologías que funcionan con energías renovable y nuclear.

El objetivo de este trabajo consiste en realizar un análisis de la sustentabilidad de diferentes opciones de generación eléctrica utilizadas para cubrir la demanda base en el sistema eléctrico interconectado de México. Los alcances esperados son realizar la comparación desde el punto de vista del desarrollo sustentable de cuatro opciones de generación eléctrica de base, aplicando una matriz de indicadores que mide la sustentabilidad en diferentes criterios<sup>2</sup> y adicionalmente hacer un análisis de sensibilidad ante algunos cambios en los indicadores considerados en las dimensiones de Sustentabilidad, por ejemplo, tomando en cuenta cuatro y tres dimensiones o bien considerando todos los indicadores en la dimensión ambiental y no considerando los costos externos o no considerando las emisiones de Gases de Efecto Invernadero y relacionadas con la lluvia ácida.

La aportación de este trabajo radica en sentar las bases para hacer una evaluación de sustentabilidad y comparación de diferentes opciones de tecnologías de generación eléctrica para México, aunque se pueden tomar como base los valores de los indicadores utilizados en este documento, también se puede llevar a cabo un análisis con los valores nuevos que aporte el lector, por lo que, más que dar recomendación, se establece un método para que se evalúe la sustentabilidad con los valores que se escojan. Por lo anterior, el lector podrá evaluar otro tipo de plantas, pero también tendrá una línea de comparación.

---

<sup>2</sup> Prof. Wolfgang Kroger, "Measuring the sustainability of energy systems", NEA News 2001 – No.19.1

## Resumen

Se realizó una comparación de la sustentabilidad de diferentes opciones de generación eléctrica para México, específicamente se evaluaron las tecnologías: Carboeléctrica, Ciclo Combinado con Gas Natural, Nucleoeléctrica, Hidroeléctrica y Eoloeléctrica.

La primera etapa consistió en definir un conjunto de indicadores asociados a las cuatro dimensiones del desarrollo sustentable: ambiental, económica, social y política. La segunda etapa consistió en construir la matriz de indicadores de sustentabilidad buscando los valores correspondientes a cada una de las opciones de generación eléctrica. La tercera etapa consistió en realizar la agregación de indicadores para obtener una calificación de sustentabilidad global. Para ello se aplicó una normalización de cada indicador sobre su rango de valores, se sumaron los correspondientes a cada dimensión y, se sumaron los valores de las cuatro dimensiones considerando pesos iguales para cada una. Una última etapa consistió en realizar algunos estudios de sensibilidad en cuanto a la inclusión y/o exclusión de alguna dimensión o de algunos indicadores específicos.

Ninguna de las tecnologías resultó ser la mejor o la peor en todos los indicadores. Con las consideraciones y supuestos del estudio la tecnología más sustentable resultó ser la Eoloeléctrica. Sin embargo, con el análisis realizado, más que llegar a una conclusión, se ha establecido un método de cálculo que permite comparar la sustentabilidad de diferentes plantas de generación eléctrica permitiendo variar los valores de los indicadores para realizar estudios de sensibilidad; de tal manera que se convierta en un estudio dinámico a lo largo del tiempo con datos actualizados de las diferentes opciones.



# 1. Principales Conceptos de Sustentabilidad

El concepto de sustentabilidad generalmente va relacionado con el desarrollo y por lo regular se encuentra como desarrollo sustentable, por lo que se comenzará por definir cada uno de estos términos de manera independiente. El concepto de **desarrollo** se refiere al desarrollo humano y se define como “el proceso de ampliar la gama de opciones de las personas brindándoles mayores oportunidades de educación, atención médica, ingreso y empleo, y abarcando el espectro total de opciones humanas, desde un entorno físico en buenas condiciones hasta libertades económicas y políticas”<sup>3</sup>. Por otro lado el término sustentabilidad agrega la dimensión de tiempo al concepto de desarrollo, lo que nos indica que la forma en la que actuamos en el presente tiene consecuencias sobre las oportunidades futuras y por lo tanto se desea que el **desarrollo** sea **sustentable**, esto es, *un desarrollo que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias*<sup>4</sup>.

Otra definición de desarrollo sustentable es “Un desarrollo que distribuya más equitativamente los beneficios del progreso económico, proteja el medio ambiente nacional y mundial en beneficio de las futuras generaciones y mejore genuinamente la calidad de vida”.<sup>5</sup>

La sustentabilidad del desarrollo debería de suponer un equilibrio armónico en el manejo de los elementos componentes del capital físico y del acervo natural, respetando ciertos criterios de equidad y la diversidad cultural de la sociedad.

El desarrollo sustentable depende tanto de la reducción de la destrucción ecológica (principalmente limitando el flujo energético y material de la economía humana) como el mejoramiento de la calidad de vida material de los pobres del mundo (mediante la liberación del espacio ecológico necesario para mayor crecimiento de los países en vías de desarrollo y asegurando que los beneficios fluyan hacia donde más se necesitan. La sustentabilidad se puede traducir en un concepto muy sencillo: “implica vivir en forma cómoda en términos materiales y en paz unos con los otros dentro de los límites de la naturaleza”.<sup>6</sup>

Un ejemplo de sustentabilidad referente al sector energético, podría ser una tecnología de generación de electricidad que sea amigable con el medio ambiente (que no contamine), que se tengan suficientes reservas para el futuro, del combustible utilizado, que el costo del kWh generado

---

<sup>3</sup> PNUD. Desarrollo Humano: Informe 1992, publicado para el PNUD. Bogotá. 1992. p.18. [38]

<sup>4</sup> World Commission on Environment and Development (WECED). Our Common Future. New York-Oxford. 1987. [39]

<sup>5</sup> OLADE / CEPAL / GTZ. Energía y Desarrollo Sustentable en América Latina y el Caribe: Guía para la Formulación de Políticas Energética. Ecuador. 2000. [3]

<sup>6</sup> Mathis Wackernagel / William Rees. Nuestra Huella Ecológica: Reduciendo el Impacto Humano sobre la Tierra. Chile. 2001. [7]

y el MW instalado sea competitivo y que ayude a generar empleos que a la vez traigan como consecuencia un crecimiento económico de la población.

Para evaluar si el desarrollo es realmente sustentable se reconocen cuatro dimensiones que son:

- (1) Política (estabilidad política)
- (2) Económica (bienestar económico)
- (3) Social (equidad social) y
- (4) Ambiental (un medio ambiente sano y con conservación de los recursos naturales).

Las dimensiones deben estar en equilibrio para que el desarrollo sea sustentable, porque un cierto nivel de desarrollo con respecto a una dimensión podría poner en peligro el desarrollo en el largo plazo respecto a otras dimensiones.

Dado que este trabajo se enfocará en evaluar la sustentabilidad de las opciones tecnológicas de generación eléctrica para México, es conveniente tener un panorama general de cómo influye el Sector Energético en el desarrollo sustentable, y al respecto se ven varios factores que afectan principalmente el nivel y la estructura del abastecimiento y usos de los energéticos que afectan de modo complejo al desarrollo económico y también producen impactos sobre los recursos naturales, y tienen fuerte influencia sobre el medio ambiente y la salud humana.

En términos de sustentabilidad en el Sector Eléctrico, la búsqueda de tecnologías ambientalmente sanas no puede ser una excusa para que exista un sobreconsumo e incremento de la inequidad material. Por un lado, cualquier estrategia comprensiva para lograr la sustentabilidad, debe proteger aquellos bienes de los cuales depende la supervivencia de todas las generaciones futuras; y por otro lado debe tomar en cuenta el dilema ético que surge de satisfacer las necesidades básicas de un cuarto de la población actual violando con esto la cuestión de equidad.<sup>7</sup>

En este sentido el análisis que se realizará tomará en cuenta los diferentes indicadores de sustentabilidad de las tecnologías de generación eléctrica que se seleccionen, por lo que más adelante el término de desarrollo sustentable se cerrará un poco más a la cuestión de tecnologías amigables con el medio ambiente, económicamente competitivas y que procuren el no agotamiento de combustibles no renovables.

---

<sup>7</sup> Mathis Wackernagel / William Rees. Nuestra Huella Ecológica: Reduciendo el Impacto Humano sobre la Tierra. Chile. 2001. [7]

## 2. Selección de Tecnologías de Generación Eléctrica a Evaluar

### Panorama Actual y Futuro del Sector Eléctrico en el Ámbito Internacional

De 1990 al 2002 la capacidad instalada mundial de energía eléctrica se ha incrementado con una tasa promedio anual de 2.2%, no así el consumo de energía eléctrica, el cual registró un crecimiento promedio anual de 2.9% para el mismo periodo. Para el año 2002, esta capacidad instalada fue de 3,465 GW y estaba conformada en un 68% por plantas térmicas, el 22% por plantas que utilizan energías renovables y el 10% por plantas nucleares.<sup>8</sup>

De acuerdo con las regiones, Medio Oriente se caracteriza por el uso de energía térmica, debido a que el 95% de su capacidad instalada es de este tipo, le sigue África con un 78% de uso de esta energía y en el caso de Latinoamérica, sólo representa el 36% de su capacidad instalada total. En el caso de las energías renovables, es Latinoamérica la región con mayor aprovechamiento de este tipo de energía, representando un 61% de la capacidad instalada total en esta región, seguida por Europa Occidental con un 22%. Para el caso de la energía nuclear, la capacidad instalada que opera con energía nuclear, en Europa Occidental representa el 23% respecto al total.<sup>9</sup>

Con respecto al consumo de energéticos para generación de electricidad en el mundo, representó el 39% de la energía demandada en el año 2002. En el año 2001, el energético más consumido fue el carbón, representando un 38.1% del total, seguido por las energías renovables con un 19.6%, después el Gas Natural con un 18.4%, el nuclear con un 16.3% y por último el petróleo con un 7.6%. Se espera que para el año 2015 disminuya el consumo de carbón a un 37.2% del total, la energía nuclear a un 14.7% debido a que varios reactores alcanzaran el final de su vida útil, y el petróleo a un 7.2%; por otro lado, se espera un incremento en el uso de Gas Natural a 21% del total y las energías renovables se mantendrán en sus niveles actuales, sin embargo se espera que su participación en la generación de energía eléctrica se incremente en un 35%.<sup>10</sup>

---

<sup>8</sup> SENER. Prospectiva del Sector Eléctrico 2004-2013. México. 2005. [37]

<sup>9</sup> SENER. Prospectiva del Sector Eléctrico 2004-2013. México. 2005. [37]

<sup>10</sup> SENER. Prospectiva del Sector Eléctrico 2004-2013. México. 2005. [37]

## **Panorama Actual y Futuro del Sector Eléctrico Mexicano**

En el periodo de 1993-2003, el Sector Eléctrico ha crecido a una tasa de 4.9%, y las tecnologías utilizadas para la generación se han modificado, tal es el caso de las plantas termoeléctricas convencionales (vapor y combustión interna) más las turbogás, que en 1993 proporcionaban el 54.4% de la generación eléctrica nacional y para el año 2003 sólo registraron una participación del 40%. En este mismo sentido, se observa la penetración de la tecnología de Ciclo Combinado, que en 1993 representaba el 6.3% de la generación eléctrica nacional y para el 2003 ya tiene una participación del 27%. Para el caso de las tecnologías Hidroeléctricas, también se observa una clara disminución en la participación de esta tecnología a la generación eléctrica nacional, al pasar de una participación del 20.7% en 1993 al 9.7% en 2003.<sup>11</sup>

Hacia futuro se percibe una tendencia similar en el crecimiento del sector eléctrico, dado que se estima que para el 2013 el 45.1% sea generado por plantas de Ciclo Combinado y sólo el 18.1% por las termoeléctricas convencionales; en cuanto a las tecnologías renovables, de la capacidad adicional para el periodo 2004-2013, éstas representan solo el 1.6% por plantas eólicas y el 12.7% por plantas Hidroeléctricas; y en cuanto a las plantas de Ciclo Combinado, éstas representan el 51.9% de la capacidad a instalarse en el periodo mencionado. A pesar de lo anterior, todavía se tiene el 26.8% de capacidad para la cual no está definida la tecnología a utilizarse.

## **¿Cuáles Tecnologías de Generación Eléctrica se Evaluarán y Porqué?**

Sería ideal analizar todas las tecnologías de generación eléctrica que actualmente son utilizadas en nuestro país y en el mundo, sin embargo eso representa un trabajo muy extenso el cual no se puede realizar dentro del tiempo disponible para realizar esta tesis de maestría. Entonces se han seleccionado sólo algunas de las tecnologías, éstas son:

- Termoeléctrica de Ciclo Combinado con Gas Natural como combustible.
- Hidroeléctrica
- Eoloeléctrica
- Nucleoeléctrica
- Carboeléctrica

---

<sup>11</sup> SENER. Prospectiva del Sector Eléctrico 2004-2013. México. 2005. [37]



La selección de las tecnologías de generación a evaluar se realizó con base en los criterios expuestos a continuación:

## **Termoeléctrica de Ciclo Combinado con Gas Natural como combustible**

De acuerdo con la prospectiva del sector eléctrico 2004-2013<sup>12</sup>, la capacidad comprometida o en construcción para el periodo 2004-2009 asciende a 7,311 MW, de los cuales el 70.4% están basados en la tecnología Ciclo Combinado. Es decir, la Secretaría de Energía y la Comisión Federal de Electricidad, consideran a la tecnología de **Ciclo Combinado**, a base de Gas Natural, como la mejor opción a corto plazo. El otro criterio que se considera para evaluar esta tecnología es que dentro de las plantas que utilizan combustibles fósiles para su funcionamiento, es el Ciclo Combinado la tecnología más limpia, además de que esta tecnología con alta temperatura de quemado en las turbinas de gas con recuperador de calor, son los más eficientes en los sistemas de generación eléctrica disponibles. En la actualidad este tipo de plantas está operando con eficiencias mayores al 50% con referencia al poder calorífico del combustible; tomando en cuenta esta situación que ayuda a la dimensión del desarrollo sustentable del medio ambiente, pero también ayuda a la dimensión económica porque dada su eficiencia hace el kWh menos costoso que las otras plantas que utilizan combustibles fósiles; aunque se puede ver que en algunas dimensiones del desarrollo sustentable estas plantas tienen una buena perspectiva, en otros no tanto, como es la poca disponibilidad de Gas Natural en el país que hace que cada vez sea más costoso, pero también hace al país más dependiente de importaciones.

## **Hidroeléctrica**

De las tecnologías que utilizan energías renovables, en la actualidad se consideran como tecnologías maduras a las plantas Hidroeléctricas y a las Geotermoeléctricas, sin embargo aunque estas dos tienen grandes ventajas, también tienen algunas desventajas importantes que ponen en riesgo la sustentabilidad de cada una de ellas, tal es la situación que en el caso de las Hidroeléctricas el espacio que se requiere para el embalse trae como consecuencias daños a los ecosistemas. En este documento se evaluarán a las plantas **Hidroeléctricas**, sobre todo por que aparentemente parecen una tecnología limpia, más no totalmente sustentable por todas las consecuencias que tiene su construcción y mantenimiento.

---

<sup>12</sup> SENER. Prospectiva del Sector Eléctrico 2004-2013. México. 2005. [37]

## Eoloeléctrica

Otra tecnología que ha madurado en los últimos años ha sido la **Eoloeléctrica**, que de acuerdo con la prospectiva del sector eléctrico 2004-2013, se espera un crecimiento de 404 MW para el año 2013, de acuerdo con los requerimientos de capacidad adicional no comprometida. Pero no es sólo eso, recientemente se ha identificado un potencial de aprovechamiento eólico<sup>13</sup> en México de tal manera que se pudiera lograr una capacidad instalada de 32,000 MW de clase 4+ (áreas de viento bueno o excelente) y 6,000 MW de clase 7 (áreas supremas). La desventaja que se alcanza a percibir en las plantas eólicas es que el costo nivelado del kWh es muy alto (alrededor del 3.5 a 4 cUSD/kWh y entre 900 y 1,400 USD/kW instalado)<sup>14</sup> en comparación con los costos de instalación de las plantas termoeléctricas convencionales.

Otra desventaja que tiene este tipo de plantas es que es intermitente dado que el recurso eólico no está disponible todo el tiempo, por lo que deben de tener siempre una planta de respaldo.

Como parte de las energías renovables no convencionales, en este documento se analizará únicamente la tecnología eólica.

## Nucleoeléctrica

Una tecnología de generación que ha sido bastante polémica por el desconocimiento de los beneficios que puede traer a la sociedad y al sector eléctrico, ha sido la tecnología **nuclear**. Un análisis de sustentabilidad de estas plantas seguramente arrojará resultados interesantes que contribuirían a una mejor selección de las plantas a instalarse en el futuro en México. Es importante aclarar que en la prospectiva del sector eléctrico 2004-2013 no se tiene contemplado instalar alguna planta nuclear, al menos en la capacidad de generación comprometida o en proceso de construcción (periodo 2004-2009). Sin embargo en la capacidad adicional no comprometida (periodo 2006-2013) aun existen 12 plantas a las cuales no se les ha seleccionado el tipo de generación y por el momento se consideran como de tecnología libre, que en un momento dado alguna de ellas se podría considerar como nuclear.

Las plantas nucleares tienen grandes ventajas sobre todo porque las reservas de uranio en el mundo son tales que alcanzarían para abastecer alrededor de 250 años a las plantas Nucleoeléctricas, además de que no emiten gases de efecto invernadero.

---

<sup>13</sup> NREL/ USAID / DOE. Wind Energy Resource Atlas of Oaxaca. México. 2003. [10]

<sup>14</sup> SENER. Prospectiva del Sector Eléctrico 2003-2012. México. 2004. [8]

Por otro lado las desventajas serían precisamente los desechos porque al considerarse como radioactivos se tiene que tener un sitio de disposición final para resguardarlos lo cual implica una inversión que además implica cuestiones políticas y sociales.

## **Carboeléctrica**

Por ultimo una tecnología que pudiera ser factible en el futuro para el desarrollo sustentable del país es la **Carboeléctrica**, porque por un lado no se tendrían problemas de abastecimiento del carbón dado que en el mundo este mineral es muy abundante; sin embargo la quema del carbón tiene bastantes consecuencias ambientales y sobre todo que de las tecnologías que utilizan combustibles fósiles, es ésta una de las más sucias, al menos cuando se evalúan los gases de efecto invernadero (GEI): una planta termoeléctrica convencional (vapor) presenta un factor de emisión de GEI de 0.82347 tCO<sub>2</sub> equivalentes / MWh, una planta de Ciclo Combinado de 0.50939 tCO<sub>2</sub> equivalentes / MWh y una planta Carboeléctrica de 1.01065 tCO<sub>2</sub> equivalentes / MWh (datos al año 2001).<sup>15</sup>

## **Definición de Tecnologías de Generación Seleccionadas**

### **Termoeléctrica de Ciclo Combinado con Gas Natural como combustible**

Las centrales de Ciclo Combinado están integradas por dos tipos de diferentes unidades generadoras: turbogas y vapor. Una vez que termina el ciclo térmico de la unidad turbogas, los gases desechados (que poseen un importante contenido energético, el cual se manifiesta en su alta temperatura de hasta 623 °C en las turbinas de mayor capacidad) se utilizan en un recuperador de calor para calentar agua y llevarla a la fase de vapor el cual es aprovechado para generar energía eléctrica, dado que éste es conducido a una turbina de vapor en donde su energía cinética es convertido en energía mecánica, misma que es transmitida al generador para producir energía eléctrica.

La potencia en sitio de la turbina de gas de este ciclo está influida por la altitud y temperatura del lugar de instalación.

La eficiencia térmica de las plantas de Ciclo Combinado se incrementa constantemente debido a mejoras en las turbinas; los ciclos combinados con alta temperatura de quemado en las turbinas de

---

<sup>15</sup> ATPAE. "Justificación para la Selección de la Metodología" en Metodologías para Calcular el Coeficiente de Emisión Adecuado para Determinar las Reducciones de GEI Atribuibles a Proyectos de Eficiencia Energética y Energías Renovables. México. 2003. [9]

gas con recuperador de calor, son los más eficientes en los sistemas de generación de energía disponible actualmente alcanzando eficiencias mayores al 50%, referidas al poder calorífico superior.

La proporción en el número de unidades turbogas por unidad de vapor varía desde 1:1 hasta 4:1. El diseño de la fase vapor puede realizarse en tres configuraciones básicas: (i) recuperador de calor sin calor suplementario, (ii) recuperador de calor con calor suplementario y (iii) generador de vapor convencional.

Una de las ventajas de este tipo de plantas, aparte de su eficiencia, es que ésta puede construirse en dos etapas, primero la unidad de Turbogas y en algunos casos empezar a operar y después la unidad de vapor.

## **Hidroeléctrica**

El principio de funcionamiento de una planta Hidroeléctrica, es convertir la energía potencial del agua en energía eléctrica, para lograrlo, el agua es conducida hasta las turbinas, procurando obtener una resistencia hidráulica mínima; en la turbina, la energía cinética es transferida al generador, donde es transformada en energía eléctrica. Las plantas Hidroeléctricas se diseñan y construyen específicamente para el sitio hidráulico seleccionado por lo que el costo de generación eléctrica de estas plantas se encuentra poco estandarizado. De igual manera los impactos ambientales y sociales de estas plantas están muy relacionados con las características de los ecosistemas del lugar y con las poblaciones humanas establecidas en el sitio y sus alrededores.

## **Eoloeléctrica**

Este tipo de planta utiliza para su funcionamiento los aerogeneradores y como energía primaria el viento; los aerogeneradores son equipos que transforman la energía cinética del viento en energía eléctrica y están constituidos fundamentalmente por cuatro equipos principales: una turbina eólica, un generador eléctrico, una caja de engranes que acopla la turbina y el generador eléctrico y la estructura soporte del grupo turbogenerador, que en la mayoría de los casos es una torre que sustenta a éste, a una altura conveniente. El tipo de aerogenerador más común es el de velocidad constante.

El aprovechamiento de la energía cinética del viento es una tecnología madura para la generación eléctrica y comercialmente se encuentran disponibles aerogeneradores desde 0.5 hasta 1.5 MW de potencia nominal, aunque también existen prototipos con una potencia de 3 MW.

Una planta con turbinas eólicas o granja eólica, consiste de uno o más aerogeneradores colocados en filas y cada fila es perpendicular a la dirección dominante del viento. Las turbinas están separadas entre sí de tres a cinco diámetros del rotor. Las filas están generalmente separadas entre sí de cinco a nueve diámetros del rotor. Las granjas eólicas que consisten de cinco a 10 máquinas, son conectadas por lo general a la red de transmisión a través de una subestación. Las plantas eólicas pequeñas, consideradas como de generación distribuida, que cuentan con cinco a diez máquinas, se conectan directamente a la red de distribución.

El factor de planta de este tipo de centrales oscila entre el 20% y 43% dependiendo del cuidado que se haya tenido en la selección del sitio. Los factores de disponibilidad para estos equipos se encuentran en el rango de 95% a 98%.

## **Nucleoeléctrica**

Estas plantas tienen semejanza en operación con las termoeléctricas convencionales, debido a que utilizan vapor a presión para mover los turbogeneradores. En este caso se aprovecha el calor obtenido al fisiónar átomos del isótopo de uranio  $U_{235}$  en el interior del reactor, para producir el vapor necesario. Existen diversos tipos de reactores como resultado de las distintas combinaciones de los elementos ordinarios: combustibles, moderador y refrigerante; los reactores de potencia más comunes, llamados de segunda generación son: (i) PWR – Reactor de agua ligera a presión, (ii) BWR – Reactor de agua ligera hirviente y (iii) PHWR – Reactor de agua pesada a presión. Existen además reactores de diseños “avanzados”, llamados reactores de tercera generación, cuya tecnología ha evolucionado a partir de los anteriores, en los cuales se han incorporado varias características relacionados con el desarrollo sustentable como es mejor utilización del combustible, menor producción de residuos radiactivos, más seguridad en su operación y más económicos.

## **Carboeléctrica**

Las centrales Carboeléctricas tienen un funcionamiento similar a las termoeléctricas convencionales, dado que el único cambio importante es que utilizan carbón como energético primario en la caldera que produce el vapor que va al sistema turbina-generador. Sin embargo el carbón y sus residuos de la combustión requieren de un manejo más complejo que el combustóleo, diesel o gas natural, utilizados en las termoeléctricas convencionales.

Existen tres tipos de plantas Carboeléctricas básicas: (i) Carboeléctrica sin desulfurador y sin quemadores duales, (ii) Carboeléctrica sin desulfurador y con quemadores duales para carbón y combustóleo, en donde el carbón debe tener un contenido de azufre del 0.7% y (iii) Carboeléctrica con desulfurador y quemadores duales para carbón y combustóleo, en donde el carbón debe tener un contenido de azufre menor al 2%.

En México las plantas Carboeléctricas más recientemente instaladas cuentan con sistemas de pulverización convencionales con una eficiencia alrededor de 38%. Las nuevas plantas Carboeléctricas con sistemas de pulverización convencionales alcanzan eficiencias superiores al 40%. Las plantas modernas avanzadas utilizan aleaciones de acero, especialmente desarrolladas para alta resistencia que hacen posible el uso de vapor a condiciones supercríticas y ultra-supercríticas (presiones mayores a 248 bar y temperaturas mayores a 566° C) y pueden alcanzar, dependiendo de la localización, cerca del 45% de eficiencia. Esto conduce a una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub>, por cuanto se usa menos combustible por unidad de electricidad producida.

### 3. Indicadores de Sustentabilidad

En esta sección se establecen las técnicas de análisis para evaluar la Sustentabilidad de las diferentes tecnologías de generación de energía eléctrica contempladas en este estudio. Enseguida se presentan los indicadores a utilizar, su definición e información disponible para cada uno de ellos. En un principio se había pensado en evaluar los indicadores con información exclusivamente para México, sin embargo, no toda la información necesaria se encontraba disponible, por lo que se recurrió a fuentes internacionales tales como la Comisión Europea (EU), The National Renewable Energy Laboratory (NREL), la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), entre otras. Es en los países de Europa en donde se han hecho más evaluaciones de los diferentes indicadores, tanto, que se han evaluado incluso los costos externos de la generación eléctrica que permiten evaluar los costos por daños a la salud, a la sociedad, etc, de los contaminantes emitidos por planta de generación eléctrica.

#### Técnicas de Análisis

Una de las principales técnicas utilizada para evaluar la sustentabilidad, es a través de las cuatro dimensiones: económica, ambiental, social y política y tomando en cuenta en cada una de ellas los indicadores que reflejen el comportamiento de ellas. De acuerdo con un estudio realizado por el Prof. Wolfgang Kroger, "Measuring the sustainability of energy systems", NEA News 2001 - No. 191, la Sustentabilidad de los sistemas de energía (plantas de generación de energía eléctrica) se puede evaluar de acuerdo a tres principios: (1) "No" agotamiento de los recursos, (2) "No" producción de desechos no degradables y (3) "No" alta sensibilidad a factores ambientales y sociales, para cada uno de estos principios se establecen varios indicadores (**Tabla 1**) que tomados en cuenta de manera conjunta, ayudan a determinar el estado de cada uno de los principios establecidos.

**Tabla 1. Matriz de indicadores de comparación de diferentes sistemas energéticos, cada uno considerando el mismo nivel de desarrollo**

Principios	Criterios	Indicadores	Unidades de Medida
"no" agotamiento de los recursos	Uso de combustible y de otros materiales	1. Disponibilidad de reservas energéticas	Años
		2. Régimen Térmico	Toneladas / GWh
	Extensión de tierra perdida	3. Extensión de tierra perdida por operación de la planta	km <sup>2</sup> /GWh
	Efectos en agua	4. Contaminación o consumo	Toneladas / GWh
	Impactos ambientales a través de emisiones al aire	5. Gases de efecto invernadero	Toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente / GWh
		6. Gases que dañan la capa de ozono	Toneladas de CFC equivalente / GWh
		7. Gases de lluvia ácida	Toneladas de NOx y SOx / GWh
	Impactos sobre la salud humana	8. Operación normal	Años de vida perdida / GWh
		9. Accidentes / Riesgo colectivo	Muertes / GWh
	Impactos sobre aspectos sociales	10. Aversión al riesgo (rechazo)	Pérdida de tierras (km <sup>2</sup> ) y muertes por accidente
		11. Oportunidades de trabajo	diferencia de personas al año / GWh
		12. Tratado de no proliferación	Cualitativo
	Eficiencia económica	13. Costos internos y externos	\$/kWh
"no" producción de desechos no degradables		14. Cantidad de sustancias peligrosas producidas	m <sup>3</sup> /GWh
		15. Tiempo necesario de confinamiento	años
"no" alta sensibilidad a factores ambientales y sociales	Seguridad de suministro y disposición	16. Dependencia del exterior	Cualitativo
		17. Disponibilidad de la tecnología	\$/GWh
	Robustez	18. No necesidad de intervenciones externas rápidas	Horas
		19. No- necesidad de estabilidad sociopolítica / financiera	Cualitativo

Tomando como base la **Tabla 1**, se han agrupado los indicadores en las cuatro dimensiones de sustentabilidad (**Tabla 2**) debido a que se considera más representativo evaluar las diferentes opciones de generación eléctrica a través de éstas porque se puede tener una visión más clara del equilibrio que existe de ellas en cada una de las opciones de generación eléctrica y aquella cuyos indicadores se equilibren entre lo ambiental, económico, social y político será la tecnología más sustentable.



La importancia de un análisis de sustentabilidad a través de dimensiones e indicadores en diferentes tipos de tecnologías de generación eléctrica, ayuda a establecer un plan estratégico adecuado para incrementar la capacidad eléctrica en un país, sobre todo porque si se toman las decisiones adecuadas, el sistema eléctrico tenderá a ser más sustentable. Un cierto nivel de desarrollo en el presente, respecto a una dimensión puede poner en peligro el desarrollo en el largo plazo respecto a las otras dimensiones.

**Tabla 2. Matriz de indicadores de comparación de diferentes sistemas energéticos, cada uno considerando el mismo nivel de desarrollo**

<b>Dimensión de Sustentabilidad</b>	<b>Criterios</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Unidades de Medida</b>
<b>AMBIENTAL</b>	Reducción de sustancias peligrosas	1. Cantidad de sustancias peligrosas producidas	m <sup>3</sup> /GWh
	Uso de combustible y de otros materiales	2. Régimen Térmico	MJ/MWh
	Efectos en agua	3. Contaminación o consumo de agua	m <sup>3</sup> / MWh
		4. Gases de efecto invernadero	Toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente / GWh
	Impactos ambientales a través de emisiones al aire	5. Gases de lluvia ácida (NOx)	Toneladas de NOx / GWh
		6. Gases de lluvia ácida (SO <sub>2</sub> )	Toneladas de SOx / GWh
		7. Gases que dañan la capa de ozono	Toneladas de CFC equivalente / GWh
		8. Tiempo necesario de confinamiento	años
	Eficiencia económica	9. Costos externos	\$/kWh
<b>ECONÓMICA</b>	Eficiencia económica	10. Costos internos	\$/kWh
	Uso de combustible y de otros materiales	11. Disponibilidad de reservas energéticas	Años
	Seguridad de suministro y disposición	12. Disponibilidad de la tecnología	\$/GWh
<b>POLÍTICA</b>	Robustez	13. No- necesidad de estabilidad sociopolítica / financiera	Cualitativo
	Seguridad de suministro y disposición	14. Dependencia del exterior	Cualitativo
	Solidez	15. No necesidad de intervenciones externas rápidas	Horas
	Impactos sobre aspectos sociales	16. Tratado de no proliferación	Cualitativo
<b>SOCIAL</b>	Impactos sobre la salud humana	17. Accidentes / Riesgo colectivo	Muertes / GWh
	Impactos sobre aspectos sociales	18. Aversión al riesgo (rechazo)	Pérdida de tierras (km <sup>2</sup> ) y muertes por accidente
	Extensión de tierra perdida	19. Extensión de tierra perdida por operación de la planta	km <sup>2</sup> /GWh
	Impactos sobre la salud humana	20. Operación normal	Años de vida perdida / GWh
	Impactos sobre aspectos sociales	21. Oportunidades de trabajo	diferencia de personas al año / GWh

## Definición y Evaluación de Indicadores de Sustentabilidad

A continuación se presenta la definición de cada indicador de sustentabilidad así como los datos encontrados en diversas fuentes de información los cuales servirán de base para llevar a cabo los análisis de sustentabilidad de las plantas de generación eléctrica.

### Dimensión Ambiental

#### 1. Cantidad de Sustancias Peligrosas Producidas

##### *Definición*

Este indicador evalúa la cantidad de sustancias peligrosas producidas por las plantas de generación eléctrica y se mide en m<sup>3</sup> por cada GWh producido.

Debido al combustible utilizado para su operación (Uranio<sub>235</sub>), las plantas Nucleoeléctricas producen sustancias peligrosas a lo largo de su vida útil y éstas sustancias se constituyen básicamente por los desechos sólidos generados, tales como las barras de combustible empleadas, precipitados de desechos líquidos, los desechos líquidos que fueron transformados en sólidos y también las resinas empleadas para la limpieza de los efluentes líquidos y gaseosos. Los desechos con contenido intermedio de radiactividad se almacenan una temporada por lotes hasta que su radiactividad disminuye y son enterrados. Sin embargo en la fisión del Uranio, se generan una gran cantidad de elementos radiactivos con vida media larga, tales como el Cs-137, Sr-90 y el Kr-85 (30 años, 28.8 y 10.8 años respectivamente), que se encuentran contenidos en las barras de combustible, las cuales se almacenan en la misma planta en un tanque de concreto con agua cubierto con acero inoxidable para enfriarlas y absorber la radiación hasta que los elementos de vida media corta, hayan decaído y posteriormente se almacenan en depósitos subterráneos libres de humedad y muy estables. Los desechos provenientes de la operación anual de un reactor de 1,000 MW ocupan 2 m<sup>216</sup>.

Aunque la experiencia muestra que ambos, el almacenamiento y el transporte, de los desechos nucleares civiles, en casi medio siglo, no han representado un problema de manejo, los aspectos políticos son los que han influido en la disposición final. En efecto la energía nuclear requiere un cuidado especial en el manejo de los residuos radiactivos y que causan mucha controversia.<sup>17</sup> Teóricamente, los costos de manejo de residuos están incluidos en los costos de generación eléctrica.

---

<sup>16</sup> Jiménez C. Blanca E. La Contaminación Ambiental en México: Causas, Efectos y Tecnología Apropriada. México. 2001. p.787. [43]

<sup>17</sup> UIC Nuclear Issues Briefing Paper # 54. Sustainable Energy. 2004. p.2 y 3 [www.uic.com.au/nip54.htm](http://www.uic.com.au/nip54.htm) [26]

En cuanto a las plantas de Ciclo Combinado, Hidroeléctricas y Eoloeléctricas, éstas no producen desechos peligrosos durante su operación. En cuanto a las plantas Carboeléctrica, los usos del carbón están relacionados con la presencia de isótopos radiactivos (Ra Th y U), los cuales no se eliminan mediante el equipo descontaminante tradicionalmente empleado, debido a que éste se orienta únicamente al control de partículas y emisiones de azufre.

*Un alto valor de este indicador indica una sustentabilidad baja.*

### **Resultados**

Para el caso de una planta nuclear típica LWR (con reactor de agua ligera), los desechos peligrosos generados y que requieren un tratamiento especial y una disposición final adecuada, son de 521.3 m<sup>3</sup> durante los 40 años de vida del reactor y tomando en cuenta que una planta genera aproximadamente 227,760 MWh, se tiene que se producen 0.00229 m<sup>3</sup>/MWh, lo anterior sin considerar que los nuevos reactores van a reducir sus desechos debido a la mejor utilización del combustible y debido a técnicas de transmutación y otras más avanzadas.<sup>18</sup>

## **2. Régimen Térmico**

### **Definición**

Se refiere al régimen térmico de una planta, expresado en Megajoule (MJ) por cada Mega watt-hora (MWh) generado y permite hacer una comparación entre los consumos de combustible por energía generado por cada una de las plantas consideradas. En este caso solamente presenta régimen térmico las plantas de Ciclo Combinado, Carboeléctricas y Nucleoeléctricas.

Al régimen térmico, que depende de la eficiencia de generación, se le asocian otros factores tales como el almacenamiento, en este caso, si se contempla éste en unidades de volumen y masa, las plantas de Ciclo Combinado requieren 18.6 m<sup>3</sup>/MWh, las plantas Carboeléctricas requieren 544 kg/MWh y las Nucleoeléctricas solo 2.71 g/MWh; en este sentido son las plantas Nucleoeléctricas las que presentan una mayor ventaja de almacenamiento, debido a que el espacio ocupado para almacenar el combustible es considerablemente menor que el de las plantas de Ciclo Combinado y Carboeléctrica.

Este indicador solamente se refiere a la energía real consumida para generar la electricidad. *Un alto valor de este indicador reflejará que la eficiencia de generación es baja e indica una sustentabilidad baja.*

---

<sup>18</sup> DOE/RW-0006, Rev. 1, U.S. Department of Energy. Spent Fuel and Radioactive Waste Inventories, Projections and Characteristics", Table 9.1 Lifetime Radioactive Waste Generation From a PWR and a BWR. Diciembre 1985. [34]

## Resultados

En la Tabla siguiente se muestra el régimen térmico para las tecnologías evaluadas, para el año 2004 (México). Se observa que de las plantas Carboeléctrica, Ciclo Combinado y Nucleoeléctrica, la planta más eficiente es la de Ciclo Combinado al consumir 7,196 MJ por MWh eléctrico producido. Las plantas Hidroeléctricas y Eoloeléctricas no consumen combustible y por lo tanto no se les asocia un régimen térmico dado que su funcionamiento es a través de energías renovables.

**Tabla 3. Régimen Térmico de Plantas de Generación Eléctrica**

Central	Potencia (MW)	Régimen térmico neto (MJ/MWh)
Ciclo Combinado	1x283	7,270
	1x568	7,229
	1x372	7,151
	1x744	7,137
	<b>Promedio</b>	<b>7,196</b>
Carboeléctrica	con desulfurador	10,213
	sin desulfurador	10,692
	<b>Promedio</b>	<b>10,452</b>
Nuclear	1x1356	<b>10,870</b>
Hidroeléctrica		<b>0</b>
Eoloeléctrica		<b>0</b>

Referencia: [27]. CFE. Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico. Generación. México. 2004.

### 3. Contaminación o Consumo de Agua

#### Definición

Se refiere a la cantidad de agua contaminada o consumida por cada GWh producido (toneladas / GWh). Se debería de seleccionar solamente una de las dos, por ejemplo cantidad de agua consumida; al evaluar el agua consumida, también se está evaluando de manera indirecta la contaminación de ésta y a la vez el agua que se dejaría de utilizar para el consumo humano, lo cual tiene un gran peso sobre la sustentabilidad. Al igual que los indicadores anteriores se tendría que establecer el consumo de agua de una planta típica. *Un alto valor de este indicador indica una sustentabilidad baja respecto a las demás.*

Generalmente las plantas generadoras de electricidad consumen agua que, dependiendo del proceso y de la tecnología de generación, el consumo puede ser mayor o menor; incluso existen plantas cuyo consumo es mínimo y se requiere únicamente para el riego de áreas verdes, sistema contra incendio o servicios del personal que opera la planta, en otros casos el agua es imprescindible para el proceso, por lo que su consumo es mayor.<sup>19</sup>

<sup>19</sup> CFE. Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico. Generación. México. 2002. [18]

En el caso de las plantas de **Ciclo Combinado**, el consumo de agua se utiliza principalmente para tres áreas: agua para servicios, agua de repuesto al ciclo termodinámico y agua de enfriamiento. Y en las plantas **Carboeléctricas**, los requerimientos de agua son muy parecidos a los de las plantas de Ciclo Combinado, sin embargo los requerimientos adicionales de agua se deben a los sellos de manejo de cenizas y para rociadores en las áreas de manejo de carbón. Las plantas **Nucleoeléctricas**, tienen un consumo de agua similar a las termoeléctricas convencionales, en cuanto al agua de servicios y para el sistema de enfriamiento. Referente a las plantas **Hidroeléctricas**, éstas presentan consumos mínimos de agua para servicios, sin embargo, para su funcionamiento, estas plantas hacen uso del agua aunque con muy poca alteración a las condiciones físicas originales de ésta y las devuelven a su cauce sin modificar su volumen. Y por último, las plantas **Eoloeléctricas**, también sus consumos de agua son mínimos por lo que se consideran despreciables comparados con los de las otras plantas.

### Resultados

En la **Tabla 4** se presentan los consumos específicos ( $\text{m}^3/\text{MWh}$ ) únicamente para el caso de la operación de la planta y no se considera todo el consumo de agua por el ciclo de vida de la planta, por lo que no se están considerando los consumos en la construcción de la misma.

Debido a que se tenían diferentes consumos (para una misma planta) dependiendo de la potencia, el indicador de consumo de agua específico se tomó como el promedio ponderado de los diferentes consumos, de tal forma que para la planta de Ciclo Combinado el consumo promedio de agua fue de  $1.25 \text{ m}^3/\text{MWh}$ , para la planta Carboeléctrica es de  $2.675 \text{ m}^3/\text{MWh}$ , para la Nucleoeléctrica es de  $2.084 \text{ m}^3/\text{MWh}$  y para la Hidroeléctrica de  $3,540 \text{ m}^3/\text{MWh}$ . Para el caso de las plantas Eoloeléctricas, los consumos de agua son mínimos por lo que se consideraron despreciables.

**Tabla 4. Consumo de Agua por Tipo de Tecnología de Generación**

Central	Potencia (MW)	Consumo Especifico ( $\text{m}^3/\text{MWh}$ )
<b>Ciclo Combinado</b>	1x283	1.252
	1x566	1.250
	1x372	1.252
	1x744	1.246
	<b>Promedio</b>	<b>1.250</b>
<b>Carboeléctrica</b>	sin desulfurador	2.613
	con desulfurador	2.736
	<b>Promedio</b>	<b>2.675</b>
<b>Nuclear</b>	1x1356	<b>2.084</b>
<b>Eoloeléctrica</b>		<b>0.000</b>
<b>Hidroeléctrica</b>		<b>3,540</b>

Referencia. [27] CFE. Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico. Generación. México. 2004.

#### 4. Gases de Efecto Invernadero

##### ***Definición***

Este indicador muestra la relación entre las toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes y la cantidad de energía generada (tCO<sub>2</sub> equivalentes / GWh), estas emisiones van directamente relacionadas con el tipo de combustible utilizado y su consumo, debido a que todos los combustibles fósiles al quemarse emiten estos gases de efecto invernadero (GEI) que comprenden Bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y metano (CH<sub>4</sub>)

Para poder sumar todas las emisiones de GEI en un solo coeficiente de emisión, se considera la contribución que hace cada gas al efecto invernadero, el cual depende de su estructura molecular, de su tiempo de residencia en la atmósfera y de su efecto sobre otros gases, por lo que es importante conocer el potencial de calentamiento de dichos gases comparados con el CO<sub>2</sub>. De acuerdo con un análisis realizado<sup>20</sup> resultó que una molécula de CH<sub>4</sub> es 21 veces más efectiva para retener la radiación infrarroja en la atmósfera que una de CO<sub>2</sub>. Si se considera su tiempo de residencia y el efecto en el vapor de agua estratosférico en una escala de tiempo de cien años, el potencial de calentamiento del metano es aproximadamente 21 veces el del CO<sub>2</sub>. Por otra parte, en el mismo lapso de tiempo, un gramo de N<sub>2</sub>O es 320 veces más efectivo (al efecto invernadero) que un gramo CO<sub>2</sub>.

La suma de emisiones de CO<sub>2</sub>, de N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub> en su equivalencia en CO<sub>2</sub> se le denomina CO<sub>2</sub> equivalente.

El tener una tecnología con altas emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente por cada GWh, significa que al utilizarla de manera masiva, la dimensión ambiental del desarrollo sustentable se estará debilitando debido a que una alta concentración de estos GEI representa un aumento de temperatura en el globo terráqueo lo que implica cambios climáticos, que además también afectan el desarrollo económico del país y al bienestar social.

Este indicador tiene mucha importancia por su efecto global sobre el planeta Tierra y por eso el interés internacional de disminuir las emisiones de GEIs en todas las actividades que las producen (energéticas y no energéticas) así como la promoción de acciones que ayuden a la captura de CO<sub>2</sub> tales como reforestación.

*Un alto valor de este indicador implica una sustentabilidad baja.*

---

<sup>20</sup> SEMARNAT / INE. Estrategia Nacional de Acción Climática. México. 2002. p.178. [40].

## Resultados

A nivel mundial existen diferentes estudios que evalúan las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de las plantas de generación eléctrica y las presentan como emisiones de bióxido de carbono equivalente. En un estudio denominado *Implementación de Acuerdos para Tecnologías Hidroeléctricas*, realizado por la IEA<sup>21</sup>, las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes (eq.) se estimaron a través de un análisis del ciclo de vida de las plantas, en donde se consideran las emisiones totales de plantas por construcción, operación, mantenimiento y desmantelamiento. También se llevó a cabo un estudio similar por el Instituto Central de Investigación de Japón acerca de la Industria de Plantas Eléctricas que publicó las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes (eq.) a través del ciclo de vida de éstas para tres países (Japón, Suiza y Finlandia)<sup>22</sup>, **Tabla 5**. En la **Tabla 6** se realiza una comparación, del valor promedio simple de emisiones entre los tres países, con la información publicada por la IEA. Para efectos de este estudio, se utilizarán los valores de la IEA por considerarse más generales que los otros valores promedio para los países Japón, Suiza y Finlandia y que de cualquier forma están contenidos en los que se utilizarán.

**Tabla 5. Emisiones de CO<sub>2</sub> para el Ciclo de Vida de la Planta**

Emisiones de CO <sub>2</sub> para el Ciclo de Vida de la Planta (o del Carbono) (toneladas de CO <sub>2</sub> / GWh)				
	Japón	Suiza	Finlandia	Promedio
Carboeléctrica	975	980	894	950
Ciclo Combinado	519	450	472	480
Nuclear	22	6	10-26	18
Hidroeléctrica	11	3	-	7
Eoloeléctrica	29	5.5	14	16

Referencia: [17] UIC Nuclear Issues Briefing Paper # 71. *Energy Subsidies and External Costs*. 2004.

**Tabla 6. Comparación de Emisiones de GEI para el ciclo de vida de la planta**

	Emisiones de GEI en el ciclo de vida de la planta (tCO <sub>2</sub> eq./GWh)	Emisiones de GEI en el ciclo de vida de la planta (tCO <sub>2</sub> eq./GWh)
<b>Tipo de Tecnología</b>	Referencia: [30]	Referencia: [17]
Carboeléctrica	790 - 1182	950
Ciclo Combinado	389 - 511	480
Nuclear	2-59	18
Hidroeléctrica	2-48	7
Eólica	7 - 124	16

[30] IEA / Implementing Agreement for Hydropower Technologies and Programmes / KOCH Frans H. *Hydropower-Internalize Cost and Externalized Benefits*. Canadá. 2002. [www.nei.org/doc.asp?catnum=2&catid=260&docid=&format=print](http://www.nei.org/doc.asp?catnum=2&catid=260&docid=&format=print) [30]

[17] UIC Nuclear Issues Briefing Paper # 71. *Energy Subsidies and External Costs*. 2004. p.7 y 8. [17]

<sup>21</sup> IEA / Implementing Agreement for Hydropower Technologies and Programmes / KOCH Frans H. *Hydropower-Internalise Cost and Externalised Benefits*. Canadá. 2002. [www.nei.org/doc.asp?catnum=2&catid=260&docid=&format=print](http://www.nei.org/doc.asp?catnum=2&catid=260&docid=&format=print) [30]

<sup>22</sup> UIC Nuclear Issues Briefing Paper # 71. *Energy Subsidies and External Costs*. 2004. p.7 y 8. [17]

Otro estudio publicado por la Universidad de Leuven<sup>23</sup>, denominado “The indirect Greenhouse Gas Emissions Embedded in the Investment Goods for Emission-Free Power-Generating Technologies, Evaluated for Belgian Conditions”, llevó a cabo el análisis de las emisiones de GEI indirectas a la generación de energía eléctrica, básicamente aquellas que se generan en el proceso de construcción de las plantas, con dos tipos de análisis. El primer análisis “process-chain” (PCA) toma en cuenta los componentes de los materiales a utilizar en la construcción de la planta (acero, concreto, plástico, etc) y entonces analiza las emisiones de GEI de todo el proceso de producción de cada material. La energía requerida y las emisiones resultantes para todo el proceso de construcción de la planta se obtienen al sumar todas las emisiones de los diferentes procesos para la fabricación de los materiales utilizados. El segundo análisis denominado “input / output” (IOA) toma en cuenta las componentes económicas que se utilizarán para la construcción de la planta, por ejemplo maquinaria, construcción, servicios. También se realizó otro estudio similar al anterior, pero ahora para los Países Bajos, y muestra las emisiones de CO<sub>2</sub> eq para la construcción, mantenimiento y desmantelamiento de las plantas de generación eléctrica. En la **Tabla 7** se presentan los resultados obtenidos del estudio mencionado.

**Tabla 7. Emisiones Indirectas de GEI (tCO<sub>2</sub> eq/GWh) para Bélgica**

<b>Análisis - País</b>	<b>Nuclear</b>	<b>Hidroeléctrica a pequeña escala</b>	<b>Eoloeléctrica</b>
PCA - Bélgica [28]	1.07	13	8.4
IOA - Bélgica [28]	2.7	10	7.6
- Países Bajos [29]	3		9 - 25

[28] VOORSPOOLS Kris. R. / BROUWERS Els A. / D'HAESELEER William D. / Universidad de Leuven - División de Conversión de Energía y Mecánica Aplicada. *The indirect Greenhouse Gas Emissions Embedded in the Investment Goods for Emission-Free Power-Generating Technologies, Evaluated for Belgian Conditions.*

[29] VOORSPOOLS Kris. R. / BROUWERS Els A. / D'HAESELEER William D. / Universidad de Leuven - División de Conversión de Energía y Mecánica Aplicada. *The indirect Greenhouse Gas Emissions Embedded in “Emission-Free” Power Plant; Result for the Low Countries.*

## 5. Gases Lluvia Ácida (SO<sub>2</sub>)

### *Definición*

Los SO<sub>2</sub> se generan como producto de la combustión de combustibles fósiles, principalmente de aquellos que tienen altos contenidos de azufre como son el combustóleo y carbón, pero también en energías renovables como es la Geotermoelectrica, casi siempre el 95% del azufre contenido en el combustible se emitirá como bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).

Este gas es uno de los causantes, junto con los NO<sub>x</sub>, de la lluvia ácida, la cual implica cambios ecológicos y pérdidas en la economía. Este indicador se evalúa como la cantidad de SO<sub>2</sub> por GWh producido. *Un alto valor de este indicador indica una sustentabilidad baja respecto a las demás.*

<sup>23</sup> VOORSPOOLS Kris. R. / BROUWERS Els A. / D'HAESELEER William D. / Universidad de Leuven - División de Conversión de Energía y Mecánica Aplicada. *The indirect Greenhouse Gas Emissions Embedded in the Investment Goods for Emission-Free Power-Generating Technologies, Evaluated for Belgian Conditions.* [28].



## Resultados

En la **Tabla 8** se presentan los resultados de tres estudios realizados. Al igual que en las emisiones de GEI (CO<sub>2</sub> eq.) se consideraron más adecuados los resultados del estudio, más reciente, desarrollado por la IEA<sup>24</sup>, dado que tienen un carácter más general que los estimados para los países Alemania<sup>25</sup> y Canadá<sup>26</sup>; como se comentó con anterioridad este tipo de emisiones dependen del contenido de azufre en el tipo de combustible y éste varía de país en país.

**Tabla 8. Emisiones de SO<sub>2</sub> por el Ciclo de Vida de la Planta**

	Emisiones de SO <sub>2</sub> por el Ciclo de Vida de la Planta (miligramos de SO <sub>2</sub> / kWh)		
	Alemania [42]	Canadá [41]	Ciclo de Vida de la Planta [30]
Carboeléctrica	326	700	700 - 32321
Ciclo Combinado	3	4	4 - 15000
Eólica	15	21	21 - 87
Nuclear	32	3	3-50
Hidroeléctrica	0	5	5 - 60

[30] IEA / Implementing Agreement for Hydropower Technologies and Programmes / KOCH Frans H. *Hydropower-Internalize Cost and Externalized Benefits*. Canadá. 2002.

[41] International Energy Agency (IEA) - Implementing Agreement for Hydropower Technologies and Programmes. Frans H. Koch. *Hydropower-Internalized, Costs and Externalized Benefits*. Ottawa, Canada. 2000.

[42] W. Krewitt, P. Mayerhofer, R. Friedrich, A. Trukenmüller, T. Heck, A. Greßmann, F. Raptis, F. Kaspar, J. Sachau, K. Rennings, J. Diekmann, B. Praetorius. *ExternE - Externalities of Energy. National Implementation in Germany*. IER, Stuttgart. 1998.

## 6. Gases Lluvia Ácida (NOx)

### Definición

La formación de óxidos de nitrógeno dependen principalmente, de tres factores en la oxidación de un combustible (combustión): la concentración de los elementos que intervienen (oxígeno y nitrógeno), la temperatura de la flama en la combustión y la velocidad de enfriamiento de los gases en la chimenea. Este compuesto es el principal causante del olor característico del *smog* fotoquímico. Entre sus efectos se encuentran la irritación pulmonar y el ataque a los sistemas cardiovasculares.

*Un alto valor de este indicador indica una sustentabilidad baja.*

<sup>24</sup> IEA / Implementing Agreement for Hydropower Technologies and Programmes / KOCH Frans H. *Hydropower-Internalise Cost and Externalised Benefits*. Canadá. 2002. [www.nei.org/doc.asp?catnum=2&catid=260&docid=&format=print](http://www.nei.org/doc.asp?catnum=2&catid=260&docid=&format=print) [30].

<sup>25</sup> W. Krewitt, P. Mayerhofer, R. Friedrich, A. Trukenmüller, T. Heck, A. Greßmann, F. Raptis, F. Kaspar, J. Sachau, K. Rennings, J. Diekmann, B. Praetorius. *ExternE - Externalities of Energy. National Implementation in Germany*. IER, Stuttgart. 1998. [42]

<sup>26</sup> International Energy Agency (IEA) - Implementing Agreement for Hydropower Technologies and Programmes. Frans H. Koch. *Hydropower-Internalized, Costs and Externalized Benefits*. Ottawa, Canada. 2000. [41]

## Resultados

En la **Tabla 9** se muestran los resultados de dos estudios realizados, uno en los países de Alemania y Canadá, y el otro realizado a nivel internacional<sup>27</sup>. Estos últimos datos son los utilizados en este estudio.

**Tabla 9. Emisiones de NOx por el Ciclo de Vida de la Planta**

	Emisiones de NOx por el Ciclo de Vida de la Planta (miligramos de NOx / kWh)		
	Alemania [42]	Canadá [41]	Ciclo de Vida de la Planta [30]
Carboeléctrica	560	700	700 - 5273
Ciclo Combinado	277	13	13 - 1500
Eólica	20	14	14 - 50
Nuclear	70	2	2 - 100
Hidroeléctrica		3	3 - 42

[30] IEA / Implementing Agreement for Hydropower Technologies and Programmes / KOCH Frans H. *Hydropower-Internalize Cost and Externalized Benefits*. Canadá. 2002.

[41] International Energy Agency (IEA) - Implementing Agreement for Hydropower Technologies and Programmes. Frans H. Koch. *Hydropower-Internalized, Costs and Externalized Benefits*. Ottawa, Canada. 2000.

[42] W. Krewitt, P. Mayerhofer, R. Friedrich, A. Trukenmüller, T. Heck, A. Greßmann, F. Raptis, F. Kaspar, J. Sachau, K. Rennings, J. Diekmann, B. Praetorius. *ExternE - Externalities of Energy. National Implementation in Germany*. IER, Stuttgart. 1998.

## 7. Gases que dañan la capa de ozono

### Definición

Este indicador se evalúa con la cantidad de Cloro-fluoro-carbonos (CFC) que se producen por cada GWh generado (Toneladas de CFC/GWh).

Los CFF's constituyen una amenaza para el medio ambiente debido a que destruyen la capa de ozono, al debilitarse dicha capa, los rayos ultravioletas del sol provocan graves daños a la salud, entre los que se encuentra el problema de cáncer en la piel el cual afecta directamente el bienestar social.

### Resultados

Este indicador no se considera en este estudio debido a que la cantidad de gases que dañan la capa de ozono producidos por las plantas de generación eléctrica, es casi nulo.

## 8. Tiempo necesario de confinamiento

### Definición

Indica el tiempo necesario en años que se necesita para que las sustancias peligrosas producidas se degraden hasta niveles de toxicidad despreciables.

### Resultados

No se considerará este indicador para el estudio, dado que se considera que al ocuparlo se duplicaría la evaluación de sustentabilidad, por lo tanto no se presentan los resultados.

## Dimensión Económica

### 9. Costos Internos

#### *Definición*

Los costos internos se refieren básicamente a los de operación y mantenimiento de una planta de generación de energía eléctrica más los costos por concepto de inversión y del consumo de combustible.

*Un alto valor de este indicador indica una sustentabilidad baja.*

#### *Resultados*

Estos costos están claramente evaluados para México<sup>28</sup> y se muestran en la **Tabla 10**. Dado que de cada planta, dependiendo de la potencia, existe un rango de valores para los costos internos, se tomará el valor superior e inferior de cada una de las tecnologías así como el promedio simple y se hará la evaluación de la sustentabilidad con los tres datos.

Como se observa en la **Tabla 10**, la tecnología que presenta los costos internos más bajos es la de Ciclo Combinado (42.76-45.80 US\$/MWh) y la Nucleoeléctrica (43.65 US\$/MWh), seguida por la Eoloeléctrica (43.63-55.55 US\$/MWh); y la planta más cara es la planta Hidroeléctrica (60.24-143.42 US\$/MWh), de hecho estos costos son elevados por lo costoso de la inversión.

---

<sup>27</sup> IEA / Implementing Agreement for Hydropower Technologies and Programmes / KOCH Frans H. Hydropower-Internalise Cost and Externalised Benefits. Canadá. 2002. [www.nei.org/doc.asp?catnum=2&catid=260&docid=&format=print](http://www.nei.org/doc.asp?catnum=2&catid=260&docid=&format=print) [30].

<sup>28</sup> CFE. *Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico*. Generación. México. 2004. [27]

**Tabla 10. Costo unitario de generación en dólares de 2004, precios medios de 2004 (US\$/MWh)**

Central	Potencia (MW)	Costo unitario de generación que incluye la inversión más el combustible más la operación y mantenimiento (US\$/MWh)
<b>Ciclo Combinado</b>	1x283	45.80
	1x568	43.70
	1x372	44.85
	1x744	42.76
	<b>Rango</b>	<b>42.76 - 45.80</b>
<b>Carboeléctrica</b>	con desulfurador	51.16
	sin desulfurador	55.61
	<b>Rango</b>	<b>51.16 - 55.61</b>
<b>Nuclear</b>	<b>1x1356</b>	<b>43.65</b>
<b>Hidroeléctrica</b>	3x320	103.09
	2x120	143.42
	2x33	60.24
	2x46	68.40
	3x200	96.46
	2x50	81.35
	5x300	63.40
	4x105	70.47
	2x146	128.86
	<b>Rango</b>	<b>60.24 - 143.42</b>
Eólica (Clase 6) <sup>29</sup>	5x1.5	55.55
	10x1.5	52.86
	34x1.5	48.66
Eólica (Clase 7)	5x1.5	49.81
	10x1.5	47.39
	34x1.5	43.63
<b>Eólica</b>	<b>Rango</b>	<b>43.63 - 55.55</b>

[27] CFE. Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico. Generación. México. 2004. Cuadro A.1, pag. A.4 ó pag. 158 y Cuadro E.5, pag. E.19, pag. 231.

<sup>29</sup> La Clase se refiere a la clase de potencia del viento (que incluye la densidad de potencia del viento  $W/m^2$  y la velocidad media del viento, m/s), las clases de 4 a 6 son consideradas las más deseables para proyectos comerciales.

## 10. Costos Externos

### *Definición*

Los **Costos Externos** se definen como aquellos que intervienen en lo relacionado con la salud y el medio ambiente, sin embargo no son parte de los costos de electricidad que paga el usuario, aunque éstos se pagan por la sociedad a largo plazo. Estos costos incluyen principalmente los efectos de la contaminación del aire en la salud humana, los efectos de las tierras de cultivo pérdidas por las construcciones de las plantas, así como las enfermedades y accidentes. Los datos de 2001, excluyen los efectos en los ecosistemas, del calentamiento global de la Tierra, sin embargo los datos utilizados en este estudio se incluyen, a pesar de que hay un alto grado de incertidumbre en la cuantificación adecuada del impacto de estos efectos en la economía<sup>30</sup>. Estos costos se refieren a los costos adicionales que son consecuencia del uso de alguna de las tecnologías de generación en particular.<sup>31</sup>

Otra definición de costos externos<sup>32</sup>, indica que, se alcanza un costo externo cuando una actividad social y económica de un grupo de personas tiene un impacto en otro grupo y cuando el impacto no es contabilizado en su totalidad, o compensado por el primer grupo. De tal modo que una planta de generación eléctrica que emite SO<sub>2</sub>, causa daños a la salud humana o a las estructuras de las edificaciones lo que implica un costo externo. Lo anterior es porque el impacto en los propietarios de las edificaciones o en aquellos que sufren daño en su salud no es tomado en cuenta por el productor de electricidad, aún cuando las actividades para generar la electricidad causan el daño. En este ejemplo, los costos ambientales son "externos", porque aunque éstos son costos reales a esos miembros de la sociedad, el propietario de la planta de generación eléctrica no los toma en cuenta al momento de tomar decisiones.

Hay diferentes formas de tomar en cuenta los costos al ambiente y la salud, por ejemplo, "internalizando" los costos externos. Una posibilidad podría ser a través de eco-impuestos, por ejemplo implantando un impuesto por el daño que causan los combustibles o las tecnologías, de acuerdo con el costo externo causado.<sup>33</sup>

*Un alto valor de este indicador indica una sustentabilidad baja.*

<sup>30</sup> Se incluyen los costos para mitigación de GEI y no los costos de desastres como consecuencia del cambio climático, como son las inundaciones, sequías, etc.

<sup>31</sup> UIC Nuclear Issues Briefing Paper # 71. *Energy Subsidies and External Costs*. 2004. p.7 y 8. [17]

<sup>32</sup> European Commission / Community Research. *External Cost: Research Results on Socio-Environmental Damages Due to Electricity and Transport*. Bélgica. 2003. p.15. [19]

<sup>33</sup> European Commission / Community Research. *External Cost: Research Results on Socio-Environmental Damages Due to Electricity and Transport*. Bélgica. 2003. p.15. [19]

## **Resultados**

De acuerdo con los autores del estudio ExternE, se muestra que los costos externos para el caso de las plantas Carboeléctricas representan una alta proporción (50-70%) de los costos internos, mientras que los costos externos de las plantas Nucleoeléctricas representan solamente un pequeño porcentaje de los costos internos, aún tomando en cuenta algunos desastres nucleares hipotéticos. Esto es porque los costos de manejo de los desechos nucleares se consideran como costos internos, lo cual reduce la competencia de las plantas nucleares cuando sólo se consideran los costos internos. Los costos externos de las plantas Nucleoeléctricas son de alrededor de 0.4 centavos de euro/kWh muy parecidos a los de las plantas Hidroeléctricas, las Carboeléctricas se encuentran alrededor de 4 centavos de euro/kWh (4.1 - 7.3 centavos en promedio en diferentes países), las plantas de Ciclo Combinado tienen costos internos en un rango de 1.3-2.3 centavos y solamente las plantas Eoloeléctricas muestran costos internos más bajos que las Nucleoeléctricas en promedio entre 0.1-0.2 centavos de euro/kWh.<sup>34</sup>

En Estados Unidos los costos de generación de electricidad sin incluir los costos externos son de aproximadamente de 4 centavos de euro/kWh. Si los costos externos fueran incluidos, los precios de la electricidad en Estados Unidos de las plantas Carboeléctricas se deberían de incrementar al doble de lo que es en la actualidad y los de las plantas de Ciclo Combinado deberían de incrementarse en un 30%.<sup>35</sup>

En la **Tabla 11** se presentan los resultados del estudio ExternE para los países de la Unión Europea, los costos mostrados están integrados por aquellos que son resultado de los daños por causa de ruido, en la salud, materiales, cultivos agrícolas, y costos para evitar el calentamiento global (solo costos por mitigación de GEI y no los costos por desastres) y el cambio en los ecosistemas.

Para cada tecnología se tomó el valor superior, inferior y promedio simple de estos costos, siendo la Eoloeléctrica la tecnología con los costos externos más bajos (0.2 euros/KWh) y la Carboeléctrica la que presenta los costos externos más altos (4.8 euros/KWh en promedio).

---

<sup>34</sup> European Commission / Community Research. *External Cost: Research Results on Socio-Environmental Damages Due to Electricity and Transport*. Bélgica. 2003. p.15. [19]

<sup>35</sup> UIC Nuclear Issues Briefing Paper # 71. *Energy Subsidies and External Costs*. 2004. p.7 y 8. [17]

**Tabla 11. Costos Externos por generación de energía eléctrica (centavos de euro por kWh)**

<b>Pais</b>	<b>Carbon</b>	<b>Gas Natural</b>	<b>Nuclear</b>	<b>Hidroeléctrica</b>	<b>Eólica</b>
Austria		3		0.1	
Bélgica	15	2	0.5		
Alemania	6	2	0.2		0.05
Dinamarca	7	3			0.1
Espana	8	2			0.2
Finlandia	4				
Francia	10	4	0.3	1	
Grecia	8	1		1	0.25
Irlanda	8				
Italia		3		0.3	
Países Bajos	4	2	0.7		
Noruega		2		0.2	0.25
Portugal	7	2		0.03	
Suiza	4			0.7	
Reino Unido	7	2	0.25		0.15
<b>Promedio</b>	<b>4.8</b>	<b>1.8</b>	<b>0.4</b>	<b>0.3</b>	<b>0.2</b>
<b>Rango</b>	<b>4-15</b>	<b>1-4</b>	<b>0.2-0.5</b>	<b>0.03-0.7</b>	<b>0.05-0.25</b>

[19] European Commission / Community Research. *External Cost: Research Results on Socio-Environmental Damages Due to Electricity and Transport*. Bélgica. 2003

## 11. Disponibilidad de Reservas Energéticas

### *Definición*

Este indicador mide básicamente la disponibilidad del recurso energético, esto es, el tiempo (en años) que tardarán en agotarse las reservas probadas que se tienen en el mundo en general y en México en específico, o bien es la cantidad de años que durará determinada reserva energética. Para este indicador se tiene que mostrar las condiciones para las que se considera este tiempo, es decir señalar el escenario en donde se encuentra inmersa esta suposición; todas las tecnologías deberán evaluarse en las mismas condiciones. Para evaluar este indicador hay que referirse a los estudios de las reservas energéticas nacionales e internacionales probadas y a los ritmos de consumo del energético.

Si el tiempo que durarán las reservas de un determinado energético es muy grande en comparación con otro, al instalar una planta que utilice este energético se tendrá la seguridad de que no se presentarán problemas de abastecimiento, ni la necesidad de conseguir nuevas tecnologías que utilicen otros energéticos.

Un menor horizonte de disponibilidad de los recursos energéticos no renovables (relación reservas / producción) implica un riesgo en la medida en que la economía dependa de forma muy marcada de

la explotación de tales recursos. Por ejemplo, la explotación intensa de energéticos fósiles no es sustentable en caso de un bajo nivel de reservas, y pone en peligro el desarrollo socioeconómico del país en el largo plazo, sobre todo si no hay reinversión suficiente en otras tecnologías que no dependan de los combustibles fósiles.

*Un bajo valor de este indicador indica una sustentabilidad baja.*

### **Resultados**

Además de las plantas que utilizan energía renovable, siempre ha sido una pregunta de cual es la energía más abundante y menos contaminante. Hoy, hasta cierto punto casi inimaginable hace 25 años, hay una abundancia de fuentes energéticas en la tierra. El carbón y el uranio (sin mencionar al Torio) están disponibles y no se agotarán en este siglo. El uranio es aún disponible a partir del agua del océano con costos que pudieran tener pequeños impactos en los precios de la electricidad.<sup>36</sup>

Hay abundante carbón en muchas partes del mundo, sin embargo con las restricciones puestas por el calentamiento global, es seguro que el uso de éste vaya en decremento, sin embargo las propuestas recientes de tecnologías con "carbón limpio" podrían cambiar este punto de vista. La principal tecnología involucra el uso de carbón para obtener hidrógeno a partir del vapor de agua a través de un proceso de gasificación en dos fases, entonces se reduce el bióxido de carbono y se quema el hidrógeno. Estos elementos de la tecnología contribuirían en llevar a cabo algún cambio sin embargo los costos no pueden competir aún con las otras tecnologías de generación eléctrica.<sup>37</sup>

burying

En el caso del Gas Natural es también razonablemente abundante, sin embargo existe un problema de política exterior para poder llevar a cabo importaciones de Gas Natural.

### Gas Natural

De acuerdo con la Secretaría de Energía<sup>38</sup>, las reservas de Gas Natural, para México, para el año 2003 fueron de 15 billones de pies cúbicos, por lo que la relación: Reservas / Producción (R/P) en años, representa un total de 11 años de existencia de este hidrocarburo. Si se toman en cuenta las reservas de Gas Natural, en todo el mundo, también para el año 2003, la relación R/P es de 67.1 años.

---

<sup>36</sup> UIC Nuclear Issues Briefing Paper # 54. *Sustainable Energy*. 2004. p.2 y 3 [www.uic.com.au/nip54.htm](http://www.uic.com.au/nip54.htm) [26]

<sup>37</sup> UIC Nuclear Issues Briefing Paper # 54. *Sustainable Energy*. 2004. p.2 y 3 [www.uic.com.au/nip54.htm](http://www.uic.com.au/nip54.htm) [26]

<sup>38</sup> SENER, *Prospectiva del Mercado de Gas Natural 2004-2013*. México. 2004. p. 21. [13]



### Carbón

De acuerdo con la Secretaría de Energía<sup>39</sup>, las Reservas de Carbón, probadas para México, en 1995 fueron de 2,229 millones de toneladas, si se toma en cuenta elevar la producción de 12 a 20 millones de toneladas por año para satisfacer la demanda de carbón de las plantas Carboeléctricas instaladas en México pero además agregarle otra planta Carboeléctrica de 2,100 MW, las reservas permitirían atender otros 100 años esta demanda.

### Uranio

De acuerdo con lo establecido en BIAC Task Force on Climate Change, Discussion on Nuclear Energy<sup>40</sup>, las reservas mundiales presentan una relación R/P de 250 años, al menos.

### Agua y Viento

En este caso las reservas son inagotables, claro sin que eso implique que su potencial de aprovechamiento es infinito, ya que el recurso debe estar disponible en el lugar específico de la instalación de generación eléctrica, el valor utilizado para hacer la comparación, es de 1,000 para representar que el recursos aunque es inagotable no es infinitamente disponible.

## **12. Disponibilidad de la Tecnología**

En este indicador se han considerado dos datos que pueden representar la disponibilidad de la tecnología, el primero se basa en la inversión<sup>41</sup> que se tiene que realizar para instalar un kW y que consiste en el costo directo que se refiere a las erogaciones correspondientes a la instalación de una central, más el costo indirecto que se refiere los costos de ingeniería, administración y control de la obra incurridos en las oficinas centrales y unidades foráneas de CFE.

El segundo dato se refiere más bien al componente importado<sup>42</sup> de los insumos para instalar una planta de generación eléctrica y está dado en forma de porcentaje (**Tabla 12**).

Se considera que los dos datos influyen en que una tecnología esté disponible o no, dado que si se tiene una inversión alta en comparación con otras tecnologías, entonces es un indicativo de que la tecnología tiene una baja disponibilidad, al menos si se toma en cuenta instalar plantas de bajos costos de inversión.

---

<sup>39</sup> SENER, *Balance Nacional de Energía 2002*. México. 2004. p. 136, 141, 146, 147, 151 y 169. [14]

<sup>40</sup> BIAC Task Force on Climate Change, *Discussion on Nuclear Energy*. Agosto 2002. [20]

<sup>41</sup> CFE. *Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico*. Generación. México. 2004. [27]

<sup>42</sup> CFE. *Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico*. Generación. México. 2004. [27]

Por otro lado, si se considera el valor del componente importado de los insumos, quiere decir que a medida que se tenga una mayor fracción de componentes importados, entonces es menos disponible en nuestro país lo cual representa costos de importación.

Sin embargo el costo de inversión ya está considerado en el indicador de Costos Internos, por lo cual, en este estudio se realizó el análisis con el indicador de porcentaje de componente importado.

Dado que para las plantas Eoloeléctricas no se determinó el valor del componente importado, se consideró que éste era similar al de una planta de Ciclo Combinado, es decir de 0.730.

*Un alto valor de este indicador implica una sustentabilidad baja.*

**Tabla 12. Porcentaje de Componentes Importados de los Insumos requeridos para la instalación de una planta de generación eléctrica**

Tipo de Tecnología de Generación	Componente Importado
Ciclo Combinado	0.730
Carboeléctrica	0.461
Nuclear	0.441
Hidroeléctrica	0.294
Eoloeléctrica	0.730

[27] CFE. Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico. Generación. México. 2004. Cuadro A.2, pag. A.5 ó pag. 159.

## Dimensión Política

### 13. No-necesidad de estabilidad sociopolítica / financiera

#### **Definición**

Con este indicador se evalúa si las diferentes tecnologías de generación requieren estabilidad sociopolítica y financiera para poder instalarse, así como una aceptación pública.

En este indicador, el valor "1" indica la necesidad de estabilidad sociopolítica – financiera y aceptación pública y el valor "0" indica que no se necesita tal estabilidad.

*Un alto valor de este indicador implica una sustentabilidad baja.*

#### **Resultados**

En este estudio se consideró que las plantas Carboeléctricas e Hidroeléctricas no requieren estabilidad sociopolítica y financiera para poder instalarse, por lo tanto el valor del indicador para estas plantas es de "1"; sin embargo, recientemente se ha observado que esta situación ha

cambiado dado que es muy alta la influencia de la aceptación pública para poder instalarlas, por lo que en otro análisis debería tomarse en cuenta este criterio.

En el caso de las plantas de Ciclo Combinado, Nucleoeléctrica y Eoloeléctrica se considera que sí requieren de esta estabilidad así como de la aceptación pública, por lo que el indicador tiene un valor de cero; el caso del combustible, para las plantas de Ciclo Combinado, requiere políticas estables de los organismos públicos (PEMEX) para mantener las reservas y aumentar sus expectativas de explotación y producción. En el caso de las plantas Nucleoeléctricas, es de vital importancia la aceptación pública así como una estabilidad financiera. En el caso de las plantas Eoloeléctricas, se requiere la intervención de organismos internacionales para que se logren llevar a cabo las inversiones en este tipo de tecnologías, por lo cual se considera que requieren estabilidad política, financiera y aceptación pública.

#### **14. Dependencia del Exterior**

##### ***Definición***

Este indicador cualitativo se refiere a las importaciones de combustible a realizar para mantener la operación de las plantas de generación eléctrica. Por ejemplo, en la actualidad y como se comentaba anteriormente, la prospectiva del sector eléctrico va totalmente enfocada a plantas de Ciclo Combinado, las que por supuesto utilizarían Gas Natural, sin embargo, si no existe una inversión suficiente en México para que la producción pueda sostener el consumo, en los siguientes años, se tendrá una alta dependencia del exterior porque se tendría que importar este combustible.

Este es un indicador que se les asignara un valor en función de la cantidad de importaciones que se estarán realizando para satisfacer la demanda interna en el sector eléctrico.

*Un alto valor de este indicador indica una baja sustentabilidad.*

##### ***Resultados***

En este indicador se está considerando como dependencia del exterior, las importaciones que se tendrían que hacer del recurso energético, para satisfacer la demanda de éste para la producción de electricidad. En este sentido se toma en cuenta la relación entre el combustible importado utilizado para generación de energía eléctrica con respecto al consumo de combustible total para generar electricidad.

En la **Tabla 13** se muestra el porcentaje de combustible importado para generación de energía eléctrica con respecto al consumo de combustible total para ese sector (en México), para el caso de las plantas Nucleoeléctricas, todo el uranio consumido se importa (100%), en el caso del carbón, se

importa un 41% del utilizado; y en el caso del Gas Natural, se importa el 18% del combustible utilizado.

**Tabla 13. Porcentaje de Combustible Importado con Respecto al Consumo Total de Combustible para Generación de Energía Eléctrica**

	<b>Carbón<sup>43</sup></b>	<b>Gas Natural<sup>44</sup></b>	<b>Uranio</b>
Producción total (PJ)	220.268	1087.466	
Importación (PJ)	153.317	236.84	
<b>CTM:</b> Consumo de combustible total en México (PJ)	373.585	1324.306	
<b>CE:</b> Consumo de combustible para generación de electricidad (PJ)	264.102	529.026	
<b>RCECTM:</b> Relación de consumo de combustible para generación de electricidad con respecto al consumo de combustible total en México	71%	40%	
<b>ICE:</b> Importación de combustible para generación de electricidad (PJ)	108.39	94.61	
<b>RICE:</b> Relación de importación de combustible para generación de electricidad con respecto al consumo de combustible para generación de electricidad	<b>41%</b>	<b>18%</b>	<b>100%</b>

Referencia: [14] SENER, *Balance Nacional de Energía 2002*. México. 2004. p. 146, 147, 151 y 169.

Los datos mostrados en la **Tabla 13** se calcularon de la siguiente forma se obtuvieron de la siguiente forma:

CTM = Producción + Importación

RCECTM = (CE/CTM)

ICE = (CE/CTM) \* Importación

RICE = ICE / CE

### 15. Robustez: no necesidad de intervenciones externas rápidas

Se refiere al tiempo necesario en horas que se requiere para que una planta de generación responda ante algún accidente o fallo.

Este indicador no se toma en cuenta en el análisis, debido a que no se encontraron datos en las investigaciones realizadas.

### 16. Tratado de no proliferación

Se refiere a dos aspectos importantes: salvaguardia y protección física y están estrechamente ligados con la energía nuclear.

<sup>43</sup> Los datos utilizados son para México para el año 2002

<sup>44</sup> Los datos utilizados son para México para el año 2002

En cuanto a salvaguardia existe un Sistema Internacional de Verificación desarrollado con el fin de asegurar que un material especial fisible o cualquier otro material, servicios, equipos, dispositivos o informaciones no sean desviados hacia las armas nucleares o cualquier otro artefacto nuclear explosivo. Este sistema tiene su aplicación en el marco internacional de una política de no proliferación para la utilización pacífica de la energía nuclear, amparada por el Organismo Internacional de la Energía Atómica, mediante el Tratado de Tlatelolco.

En cuanto a la protección física, se tienen medidas para la protección de materiales y dispositivos nucleares con el fin de evitar un desvío no autorizado o un sabotaje. También puede ser considerada la protección física como una de las medidas que puede reducir el riesgo de la proliferación y que puede unirse a las medidas de salvaguardia como pueden ser confinamiento o vigilancia.

Específicamente México tiene firmado el Tratado de Tlatelolco y lo respeta fielmente.

Este indicador se mide de manera cualitativa y se refiere a los tratados y acuerdos que se tengan en pro de los dos puntos mencionados anteriormente.

Este indicador no se toma en cuenta en el análisis.

## **Dimensión Social**

### **17. Accidentes / Riesgo Colectivo (Muertes por TW-año)**

#### ***Definición***

Este indicador se refiere a la cantidad de muertes por unidad de energía eléctrica producida (muertes / TW-año) por sus actividades asociadas originadas en un accidente de tal magnitud que sea masivo o colectivo. Un ejemplo de este indicador sería la cantidad de muertes ocasionadas en Chernobyl, o los accidentes en la construcción de presas para plantas Hidroeléctricas así como en instalaciones de extracción y transporte de hidrocarburos, sin olvidar los accidentes de las minas de carbón.

Este indicador se utiliza para establecer el riesgo en la salud humana derivado de las plantas de generación eléctrica y sus cadenas productivas por energía producida.

Las plantas de generación eléctrica se asocian con impactos al medio ambiente incluyendo riesgos en la salud humana, en este caso y tomando en cuenta toda la cadena productiva, la extracción del combustible (en el caso de los combustibles fósiles), el transporte, el uso y desecho de los residuos

involucran peligros que en muchos casos se traducen en accidentes. La operación de una terminal de Gas Natural Comprimido (GNC), la transportación del petróleo, la explotación del carbón o de la energía hidráulica para una presa para generación de energía eléctrica requiere conciencia y confiabilidad de los sistemas para minimizar las fallas con el objetivo de minimizar los riesgos de accidentes y por lo tanto las muertes.

*Un alto valor de este indicador indica una sustentabilidad baja.*

### **Resultados**

De acuerdo con una publicación de la Canadian Nuclear Association (2003)<sup>45</sup>, en 1998 se llevó a cabo un estudio en Suiza en 1998 como parte del "Proyecto GABE Evaluación detallada de Sistemas Energéticos: Accidentes severos en el Sector Energético" en donde se hacen comparaciones de los accidentes "severos" que se han generado como parte de la construcción, operación y desmantelamiento de las plantas de generación eléctrica y que obviamente son atribuibles a este sector; dichas comparaciones se llevan a cabo para diferentes estratos de países, tomando en cuenta la siguiente clasificación: (1) registros promedios mundiales, (2) para países OECD, y (3) países fuera de la OECD. El estudio se basa en accidentes severos y sus consecuencias inmediatas, la institución cuenta con una base de datos de 13,914 accidentes severos de los cuales 4,290 se relacionan con sistemas energéticos.

La institución define a un accidente severo como aquel que presenta las siguientes características:

- Más de 5 muertes
- 10 heridos
- 200 evacuaciones como resultado de consumo de algún alimento prohibido
- Derrame de más de 10,000 toneladas de hidrocarburos
- Limpieza de un área de tierra o de agua de al menos 25 km<sup>2</sup>
- Una pérdida económica de más de 5 millones de US\$ (1996)

El estudio se basa en datos históricos y no proyecciones. Todas las tecnologías se estudian en ciclo completo, a continuación se presentan las etapas que se consideran para cada tecnología:

Carboeléctrica: (Carbón) Exploración, extracción de las minas, transportación, combustión y disposición de los residuos.

---

<sup>45</sup> Canadian Nuclear Association/ The Paul Scherrer Institut/ Hirschberg S., Spiekerman G., Dones R./ *Severe accident analysis for large energy system: executive summary*. Suiza. Abril 2003. [16]

Ciclo Combinado:	(Gas Natural) Exploración, extracción, refinación, transportación, distribución y consumo.
Nuclear:	Exploración, extracción de las minas, transportación, operación de la planta nuclear, reproceso y disposición de los residuos.
Hidroeléctrica:	Solamente la operación de la planta.

De acuerdo con la **Tabla 14**, el tipo de tecnología a la que se le atribuyen más accidentes severos, es la Hidroeléctrica, que de acuerdo con los registros mundiales presenta 1026 muertes/TW-año; sin embargo si se toma el caso de los registros de países OECD (que México se encuentra en esta lista), la tecnología con más accidentes severos es la Carboeléctrica con un total de 137 muertes/TW-año.

Para efectos de establecer un valor para este indicador, se optó por tomar en cuenta un rango de valores para cada tecnología, así como un valor promedio de este rango; por lo anterior se llevaron a cabo evaluaciones con el valor superior, inferior y promedio. Para el caso de las plantas Eoloeléctricas, no se presentan registros aún.

**Tabla 14. Muertes por Unidad de Energía Generada**

Tecnología	Muertes por Terawatt año (TW-año)			Rango	Promedio
	Registros Mundiales	Registros Países OECD	Registros Países NO-OECD		
Carboeléctrica	342	137	514	137-514	<b>331</b>
Ciclo Combinado	85	66	109	66-109	<b>87</b>
Nuclear	8	0	53	0-53	<b>20</b>
Hidroeléctrica	883	4	2190	4-2190	<b>1026</b>
Eoloeléctrica	No se presentan registros aún				

Referencia: [16] Canadian Nuclear Association/ The Paul Scherrer Institut/ Hirschberg S., Spiekerman G., Dones R./ *Severe accident analysis for large energy system: executive summary*. Suiza. Abril 2003.

## 18. Aversión al riesgo (rechazo)

### **Definición**

Este indicador se refiere a la aceptación o rechazo de la sociedad por instalar una planta de algún determinado tipo, se mide en muertes que pueden haberse originado en el proceso de construcción y operación de una planta. La diferencia con el indicador anterior, es que éste considera las muertes en total y no por unidad de energía, pero además toma en cuenta todas y no solamente las que se refieren a un accidente colectivo.

*Un alto valor de este indicador indica una sustentabilidad baja.*

## **Resultados**

En noviembre de 1998 un estudio del Instituto Paul Scherrer en Suiza presenta otros aspectos de los costos externos. Las cuatrocientas páginas del reporte fueron comisionadas a la Oficina Federal de Energía Sueca y presenta datos de 4,290 accidentes relacionados con la energía, 1943 de ellos fueron clasificados como severos y comparan diferentes fuentes de energía. Los resultados fueron, arriba de 15,000 muertes relacionadas con el petróleo, arriba de 8,000 relacionadas con el carbón y alrededor de 5,000 relacionadas con las plantas Carboeléctricas.<sup>46</sup>

De acuerdo con un estudio similar al anterior, pero realizado por la Nuclear Electricity<sup>47</sup> se indica que las muertes inmediatas por accidentes en diferentes tipos de tecnologías de generación han sido, desde 1972 a 1992, las siguientes: Para las Carboeléctricas se tienen registradas 6,400 muertes inmediatas, para las plantas de Ciclo Combinado 1,200, para las Hidroeléctricas 4,000 y para las nucleares apenas de 31 muertes de trabajadores.

## **19. Extensión de Tierra Perdida por Operación de la Planta**

### **Definición**

Se refiere a la extensión de tierra que se pierde por instalar y operar una planta de generación eléctrica, las unidades utilizadas son km<sup>2</sup> por cada GWh. La evaluación de este indicador también debe ser un promedio de los km<sup>2</sup> utilizados por una planta típica entre la generación eléctrica producida.

Este indicador se considera adecuado para evaluar la sustentabilidad debido a que al utilizarse una extensión de tierra para instalar una planta de generación eléctrica, se deja de utilizar la tierra para actividades agrícolas y en algunos casos (principalmente Hidroeléctricas) es necesario desplazar a la población para poder aprovechar el recurso en el sitio adecuado.

*Un alto valor de este indicador indica una sustentabilidad baja.*

### **Resultados**

De acuerdo con la investigación realizada, se encontraron dos estudios que hacen referencia a este indicador, uno de ellos<sup>48</sup> basado en los requerimientos de recursos territoriales para la construcción de plantas de generación eléctrica que produzcan 1 billon de kWh para una ciudad de 100,000

---

<sup>46</sup> UIC Nuclear Issues Briefing Paper # 71. *Energy Subsidies and External Costs*. 2004. p.7 y 8. [17]

<sup>47</sup> WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *External Costs – Environment, Health and Safety Issues* en Nuclear Electricity 7<sup>th</sup> edition, ch 6. [11]

<sup>48</sup> PIMENTEL David / PIMENTEL Marcia, Department of Entomology and Division of Nutritional Sciences, / Cornell University. *Land, Energy and Water: The Constraints Governing Ideal U.S. Population Size*. Ithaca, New York, U.S.A. [21]



personas; y el otro<sup>49</sup> relacionado directamente con la extensión de tierra requerida para la instalación de un planta típica de las diferentes tecnologías.

En la **Tabla 15** se muestran los requerimientos de recursos territoriales para la construcción de plantas de energía que produzcan un billón de kWh/año para una ciudad de 100,000 personas, en este estudio la tecnología que requiere de una mayor cantidad de tierra o que tiene una mayor tierra perdida es la planta Hidroeléctrica, presentando  $1.3 \times 10^{-4}$  km<sup>2</sup>-año/GWh. Dado que en este estudio no se hizo la evaluación para plantas de Ciclo Combinado, se considera que la extensión de tierra perdida es igual que para las plantas Carboeléctricas.

**Tabla 15. Requerimientos de Recursos Territoriales para la Construcción de Plantas de Energía que Produzcan 1 billón de kWh/año para una Ciudad de 100,000 personas**

Tecnología	Extensión de Tierra Requerida (Hectáreas por 1 billon de kWh por año)	Extensión de Tierra Requerida (km <sup>2</sup> -año/GWh)
Carboeléctrica	90	$9.0 \times 10^{-7}$
Ciclo Combinado	90	$9.0 \times 10^{-7}$
Nuclear	68	$6.8 \times 10^{-7}$
Hidroeléctrica	13,000	$1.3 \times 10^{-4}$
Eólica	2,700	$2.7 \times 10^{-5}$

Referencia: [21] PIMENTEL David / PIMENTEL Marcia, Department of Entomology and Division of Nutritional Sciences, / Cornell University. Land, Energy and Water: The Constraints Governing Ideal U.S. Population Size. Ithaca, New York, U.S.A. 1989.

Ahora de acuerdo con los resultados del otro estudio<sup>50</sup> (**Tabla 16**), continúa siendo la planta Hidroeléctrica, la que requiere una mayor cantidad de terreno para instalarse, en este estudio, esta planta requiere  $1.2 \times 10^{-1}$  km<sup>2</sup>-año/GWh.

<sup>49</sup> SPITZLEY David V & KEOLEIAN Gregory A.. / Center for Sustainable Systems, University of Michigan. Life Cycle Environmental and Economic Assessment of Willow Biomass Electricity: A Comparison with Other Renewable and Non-Renewable Sources. Ann Arbor, MI, E.U. 25 de marzo 2004. [32]

<sup>50</sup> SPITZLEY David V & KEOLEIAN Gregory A.. / Center for Sustainable Systems, University of Michigan. Life Cycle Environmental and Economic Assessment of Willow Biomass Electricity: A Comparison with Other Renewable and Non-Renewable Sources. Ann Arbor, MI, E.U. 25 de marzo 2004. [32]

**Tabla 16. Extensión de Tierra Requerida para la Instalación de Diferentes Plantas de Generación Eléctrica**

Tecnología	Uso de la Tierra (Hectareas-año/kWh)	Extensión de Tierra Requerida (km <sup>2</sup> -año/GWh)
Carboeléctrica – carbón pulverizado y flama directa, quemador típico	$5.80 \times 10^{-7}$	$5.8 \times 10^{-3}$
Carboeléctrica - carbón pulverizado y flama directa, con quemadores de bajas emisiones de NOx	$5.26 \times 10^{-7}$	$5.3 \times 10^{-3}$
Carboeléctrica – carbón pulverizado y flama en U, con quemadores de bajas emisiones	$4.42 \times 10^{-7}$	$4.4 \times 10^{-3}$
Ciclo Combinado	$4.54 \times 10^{-8}$	$4.5 \times 10^{-4}$
Nucleoeléctrica	$9.03 \times 10^{-7}$	$9.0 \times 10^{-3}$
Hidroeléctrica	$1.22 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-1}$
Eólica, Clase 4	$9.43 \times 10^{-6}$	$9.4 \times 10^{-2}$
Eólica, Clase 6	$6.89 \times 10^{-6}$	$6.9 \times 10^{-2}$

Referencia: [32] SPITZLEY David V & KEOLEIAN Gregory A.. / Center for Sustainable Systems, University of Michigan. Life Cycle Environmental and Economic Assessment of Willow Biomass Electricity: A Comparison with Other Renewable and Non-Renewable Sources. Ann Arbor, MI, E.U. 25 de marzo 2004.

## 20. Impactos sobre la salud humana en operación normal

### *Definición*

Se refiere básicamente a la disminución de años de vida al hacer operar una planta, es decir se hace un análisis de los años de vida que se tendrían si trabajara en algún otro lugar que no fuera una planta de generación eléctrica. Este indicador se mide en términos de los años de vida perdida por cada GWh producido.

En los impactos en la salud humana se hace énfasis en comparar sobre todo las plantas Nucleoeléctricas con las Carboeléctricas en donde tanto los efectos ocupacionales como ambientales son considerados como un riesgo. Con anterioridad los riesgos en la salud se habían medido en términos de tasas de accidentes fatales inmediatos. Sin embargo, hoy, y particularmente en relación a las Nucleoeléctricas hay una atención especial en los riesgos que tienen un efecto retardado como es el cáncer inducido en el caso de la exposición a la radiación o incluso a ciertas sustancias en especial.

Un ejemplo de esta situación va relacionada con los riesgos que se tienen para extraer el carbón de las minas en donde muchos de los trabajadores sufren cáncer debido a la exposición al gas radón.

*Un alto valor de este indicador indica una baja sustentabilidad.*

***Resultados***

En lugar de este indicador, se decidió utilizar el de Costos Externos, los cuales tienen incluidos a éstos

**21. Oportunidades de trabajo**

***Definición***

Se refiere a la cantidad de personas que pueden tener trabajo como parte de la construcción y operación de la planta de generación eléctrica aunque el indicador se mide como la diferencia de estas personas al año.

***Resultados***

En México se debe de pensar más en las fuentes de empleos, por la instalación de una planta generadora de energía eléctrica.

## Selección de Indicadores a Utilizar

En la **Tabla 17** se muestran los resultados de la investigación realizada de los indicadores de sustentabilidad, y en las **Tablas 18, 19 y 20** se muestran ya los indicadores seleccionados.

**Tabla 17. Evaluación de los Indicadores de Sustentabilidad a Utilizarse de Acuerdo a Diferentes Fuentes de Información**

Dimensión	Criterios	Indicadores	Unidades de Medida	Ref <sup>51</sup>	Carboeléct.	Ciclo Combinado	Nucleoeléct.	Hidroeléct.	Eoloeléct.
AMBIENTAL		1. Cantidad de sustancias peligrosas producidas	m <sup>3</sup> /GWh	[34]	0 <sup>(a)</sup>	0 <sup>(a)</sup>	0.00229 <sup>(a)</sup>	0 <sup>(a)</sup>	0 <sup>(a)</sup>
	Uso de combustible y de otros materiales	2. Régimen Térmico	MJ/MWh	[14]	10,452 <sup>(b)</sup>	7,196 <sup>(b)</sup>	10,870 <sup>(b)</sup>	0 <sup>(b)</sup>	0 <sup>(b)</sup>
	Efectos en agua	3. Contaminación o consumo	m <sup>3</sup> / MWh	[18]	2.675 <sup>(b)</sup>	1.250 <sup>(b)</sup>	2.084 <sup>(b)</sup>	3,540 <sup>(b)</sup>	0 <sup>(b)</sup>
	Impactos ambientales a través de emisiones al aire	4. Gases de efecto invernadero	Por Operación (México) Toneladas de CO <sub>2</sub> equivalentes / GWh	[9]	1,010.7 <sup>(b)</sup>	594 <sup>(b)</sup>	0 <sup>(b)</sup>	0 <sup>(b)</sup>	0 <sup>(b)</sup>
			Por el Ciclo de Vida de la planta (Mundial) Toneladas de CO <sub>2</sub> / GWh	[30]	790 - 1182 <sup>(a)</sup>	389 - 511 <sup>(a)</sup>	2 - 59 <sup>(a)</sup>	2 - 48 <sup>(a)</sup>	7 - 124 <sup>(a)</sup>
		5. Gases de lluvia ácida (NO <sub>x</sub> )	miligramos de SO <sub>2</sub> / kWh	[30]	700 - 32321 <sup>(a)</sup>	4 - 15000 <sup>(a)</sup>	3 - 50 <sup>(a)</sup>	5 - 60 <sup>(a)</sup>	21 - 87 <sup>(a)</sup>
		6. Gases de lluvia ácida (SO <sub>2</sub> )	Toneladas de NO <sub>x</sub> / GWh	[30]	700 - 5273 <sup>(a)</sup>	13 - 1500 <sup>(a)</sup>	2 - 100 <sup>(a)</sup>	3 - 42 <sup>(a)</sup>	14 - 50 <sup>(a)</sup>
		7. Tiempo necesario de confinamiento	años		0 <sup>(a)</sup>	0 <sup>(a)</sup>	100,000 <sup>(a)</sup>	0 <sup>(a)</sup>	0 <sup>(a)</sup>
Eficiencia económica	8. Costos externos	centavos de euros/GWh	[19]	4 - 15 <sup>(a)</sup>	1 - 4 <sup>(a)</sup>	0.2 - 0.5 <sup>(a)</sup>	0.03 - 0.7 <sup>(a)</sup>	0.05 - 0.25 <sup>(a)</sup>	
ECONÓMICA	Eficiencia económica	9. Costos internos	dólares/MWh	[27]	51.16 - 55.61 <sup>(b)</sup>	42.76 - 45.80 <sup>(b)</sup>	43.65 <sup>(b)</sup>	60.24 - 143.42 <sup>(b)</sup>	43.63 - 55.55 <sup>(b)</sup>
	Uso de combustible y de otros materiales	10. Disponibilidad de reservas energéticas	Años	[14] [13] [20]	100 <sup>(b)</sup> [14]	11 <sup>(b)</sup> [13]	250 <sup>(a)</sup> [20]	1,000 <sup>(b)</sup>	1,000 <sup>(b)</sup>
	Seguridad de suministro y disposición	11. Disponibilidad de la tecnología	Inversión (dólares/kW) Componente importado de los insumos	[27] [21]	1690.35 - 1833.90 <sup>(b)</sup> 0.461 <sup>(b)</sup>	481.83 - 550.26 <sup>(b)</sup> 0.730 <sup>(b)</sup>	1866 <sup>(b)</sup> 0.441 <sup>(b)</sup>	1155.12 - 5415.98 <sup>(b)</sup> 0.294 <sup>(b)</sup>	1145.77 - 1305.44 <sup>(b)</sup> 0.730

<sup>(a)</sup> Son datos mundiales

<sup>(b)</sup> Son datos nacionales

<sup>51</sup> Indica la referencia de donde se tomó la información para realizar la evaluación.

DIMENSIÓN	Criterios	Indicadores	Unidades de Medida	Ref.	Carboeléct. Carbón	Ciclo Combinado Gas Natural	Nucleoeléct. Uranio	Hidroeléct. Agua	Eoloeléct. Viento
POLÍTICA	Solidez	12. No- necesidad de estabilidad sociopolítica / financiera	Cualitativo		No (0) <sup>(b)</sup>	Si (1) <sup>(b)</sup>	Si (1) <sup>(b)</sup>	No(0) <sup>(b)</sup>	Si (1) <sup>(b)</sup>
	Seguridad de suministro y disposición	13. Dependencia del exterior	Relación Importación / Producción		41% <sup>(b)</sup>	18% <sup>(b)</sup>	100% <sup>(b)</sup>	0% <sup>(b)</sup>	0% <sup>(b)</sup>
	Impactos sobre aspectos sociales	14. Tratado de no proliferación	Cualitativo		0 <sup>(b)</sup>	0 <sup>(b)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	0 <sup>(b)</sup>	0 <sup>(b)</sup>
SOCIAL	Impactos sobre la salud humana	15. Accidentes / Riesgo colectivo	Muertes/TW-año	[16]	137 - 514 <sup>(a)</sup>	66 - 109 <sup>(a)</sup>	0 - 53 <sup>(a)</sup>	4 - 2190 <sup>(a)</sup>	0 <sup>(a)</sup>
				[17]	342 <sup>(a)</sup>	85 <sup>(a)</sup>	8 <sup>(a)</sup>	883 <sup>(a)</sup>	
	Impactos sobre aspectos sociales	16. Aversión al riesgo (rechazo)	Muertes por accidente	[17]	8000 <sup>(a)</sup>	15000 (petroleo) <sup>(a)</sup>		5000 <sup>(a)</sup>	
				[11]	6,400 <sup>(a)</sup>	1,200 <sup>(a)</sup>	31 <sup>(a)</sup>	4,000 <sup>(a)</sup>	
	Extensión de tierra perdida	17. Extensión de tierra perdida por operación de la planta	km <sup>2</sup> -año /GWh	[21]	9.0 x 10 <sup>-7 (a)</sup>	9.0 x 10 <sup>-7 (a)</sup>	6.8 x 10 <sup>-7 (a)</sup>	1.3 x 10 <sup>-4 (a)</sup>	2.7 x 10 <sup>-5 (a)</sup>
[32]				4.42 x 10 <sup>-3 - 5.80 x 10<sup>-3 (a)</sup></sup>	4.5 x 10 <sup>-4 (a)</sup>	9.0 x 10 <sup>-3 (a)</sup>	1.2 x 10 <sup>-1 (a)</sup>	6.9 x 10 <sup>-2 - 9.4 x 10<sup>-2 (a)</sup></sup>	

<sup>(a)</sup> Son datos mundiales

<sup>(b)</sup> Son datos nacionales

Para llevar a cabo las evaluaciones de Sustentabilidad, se tomarán en cuenta los siguientes valores: en la **Tabla 18** se muestran los valores promedio de los indicadores, en la **Tabla 19**, los valores superiores (de acuerdo con el rango mostrado en la **Tabla 17**) y en la **Tabla 20** los valores inferiores.

**Tabla 18. Indicadores de Sustentabilidad (Valores Promedio)**

Dimensión	Indicador	Unidades de Medida	Carboeléctrica	Ciclo Combinado	Nucleoeléctrica	Hidroeléctrica	Eoloeléctrica
Ambiental	Consumo de agua	m <sup>3</sup> / MWh	2.675	1.25	2.084	3,540	0
	Régimen Térmico	MJ / MWh	10,452	7,196	10,870	0	0
	Emisiones de NOx	toneladas de NOx / GWh	2986.5	756.5	51	22.5	32
	Emisiones de SO <sub>2</sub>	miligramos de SO <sub>2</sub> / kWh	16510.5	7502	26.5	32.5	54
	GEI	Por el Ciclo de Vida de la planta (Mundial) Toneladas de CO <sub>2</sub> / GWh	986	450	30.50	25.00	65.50
	Cantidad de Sustancias Peligrosas Producidas	m <sup>3</sup> /GWh	0	0	0.00229	0	0
	Costos Externos	(centavos de euros/GWh)	9.5	2.5	0.35	0.365	0.15
Económica	Costos Internos	Costos Internos (dólares/MWh)	53.385	44.28	43.65	101.83	49.59
	Disponibilidad de la tecnología	Fracción de componentes importados	0.461	0.73	0.441	0.294	0.73
	Reservas	Años	100	11	250	1,000	1,000
Política	Dependencia del exterior	Importaciones/Producción	41%	18%	100%	0	0
	No necesidad de estabilidad política	Cualitativo	0	1	1	0	1
Social	Accidentes	Muertes/TW-año (1)	325.5	87.5	26.5	1097	0
	Extensión de tierra perdida	km <sup>2</sup> -año/GWh	9.00x10 <sup>-7</sup>	9.00x10 <sup>-7</sup>	6.80 x10 <sup>-7</sup>	1.30 x10 <sup>-4</sup>	2.70 x10 <sup>-5</sup>
	muertes por accidente	muertes por accidente (2)	6,400	1,200	31	4,000	0

**Tabla 19. Indicadores de Sustentabilidad (Valor Superior)**

Dimensión	Indicador	Unidades de Medida	Carboeléctrica	Ciclo Combinado	Nucleoeléctrica	Hidroeléctrica	Eoloeléctrica
Ambiental	Consumo de agua	m <sup>3</sup> / MWh	2.675	1.25	2.084	3,540	0
	Régimen Térmico	MJ / MWh	10,452	7,196	10,870	0	0
	Emisiones de NOx	toneladas de NOx / GWh	5273	1500	100	42	50
	Emisiones de SO <sub>2</sub>	miligramos de SO <sub>2</sub> / kWh	32,321	15,000	50	60	87
	GEI	Por el Ciclo de Vida de la planta (Mundial) Toneladas de CO <sub>2</sub> / GWh	1,182.00	511	59.00	48.00	124.00
	Cantidad de Sustancias Peligrosas Producidas	m <sup>3</sup> /GWh	0	0	0.00229	0	0
	Costos Externos	(centavos de euros/GWh)	15	4	0.5	0.7	0.25
Económica	Costos Internos	Costos Internos (dólares/MWh)	55.61	45.8	43.65	143.42	55.55
	Disponibilidad de la tecnología	Fracción de componentes importados	0.461	0.73	0.441	0.294	0.73
	Reservas	Años	100	11	250	1,000	1,000
Política	Dependencia del exterior	Importaciones/Producción	41%	18%	100%	0	0
	No necesidad de estabilidad política	Cualitativo	0	1	1	0	1
Social	Accidentes	Muertes/TW-año (1)	514	109	53	2190	0
	Extensión de tierra perdida	km <sup>2</sup> -año/GWh	9.00x10 <sup>-7</sup>	9.00x10 <sup>-7</sup>	6.80 x10 <sup>-7</sup>	1.30 x10 <sup>-4</sup>	2.70 x10 <sup>-5</sup>
	muertes por accidente	Muertes por accidente (2)	6,400	1,200	31	4,000	0

Tabla 20. Indicadores de Sustentabilidad (Valor Inferior)

Dimensión	Indicador	Unidades de Medida	Carboeléctrica	Ciclo Combinado	Nucleoeléctrica	Hidroeléctrica	Eoloeléctrica
Ambiental	Consumo de agua	m <sup>3</sup> / MWh	2.675	1.25	2.084	3,540	0
	Régimen Térmico	MJ / MWh	10,452	7,196	10,870	0	0
	Emisiones de NOx	toneladas de NOx / GWh	700	13	2	3	14
	Emisiones de SO <sub>2</sub>	miligramos de SO <sub>2</sub> / kWh	700	4	3	5	21
	GEI	Por el Ciclo de Vida de la planta (Mundial) Toneladas de CO <sub>2</sub> / GWh	790.00	389	2.00	2.00	7.00
	Cantidad de Sustancias Peligrosas Producidas	m <sup>3</sup> /GWh	0	0	0.00229	0	0
	Tiempo necesario de confinamiento	Años	0	0	100,000	0	0
	Costos Externos	(centavos de euros/GWh)	4	1	0.2	0.03	0.05
Económica	Costos Internos	(dólares/MWh)	51.16	42.76	43.65	60.24	43.63
	Disponibilidad de la tecnología	Fracción de componentes importados	0.461	0.73	0.441	0.294	0.73
	Reservas	Años	100	11	250	1,000	1,000
Política	Dependencia del exterior	Importaciones/Producción	41%	18%	100%	0	0
	No necesidad de estabilidad política	Cualitativo	0	1	1	0	1
Social	Accidentes	Muertes/TW-año (1)	137	66	0	4	0
	Extensión de tierra perdida	km <sup>2</sup> -año/GWh	9.00x10 <sup>-7</sup>	9.00x10 <sup>-7</sup>	6.80 x10 <sup>-7</sup>	1.30 x10 <sup>-4</sup>	2.70 x10 <sup>-5</sup>
	muertes por accidente	muertes por accidente (2)	6,400	1,200	31	4,000	0



## 4. Metodología para Evaluación Global de Sustentabilidad

En este capítulo se presenta la metodología propuesta y utilizada para llevar a cabo el análisis de sustentabilidad de las tecnologías de generación eléctrica consideradas en este estudio; la metodología es muy sencilla y básicamente compara los valores de cada indicador para cada planta de generación y elige al valor más bajo (o alto según sea el caso) como referencia del mejor y le asigna el valor de uno, con lo cual se indica que es el mejor del grupo, al peor valor se le asigna un cero; con estos dos valores se lleva a cabo un ajuste a una recta y se le asignan los valores ahora a los indicadores que quedaron entre 0 y 1. A continuación se describe con más detalle.

### Ecuación de evaluación de sustentabilidad

Se presentan dos ecuaciones para evaluar la sustentabilidad a través de 4 y 3 dimensiones.

#### Ecuación para Evaluar la Sustentabilidad a través de 4 Dimensiones

En este estudio se propone que la sustentabilidad sea evaluada por medio de la suma de los indicadores de cada dimensión (**Ecuación 1**), de tal forma que como resultado se tenga una calificación de sustentabilidad para cada tecnología de generación eléctrica. Dado que los indicadores tienen diferentes unidades y por lo tanto no se pueden sumar entre sí, se propone normalizarlos para convertirlos a un valor entre 0 y 1 de tal forma que queden adimensionales y entonces se puedan sumar, sin embargo, como se tienen diferentes cantidades de indicadores para las dimensiones, la dimensión que tenga la mayor cantidad de indicadores influiría en el valor total de sustentabilidad, por lo que se establece que cada dimensión deberá contar sólo el 25% con respecto a las demás.

#### Ecuación 1.

Sustentabilidad Global = Dimensión Económica + Dimensión Social + Dimensión Ambiental + Dimensión Política

La **ecuación 1** hace referencia a que la sustentabilidad global representa un equilibrio en las dimensiones de sustentabilidad, por lo que al tener el mismo valor (25%) en cada dimensión la sustentabilidad global ayudará a mostrar la tecnología más sustentable. Por ejemplo, una tecnología que tenga un valor de sustentabilidad de 80%, y en cada dimensión tiene 20% entonces es sustentable; pero por ejemplo otra tecnología que tenga un valor de 80% y suponiendo que las dimensiones económica, ambiental y social son de 25% y la política es de 5%, entonces no es tan

sustentable como la planta anterior, porque ésta última no tiene un equilibrio en todas sus dimensiones.

Dado que cada dimensión de sustentabilidad tiene diferente cantidad de indicadores, se estableció un método para evaluar los porcentajes que le corresponden a cada indicador: por ejemplo, cuando se realiza el análisis de Sustentabilidad con 4 dimensiones y con todos los indicadores, se tiene que la dimensión ambiental tiene 7 indicadores y a cada uno de ellos le corresponde un porcentaje de 3.6%, para que la suma de esta dimensión dé el 25%; para la dimensión económica que tiene solamente 3 indicadores, le corresponde a cada indicador un 8.3%; en el caso de la dimensión política con sólo 2 indicadores cada uno ellos representa un 12.6%; y por último la dimensión social también con 3 indicadores, igualmente a cada uno de ellos le corresponde un valor del 8.3%.

### **Ecuación para Evaluar la Sustentabilidad a través de 3 Dimensiones**

Se evalúa de la misma forma que para el caso de 4 dimensiones (**Ecuación 2**), pero aquí solo se toman en cuenta las dimensiones ambiental, económica y social y cada una de ellas tiene un valor de 33.33%

#### **Ecuación 2.**

Sustentabilidad Global = Dimensión Económica + Dimensión Social + Dimensión Ambiental

## **Metodología**

La metodología para evaluar la sustentabilidad consiste en 3 pasos:

1. Normalización de indicadores
2. Asignación de un porcentaje por indicador
3. Evaluación de sustentabilidad

### **1. Normalización de indicadores**

De acuerdo con un estudio realizado por CEPAL/OLADE/GTZ<sup>52 53</sup> es necesario llevar a cabo una normalización de los indicadores de sustentabilidad para que éstos puedan ser comparados entre sí y no tener la complicación de las unidades y diferentes órdenes de magnitud.

---

<sup>52</sup> OLADE / CEPAL / GTZ. Energía y Desarrollo Sustentable en América Latina y el Caribe: Enfoques para la Política Energética. Ecuador. 1997 [2]

<sup>53</sup> OLADE / CEPAL / GTZ; SALGADO Rene / ALTOMONTE Hugo. Indicadores de Sustentabilidad 1990-1999. Chile. 2001. [4].

Para cada indicador, de entre todas las tecnologías, se llevó a cabo una normalización lineal, es decir se seleccionaron aquel que era el mejor y el peor, el mejor representaría ahora un valor de 1 y el peor un valor de cero, entonces los otros valores se ajustarían con la ecuación de la recta (**Tabla 22**). Por ejemplo, si una tecnología tiene el peor valor máximo en emisiones de SO<sub>2</sub>, su indicador ya normalizado será de 0, y si es el mejor valor de emisiones de SO<sub>2</sub>, entonces el indicador normalizado es 1 (**Tabla 23**).

En el caso de las reservas energéticas, a diferencia de los otros indicadores, el mejor indicador es que tiene mayor magnitud, dado que en este caso es más sustentable tener el mayor número de años de reservas, al contrario que en los otros indicadores que un valor alto del indicador representaba una sustentabilidad baja.

## 2. Asignación de un porcentaje por indicador

Posteriormente se asignó un porcentaje a cada dimensión de sustentabilidad, en todos los casos se dijo que era de 25% para conformar un 100% con las 4 dimensiones y de 33.33% cuando se lleva a cabo el análisis solo con 3 dimensiones.

Para el caso de cada dimensión, como se tenía un número diferente de indicadores, se asignó, de manera uniforme, un valor entre 0 y 25% por dimensión, por ejemplo, en el caso de la dimensión ambiental, se tienen 7 indicadores, entonces el mejor valor de cada indicador representará hasta el 3.6%, para el caso de la dimensión económica y social que tienen 3 indicadores cada uno representará un valor de hasta 8.3% y en el caso de la dimensión política debido a que solo se tienen 2 indicadores, cada uno de ellos tendrá un valor de hasta 12.5%. En la **Tabla 21** se muestra el porcentaje asignado a cada indicador de acuerdo con el análisis realizado considerando los diferentes enfoques:

**Tabla 21. Porcentaje Asignado a Cada Indicador de Acuerdo con el Enfoque analizado**

Enfoque	Dimensión	Cantidad de Indicadores	Porcentaje asignado a cada indicador en la dimensión respectiva
<b>Sustentabilidad con 4 Dimensiones</b>	Ambiental	7	3.6%
	Económica	3	8.3%
	Política	2	12.5%
	Social	3	8.3%
<b>Sustentabilidad con 3 Dimensiones</b>	Ambiental	7	4.7%
	Económica	3	11.0%
	Social	3	11.0%
<b>Sustentabilidad con 3 Dimensiones con Ajustes</b>	Ambiental	7	4.7%
	Económica	4	8.3%
	Social	3	11.0%

### 3. Evaluación de Sustentabilidad

La evaluación de la sustentabilidad se hace a través de las Ecuaciones 1 y 2 según sea el caso y tomando en cuenta los valores de los indicadores traducidos en porcentajes (**Tabla 21**), los resultados tomando en cuenta 4 dimensiones de sustentabilidad y todos los indicadores con valores promedio, son los mostrados en la **Tabla 25**.

**Tabla 22. Normalización**

Dimensión	Indicador	Unidades de Medida	NORMALIZACIÓN			
			0 PEOR VALOR	1 MEJOR VALOR	M	B
Ambiental	Consumo de agua	m <sup>3</sup> / MWh	3450	0	-0.0003	1.0000
	Consumo de combustible	MJ/MWh	10870	0	-0.0001	1.0000
	Emisiones de NOx	Toneladas de NOx / GWh	2986.5	0	-0.0003	1.0000
	Emisiones de SO <sub>2</sub>	miligramos de SO <sub>2</sub> / kWh	16510.5	0	-0.0001	1.0000
	GEI	Por el Ciclo de Vida de la planta (Mundial) Toneladas de CO <sub>2</sub> / GWh	986	0	-0.0010	1.0000
	Cantidad de Sustancias Peligrosas Producidas	m <sup>3</sup> /GWh	0.00229	0	-436.6812	1.0000
	Costos Externos	Centavos de euros/GWh	9.5	0.15	-0.1070	1.0160
Económica	Costos Internos	Dólares/MWh	101.83	43.65	-0.0172	1.7503
	Disponibilidad de la tecnología	Fracción de componentes importados	0.73	0.294	-2.293577982	1.6743
	Reservas	Años	11	1000	0.0010	-0.0111
Política	Dependencia del exterior	Importaciones/Producción	100%	0	-1.0000	1.0000
	No necesidad de estabilidad política	Cualitativo	1	0	-1.0000	1.0000
Social	Accidentes	Muertes/Tw-año (1)	1097	0	-0.0009	1.0000
	Extensión de tierra perdida	km <sup>2</sup> - año/GWh	0.00013	0.00000068	-7732.7560	1.0053
	Muertes por accidente	muertes por accidente (2)	6400	0	-0.0002	1.0000

**Tabla 23. Indicadores de Sustentabilidad ya Normalizados**

Dimensión	Indicador	Unidades de Medida	RESULTADOS SI TODOS LOS INDICADORES VALEN 100% ó 1				
			Carboeléct.	Ciclo Combinado	Nucleoeléctrica	Hidroeléctrica	Eoloeléctrica
Ambiental	Consumo de agua	m <sup>3</sup> / MWh	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0
	Consumo de combustible	MJ/MWh	0.0	0.3	0.0	1.0	1.0
	Emisiones de NOx	Toneladas de NOx / GWh	0.0	0.7	1.0	1.0	1.0
	Emisiones de SO <sub>2</sub>	miligramos de SO <sub>2</sub> / kWh	0.0	0.5	1.0	1.0	1.0
	GEI	Por el Ciclo de Vida de la planta (Mundial) Toneladas de CO <sub>2</sub> / GWh	0.0	0.5	1.0	1.0	0.9
	Cantidad de Sustancias Peligrosas Producidas	m <sup>3</sup> /GWh	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0
	Costos Externos	Centavos de euros/GWh	0.0	0.7	1.0	1.0	1.0
Económica	Costos Internos	Dólares/MWh	0.8	1.0	1.0	0.0	0.9
	Disponibilidad de la tecnología	Fracción de componentes importados	0.6	0.0	0.7	1.0	0.0
	Reservas	Años	0.1	0.0	0.2	1.0	1.0
Política	Dependencia del exterior	Importaciones/Producción	0.6	0.8	0.0	1.0	1.0
	No necesidad de estabilidad política	Cualitativo	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0
Social	Accidentes	Muertes/Tw-año (1)	0.7	0.9	1.0	0.0	1.0
	Extensión de tierra perdida	km <sup>2</sup> - año/GWh	1.0	1.0	1.0	0.0	0.8
	Muertes por accidente	muertes por accidente (2)	0.0	0.8	1.0	0.4	1.0

**Tabla 24. Indicadores de Sustentabilidad Normalizados y con un Porcentaje Definido**

RESULTADOS SI CADA DIMENSIÓN VALE 25% Y LOS INDICADORES SE DISTRIBUYEN UNIFORMEMENTE

Dimensión	Indicador	Unidades de Medida	Porcentaje asignado	Carboeléctrica	Ciclo Combinado	Nucleoeléct.	Hidroeléct..	Eoloeléct.
Ambiental	Consumo de agua	m <sup>3</sup> / MWh	3.6%	0.04	0.04	0.04	0.00	0.04
	Consumo de combustible	MJ/MWh	3.6%	0.00	0.01	0.00	0.04	0.04
	Emisiones de NOx	Toneladas de NOx / GWh	3.6%	0.00	0.03	0.04	0.04	0.04
	Emisiones de SO <sub>2</sub>	miligramos de SO <sub>2</sub> / kWh	3.6%	0.00	0.02	0.04	0.04	0.04
	GEI	Por el Ciclo de Vida de la planta (Mundial) Toneladas de CO <sub>2</sub> / GWh	3.6%	0.00	0.02	0.03	0.03	0.03
	Cantidad de Sustancias Peligrosas Producidas	m <sup>3</sup> /GWh	3.6%	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04
	Costos Externos	Centavos de euros/GWh	3.6%	0.00	0.03	0.03	0.03	0.04
Económico	Costos Internos	Dólares/MWh	8.3%	0.07	0.08	0.08	0.00	0.07
	Disponibilidad de la tecnología	Fraccion de componentes importados	8.3%	0.05	0.00	0.06	0.08	0.00
	Reservas	Años	8.3%	0.01	0.00	0.02	0.08	0.08
				0.13	0.08	0.16	0.17	0.16
Política	Dependencia del exterior	Importaciones/Produccion	12.5%	0.07	0.10	0.00	0.13	0.13
	No necesidad de estabilidad política	Cualitativo	12.5%	0.13	0.00	0.00	0.13	0.00
Social				0.20	0.10	0.00	0.25	0.13
	Accidentes	Muertes/Tw-año (1)	8.3%	0.06	0.08	0.08	0.00	0.08
	Extensión de tierra perdida	km <sup>2</sup> - año/GWh	8.3%	0.08	0.08	0.08	0.00	0.07
	Muertes por accidente	muertes por accidente (2)	8.3%	0.00	0.07	0.08	0.03	0.08

**Tabla 25. Resultados por Dimensión**

Dimensión	Carboeléctrica	Ciclo Combinado	Nucleoeléctrica	Hidroeléctrica	Eoloeléctrica
Ambiental	0.07	0.18	0.18	0.21	0.25
Económico	0.13	0.08	0.16	0.17	0.16
Político	0.20	0.10	0.00	0.25	0.13
Social	0.14	0.23	0.25	0.03	0.23
<b>Total</b>	<b>0.54</b>	<b>0.59</b>	<b>0.58</b>	<b>0.66</b>	<b>0.76</b>



## **5. Análisis de Sustentabilidad de las Tecnologías de Generación Eléctrica Seleccionadas**

### **Descripción de Análisis Realizados**

En el proceso de evaluación de los indicadores de sustentabilidad se observaron diferentes características de éstos, los cuales orientaron a la realización del análisis tal y como se describe a continuación.

La definición principal de sustentabilidad se refiere a suponer un equilibrio armónico en el manejo de los elementos componentes del capital físico y del acervo natural, respetando ciertos criterios de equidad y la diversidad cultural de la sociedad, lo cual implica que las dimensiones (ambiental, económica, política y social) deben de estar en equilibrio para que el desarrollo sea sustentable, porque un cierto nivel de desarrollo con respecto a una dimensión podría poner en peligro el desarrollo en el largo plazo respecto a otras dimensiones. Tomando en cuenta este principio se llevó a cabo uno de los análisis de este trabajo, el cual se refiere a tomar en cuenta las 4 dimensiones de Sustentabilidad.

Adicional al análisis con las 4 dimensiones de Sustentabilidad se llevó a cabo un análisis tomando en cuenta solamente 3 dimensiones: la ambiental, económica y social y dejando excluida la dimensión política, toda vez que ésta depende en gran medida de las dimensiones social, económica y ambiental. Se sabe que, en gran medida algunas de las tecnologías de generación no forman parte de la prospectiva del sector eléctrico debido a que no son económicamente viables y/o no son aceptadas por la sociedad, lo cual influye en gran medida en las decisiones políticas de no utilizarlas, tal es el caso de las plantas Nucleoeléctricas, las cuales, por falta de conocimiento de la sociedad, se piensa que son las tecnologías más peligrosas debido a los materiales radiactivos utilizados y por esta razón, la política del país no se orienta a adquirir este tipo de tecnologías. Por otro lado el caso de las plantas que utilizan energías renovables, que en un principio se consideraban como económicamente inviables y por eso las políticas no se orientaban hacia estas tecnologías. Un análisis como el realizado, ayuda a sensibilizarse con los factores que pueden influir en que una tecnología de generación sea más sustentable que la otra.

Dentro de cada uno de los análisis mencionados anteriormente se realizaron 3 subanálisis que implican las siguientes variaciones: el primero considera todos los indicadores de la dimensión ambiental, el segundo no considera los costos externos y el tercer análisis no considera las emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y Gases de Efecto Invernadero (GEI). Estos análisis se derivan del hecho de

que los costos externos tienen implícitas las emisiones de SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y GEI de las diferentes tecnologías de generación por lo cual al incluir este indicador junto con los indicadores de emisiones, se estaría duplicando la información sobre todo tomando en cuenta que la definición de costos externos dice:

*“Los costos externos están asociados a las externalidades consecuencia de la generación de energía eléctrica tales como los impactos ambientales, los daños a la salud humana y los efectos del cambio climático en los ecosistemas, traducidos éstos en costos por las consecuencias de la contaminación de las áreas urbanas que conlleva a gastos en el sector salud derivados de las enfermedades producidas por ésta (enfermedades respiratorias o incluso cáncer pulmonar), en el caso de la lluvia o deposición ácida producida básicamente por SO<sub>2</sub> genera pérdidas económicas por su efecto en los materiales, ya que corroe los metales, deteriora cables eléctricos, el papel, etc. En general la contaminación (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub>) afecta la vegetación, provoca lesiones en las hojas, reduce la fotosíntesis y contribuye a la acidificación del suelo con las consecuentes pérdidas económicas en la agricultura; en el caso de los GEI (CO<sub>2</sub> equivalentes) produce pérdidas económicas por los impactos que tienen en el clima (Cambio Climático) que se derivan en sequías, inundaciones, etc, en el caso específico de estos contaminantes globales sólo se está considerando el costo asociado por mitigarlos y no las erogaciones económicas referentes a los impactos”.*<sup>54 55</sup>

Para todos los análisis realizados se tomaron como base los datos de las **Tablas 18, 19 y 20 del Capítulo 3**, y se realizaron con los valores promedio, superior e inferior de acuerdo con el rango de valores que tenía cada indicador.

En resumen, los análisis realizados son:

**Tabla 26. Lista de Enfoques Analizados**

Enfoque	Descripción	Variante	Valores Utilizados
<b>Sustentabilidad con 4 Dimensiones</b>	Considera 4 dimensiones de Sustentabilidad: Ambiental, Económica, Social y Política	Con todos los indicadores	Promedio, superior e inferior
		Excluye Costos Externos	Promedio, superior e inferior
		Excluye Emisiones de SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> y GEI	Promedio, superior e inferior
<b>Sustentabilidad con 3 Dimensiones</b>	Considera 3 dimensiones de Sustentabilidad: Ambiental, Económica y Social	Con todos los indicadores	Promedio
		Excluye Costos Externos	Promedio
		Excluye Emisiones de SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> y GEI	Promedio
<b>Sustentabilidad con 3 Dimensiones con Ajustes</b>	Este análisis no considera la dimensión política, sin embargo el indicador “Dependencia del Exterior” que en principio se encontraba dentro de esta dimensión, se trasladó a la dimensión económica para ver el comportamiento de la sustentabilidad.	Con todos los indicadores	Promedio
		Excluye Costos Externos	Promedio
		Excluye Emisiones de SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> y GEI	Promedio

<sup>54</sup> European Commission / Community Research. *External Cost: Research Results on Socio-Environmental Damages Due to Electricity and Transport*. Bélgica. 2003. p.15. [19]

<sup>55</sup> SEMARNAT / CEPAL. Evaluación de las Externalidades Ambientales de la Generación Termoeléctrica en México. Mexico. Noviembre de 2004. p. 9 [35]



## Resultados

En esta sección se presentan los resultados de los enfoques analizados y que se describieron en la **Tabla 26**. En primer lugar se lleva a cabo una comparación de los resultados obtenidos analizando las dimensiones de sustentabilidad, es decir, se muestran los resultados de sustentabilidad obtenidos tomando en cuenta 4 y 3 dimensiones de sustentabilidad y se analiza cada una de las dimensiones y se indican las razones del resultado del valor global de sustentabilidad.

En segundo lugar se hace una comparación de los resultados analizando algunas variantes, aquí se muestra básicamente los resultados obtenidos en el enfoque de 4 dimensiones, es decir, se muestran los resultados de sustentabilidad cuando ésta se analiza con todos los indicadores, o bien sólo tomando el indicador de costos externos en lugar de los indicadores de emisiones de GEI, SOx y NOx o viceversa.

En tercer lugar se presenta una comparación de resultados analizando los valores utilizados, en esta sección se presentan las diferencias que existen en el valor de la sustentabilidad, por considerar valores promedio de los indicadores, o bien por utilizar el valor superior o inferior del rango de valores que se tienen para cada indicador; este análisis es el que muestra el grado de precisión de la sustentabilidad evaluada.

Por último se hace una comparación de los resultados de los indicadores, tomando en cuenta los tres enfoques analizados, esta sección ayuda a comprender las diferencias que existen del valor de sustentabilidad dependiendo de las consideraciones tomadas en cuenta, así como del número de dimensiones utilizadas para el análisis

### Comparación de Resultados Analizando las Dimensiones

En esta sección se hace un análisis de los factores que influyeron en que una tecnología fuera más o menos sustentable, para lo cual se analiza cada dimensión y los indicadores que se toman en cuenta.

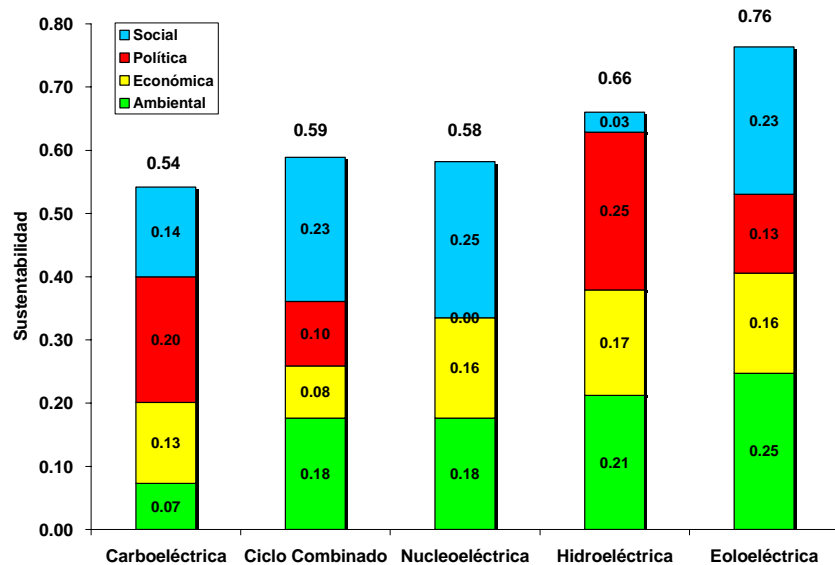
#### Enfoque: 4 Dimensiones de Sustentabilidad

En la **Figura 1** se presentan los resultados del Enfoque con 4 dimensiones de Sustentabilidad, considerando todos los indicadores seleccionados y tomando en cuenta únicamente los datos promedio.

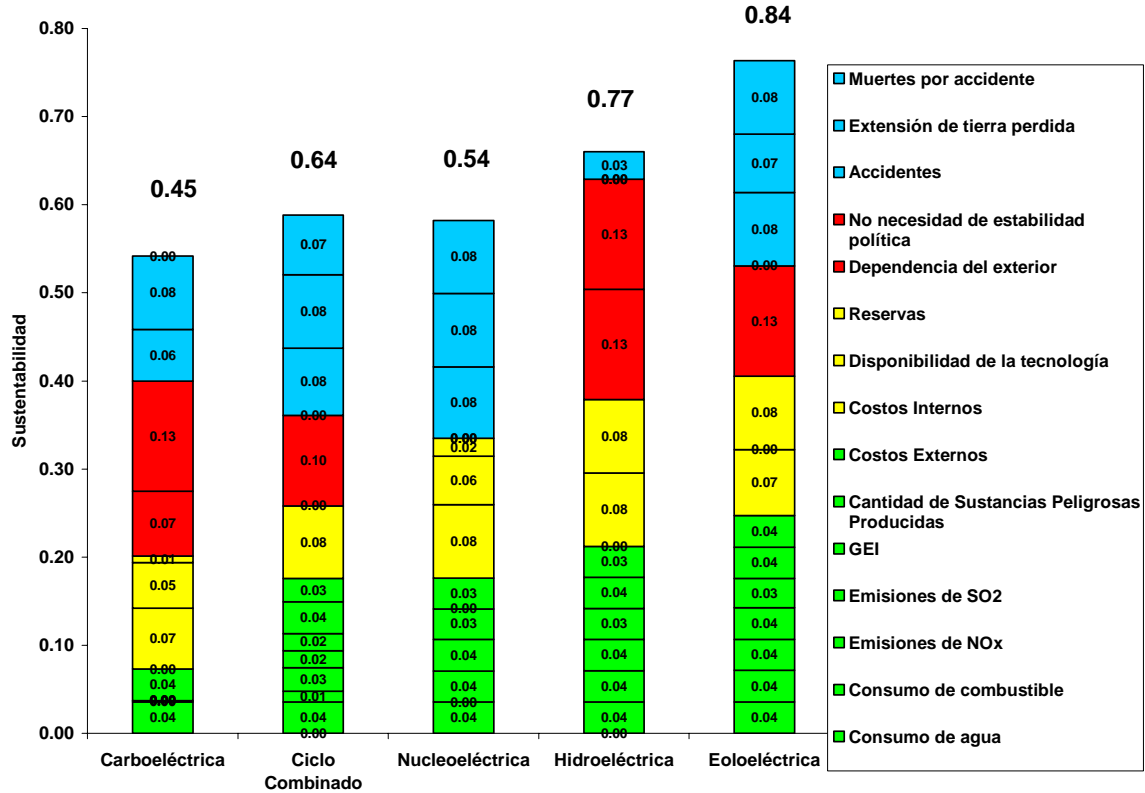
De acuerdo con los resultados mostrados en la **Figura 1**, se tiene que la **Tecnología más sustentable es la Planta Eoloeléctrica con 0.76 puntos**, seguida por la Hidroeléctrica con 0.66 puntos y la tecnología menos sustentable es la Carboeléctrica con 0.54 puntos.

Observando ahora los **mayores puntajes** dimensión por dimensión de sustentabilidad (**Figura 1**), en las dimensiones **económica y política** la mejor tecnología es **Hidroeléctrica**; en la dimensión **ambiental** la mejor tecnología es la **Eoloeléctrica**, seguida por la tecnología **Hidroeléctrica**, es bien sabido que las tecnologías que utilizan energías renovables son las más limpias. Lo anterior da un indicativo de que las tecnologías más sustentables son aquellas que utilizan energías renovables. Tomando en cuenta ahora los **peores puntajes**, en la dimensión **ambiental** la peor tecnología es la **Carboeléctrica** que es la que tiene, de las tecnologías evaluadas, las más altas emisiones de NOx, SO<sub>2</sub> y GEI (**Figura 2**) y los costos externos más altos; en la dimensión **económica** la peor tecnología es la de **Ciclo Combinado** dado que aunque aunque tiene costo interno bajo (es una de las tecnologías más eficientes), en el caso de la disponibilidad de la tecnología y las reservas, presenta los peores valores dado que tiene una alta fracción de componentes importados y la menor cantidad de reservas probadas (**Figura 2**); en la dimensión **política** la peor es la **Núcleoeléctrica** dado que tiene una alta dependencia del exterior (todo el combustible utilizado es importado) y una necesidad de estabilidad política para incluirla en los programas de crecimiento del sector eléctrico; y en la dimensión **Social** el peor puntaje los tienen las plantas **Hidroeléctricas** básicamente porque presenta los valores más altos en los accidentes así como en la extensión de tierra perdida por la instalación de este tipo de tecnología (**Figura 2**).

**Figura 1. Resultados de la Sustentabilidad del enfoque 4 Dimensiones, considerando todos los indicadores seleccionados y tomando en cuenta datos promedio**

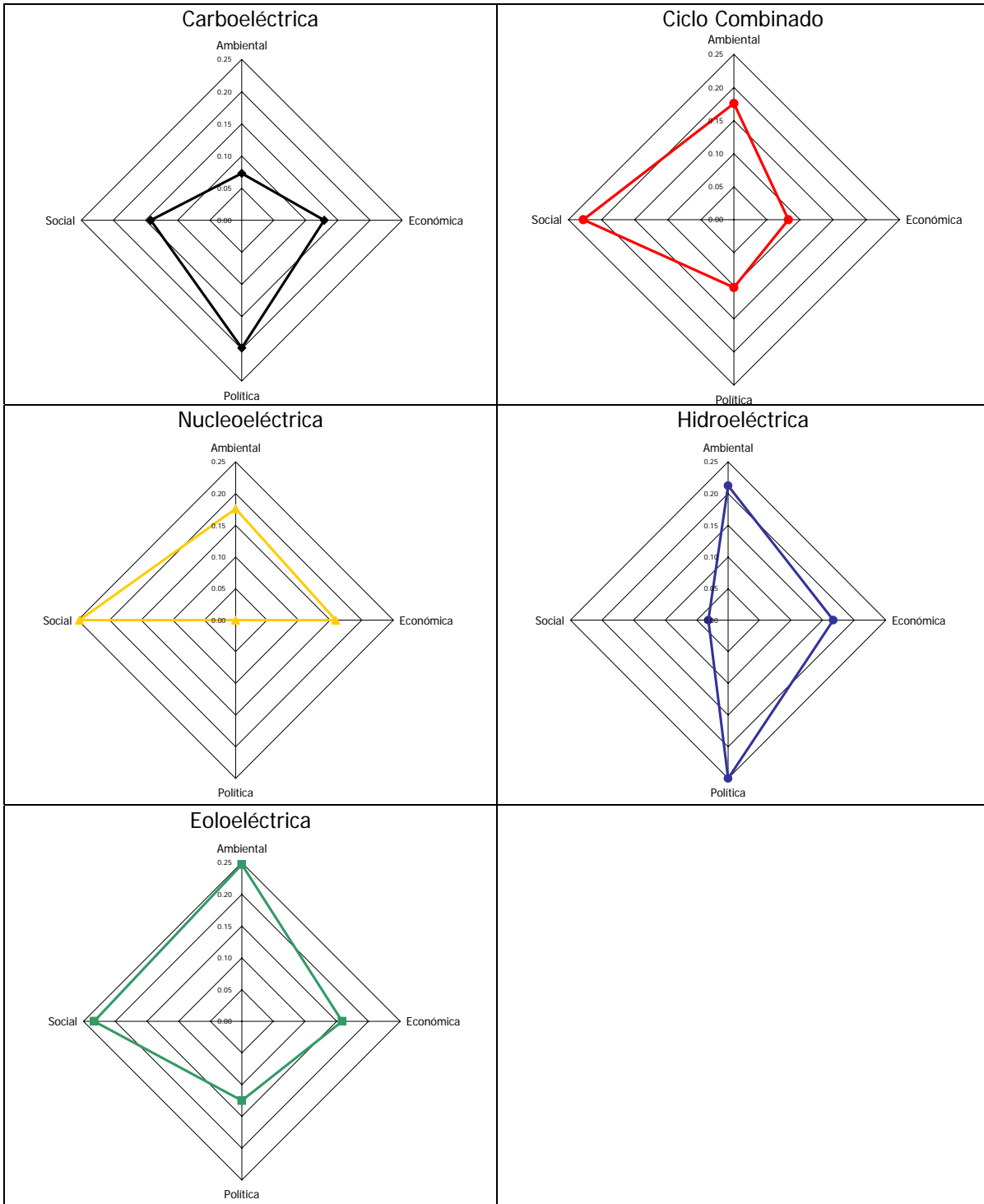


**Figura 2. Resultados de la Sustentabilidad por Indicador, del enfoque 4 Dimensiones, considerando todos los indicadores seleccionados y tomando en cuenta datos promedio**



En la **Figura 3** se muestra una representación gráfica de los resultados de los indicadores de sustentabilidad, dependiendo de la dimensión; en cada esquina del rombo, se encuentra cada dimensión y por lo tanto, la tecnología que cubra una mayor parte de área con tendencia a ser un rombo, ésa será calificada como la más sustentable. Se observa que la tecnología que cubre una mayor área de manera uniforme, es la Eoloeléctrica y por tanto se califica como la más sustentable. En el caso de la planta Hidroeléctrica, se observa que, aunque cubre una buena área hacia lo ambiental y político, la dimensión social se ve muy disminuida. En el Caso de la tecnología de Ciclo Combinado, está sesgada hacia la parte social (tiene buena calificación en esta dimensión). En el caso de la tecnología Nucleoeléctrica, sólo se cubre el área por un triángulo, dado que en la dimensión política, su calificación fue cero. Y por último la planta Carboeléctrica, muy disminuida en la dimensión ambiental.

**Figura 3. Evaluación de la Sustentabilidad con 4 Dimensiones, utilizando TODOS los Indicadores**



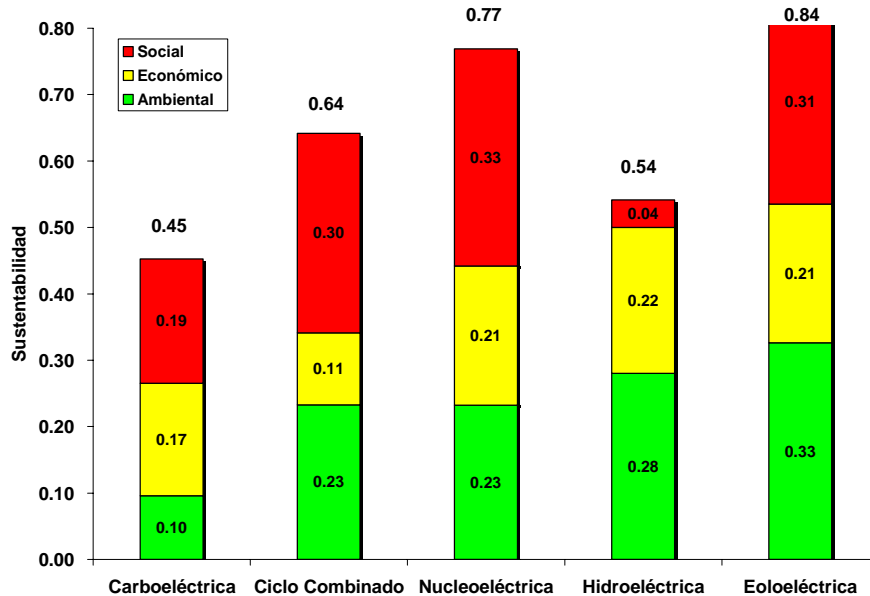
### Enfoque: 3 Dimensiones de Sustentabilidad

En la **Figura 4** se muestran los resultados del análisis de sustentabilidad, tomando en cuenta el enfoque de 3 Dimensiones y con valores promedio únicamente.

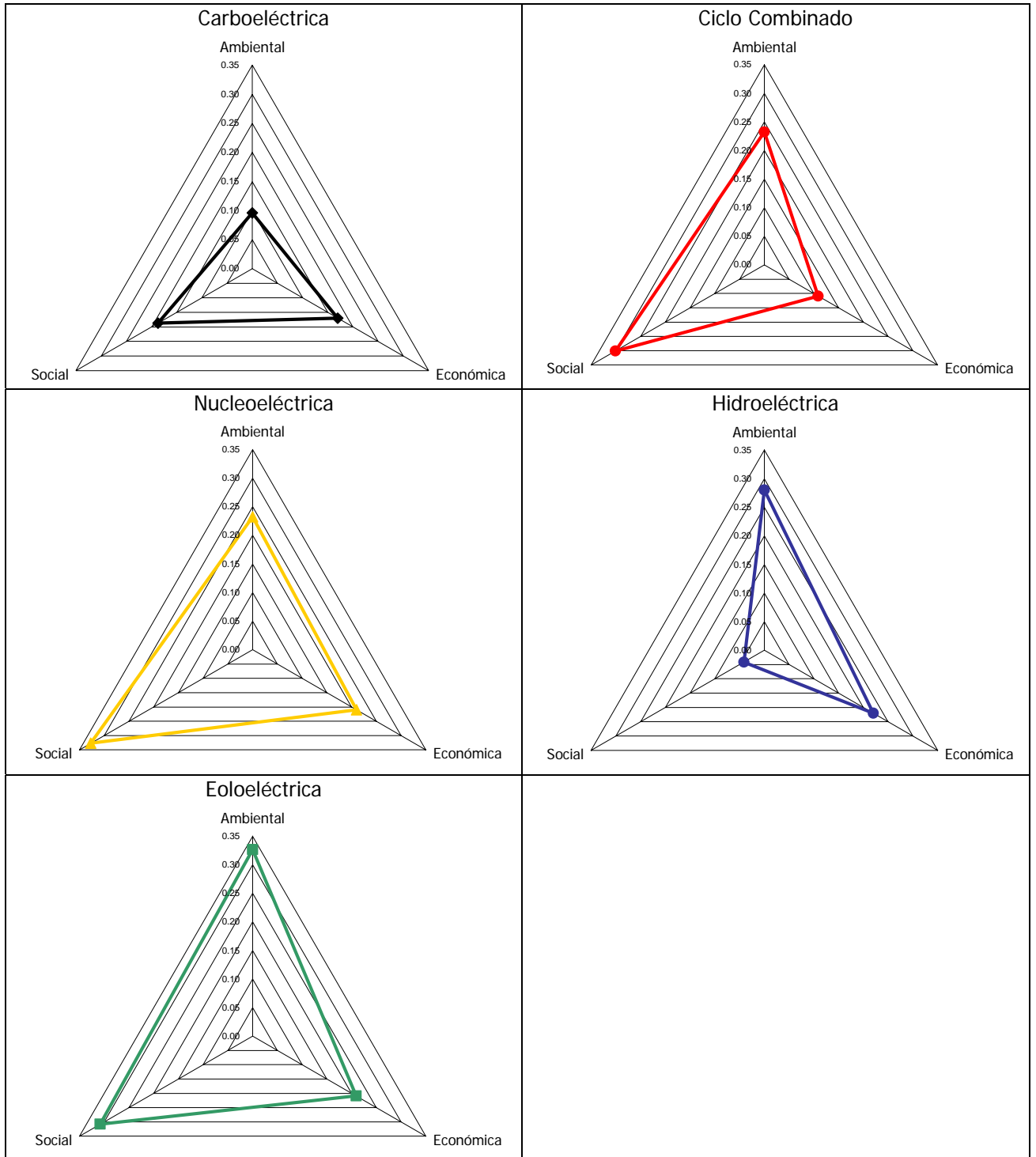
Al igual que el análisis anterior, la tecnología más sustentable es la Eoloeléctrica (sustentabilidad de 0.84), sin embargo ahora en segundo lugar se posiciona la tecnología Nucleoeléctrica (con 0.77 puntos), y en último lugar se encuentra de igual forma la tecnología Carboeléctrica (0.45 puntos).

Si se observa la **Figura 5**, se ve claramente, que la tecnología que tiene mayor armonía en las 3 dimensiones es la Eoloeléctrica, seguida por la Nucleoeléctrica y Ciclo Combinado. En el caso de la tecnología Ciclo Combinado está muy sesgada a la dimensión social (indicativo de que es muy aceptada por la sociedad) y en el caso de la Carboeléctrica, es muy uniforme en el área, pero con valores muy bajos.

**Figura 4. Resultados del enfoque 3 Dimensiones, considerando todos los indicadores seleccionados y tomando en cuenta datos promedio**



**Figura 5. Evaluación de la Sustentabilidad con 3 Dimensiones, utilizando TODOS los Indicadores**



## Comparación de Resultados Analizando las Variantes

Si se toma en cuenta los resultados del Enfoque con 4 Dimensiones de Sustentabilidad así como las variantes realizadas, **Tabla 27**, (es decir, el análisis con todos los indicadores, el que incluye los costos externos y el que excluye las emisiones de SO<sub>2</sub>, NOx y GEI) y solamente se utilizan los valores promedio de los indicadores, se observa que siempre la tecnología más sustentable es la Eoloeléctrica y la menos sustentable es la Carboeléctrica (sólo en el caso de tomar en cuenta todos los indicadores y cuando se excluyen los costos externos). En el análisis cuando se excluyen las emisiones de NOx, SO<sub>2</sub> y GEI, la tecnología menos sustentable es la Nucleoeléctrica, lo anterior porque entonces se le da más peso al indicador de Cantidad de Sustancias Peligrosas Producidas<sup>56</sup>, en donde la Nucleoeléctrica es la tecnología con el peor valor. Otro de los factores que influye en que existan diferencias entre la evaluación de la sustentabilidad tomando en cuenta los costos externos y la que utiliza en lugar de estos costos, las emisiones de NOx, SO<sub>2</sub> y GEI, es que los costos toman en cuenta los daños a la salud por la contaminación ambiental y entonces algunas emisiones pueden ser más dañinas y por lo tanto más caras; en cambio cuando se realiza el análisis solo con las emisiones, se está comparando solo la magnitud del indicador, y la que sea más alta indica una sustentabilidad baja.

**Tabla 27. Resultados del análisis de sustentabilidad, comparación tomando en cuenta los tres análisis y los valores promedio de los indicadores**

Enfoque	Variante	Carboeléctrica	Ciclo Combinado	Nucleoeléctrica	Hidroeléctrica	Eoloeléctrica
4 Dimensiones	15 indicadores	0.54	0.59	0.58	0.66	0.76
	14 indicadores (sin Costos Externos)	0.55	0.59	0.57	0.65	0.76
	12 indicadores (sin NOx, SO <sub>2</sub> y GEI)	0.60	0.61	0.53	0.63	0.77

Donde:

Verde:	1er. lugar, es la dimensión con el mayor puntaje, lo cual indica que es la mejor
Azul:	2º. lugar
Amarillo:	3er. lugar
Naranja:	4º. lugar
Gris:	5º. lugar, es la dimensión con el menor puntaje, lo cual indica que es la peor

<sup>56</sup> Esto es porque en la dimensión ambiental, pasan de ser 7 indicadores a ser solamente 4, por lo que en este último caso cada indicador tiene un peso del 6.25% y cuando se utilizan 7 indicadores cada indicador tiene un peso del 3.6%

## Comparación de Resultados Analizando los Valores Utilizados

En las **Figuras 6, 7 y 8**, se observa que, tomando en cuenta el enfoque con 4 Dimensiones, en los tres análisis realizados (con todos los indicadores, excluyendo el indicador de costos externos y el último análisis excluyendo las emisiones de SO<sub>2</sub>, NOx y GEI del análisis), coincide la tecnología más sustentable siempre es la Eoloeléctrica, independiente si se toman valores promedio, inferior y superior del rango de valores para los indicadores.

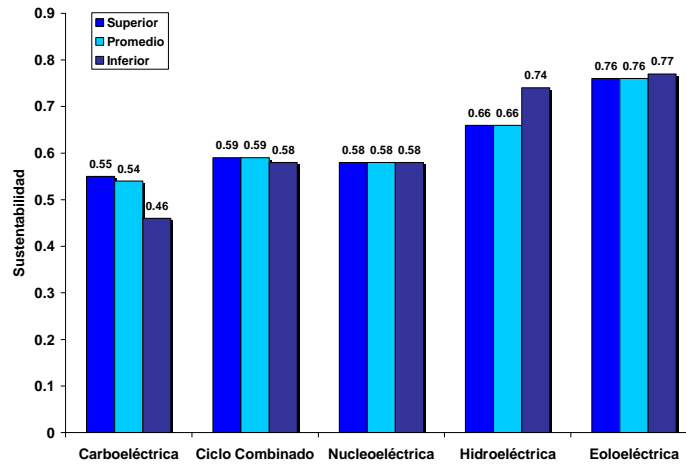
Cuando se toman los valores inferiores (del rango) de los indicadores, la tecnología Hidroeléctrica aumenta considerablemente el valor de sustentabilidad (**Figura 6**), lo anterior porque en el indicador "Accidentes de Riesgo Colectivo", se tiene un rango bastante amplio (entre 4 y 2190 muertes/TW-año), entonces al elegir el valor inferior de este indicador, se hace equiparable a la planta Eoloeléctrica.

Este análisis ayuda a conocer el nivel de precisión que se puede tener al tomar en cuenta los datos promedio, por ejemplo, si observamos la **Figura 6**, la tecnología Carboeléctrica, pasa de ser el cuarto lugar en sustentabilidad con un valor de 0.6, cuando se toman en cuenta los valores superiores y promedios del valor del indicador, a ser el último lugar en sustentabilidad cuando se toman en cuenta los valores inferiores.

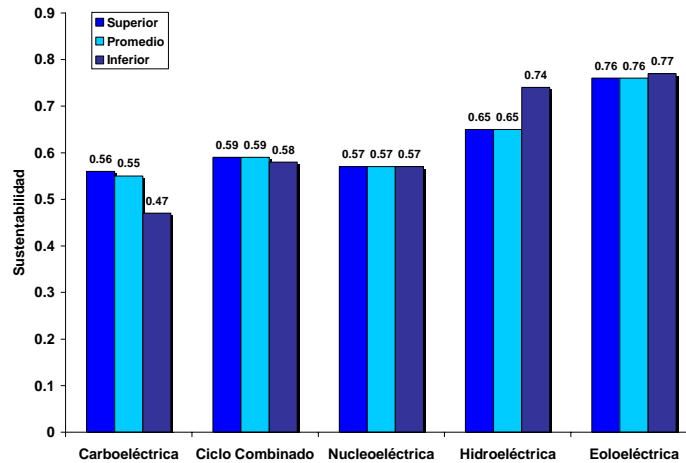
La tecnología menos sustentable resulta ser la Nucleoeléctrica para el caso del análisis cuando se excluyen los valores de emisiones de SO<sub>2</sub>, NOx y GEI (**Figura 8**), independientemente del valor que se tome para el análisis (superior, inferior y promedio del rango) se toman en cuenta los valores promedio y superior de los indicadores. Cuando se utiliza el valor inferior de los indicadores, la tecnología menos sustentable es la Carboeléctrica, lo anterior se explica dado que el indicador "Accidentes de Riesgo Colectivo", para el caso de la tecnología Nucleoeléctrica, se hace equiparable al valor que tiene la planta Eoloeléctrica.



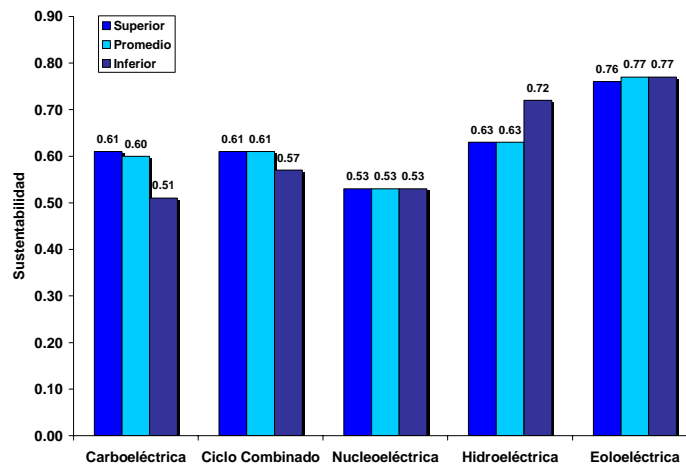
**Figura 6. Resultados del Enfoque con 4 Dimensiones, considerando 15 indicadores**



**Figura 7. Resultados del Enfoque con 4 Dimensiones, considerando 14 indicadores (Sin Costos Externos)**



**Figura 8. Resultados del Enfoque con 4 Dimensiones, considerando 13 indicadores (Sin SO<sub>2</sub>, NOx y GEI)**



## Comparación de los Resultados de los Tres Enfoques

En esta sección se hace un análisis de sensibilidad para ver el efecto que tiene el incluir o eliminar ciertos indicadores, de acuerdo con las consideraciones descritas con anterioridad, es decir, se evalúa la sustentabilidad de las tecnologías de generación desde diferentes enfoques, los resultados se presentan en la **Tabla 28**.

En el análisis en donde se toman en cuenta **TODOS los indicadores (Figura 9)**, es decir que están incluidos al mismo tiempo el indicador de Costos Externos y las emisiones de SO<sub>2</sub>, NOx y GEI aún a pesar de que sabemos que se está considerando la evaluación de impactos ambientales, la tecnología **Eoloeléctrica** siempre fue más Sustentable en los 3 enfoques tomados en cuenta (4 Dimensiones [Sust. 0.84], 3 Dimensiones con Ajustes [Sust. 0.87] y 3 Dimensiones [Sust. 0.76]). Las variaciones en los valores de sustentabilidad para esta Tecnología se deben a que cuando se toman en cuenta 4 dimensiones, específicamente en la dimensión política y en el indicador “No necesidad de estabilidad política”, la tecnología Eoloeléctrica alcanza un valor muy pobre (1), que significa que necesita estabilidad política para que se instalen este tipo de tecnologías, lo cual influye en la suma final de la sustentabilidad. Por lo anterior, cuando se tienen 3 dimensiones y por lo tanto se elimina la dimensión política, el valor de sustentabilidad aumenta. En el enfoque en donde se traslada el indicador “Dependencia del Exterior” a la dimensión Económica y se elimina la dimensión política (y específicamente el principio “no necesidad de estabilidad política”) el valor de sustentabilidad aumenta debido a que en este indicador la tecnología Eoloeléctrica no depende del exterior porque se refiere específicamente a los combustibles utilizados.

En el caso de la **Hidroeléctrica**, sucede algo importante, cuando se toma en cuenta la dimensión política (Enfoque con 4 dimensiones de Sustentabilidad), dado que ésta es una tecnología que no necesita estabilidad política para su instalación y no tiene dependencia del exterior (Este indicador se refiere a la importación de combustible para su funcionamiento), se posiciona en el segundo lugar de las tecnologías más sustentables con un valor de 0.66 y la dimensión económica tiene un valor de 0.17, valor superior que las otras tecnologías, las cuales tienen valores de 0.16 para el caso de la Eoloeléctrica y Nucleoeléctrica, de 0.13 para la Carboeléctrica y de 0.08 para la tecnología de Ciclo Combinado (**Figura 1**). Cuando se elimina esta dimensión, y el indicador “dependencia del exterior” se traslada a la dimensión económica, las tecnologías que quedan en segundo lugar de sustentabilidad es la Nucleoeléctrica (Sust. 0.72) y la tecnología Hidroeléctrica se posiciona en 4º lugar con una sustentabilidad de 0.57, lo anterior porque al tener solamente 3 dimensiones de sustentabilidad, las dimensiones ambiental, económica y social adquieren valores mayores (pasan de repartirse en un porcentaje del 25% en 4 dimensiones, a un 33% por

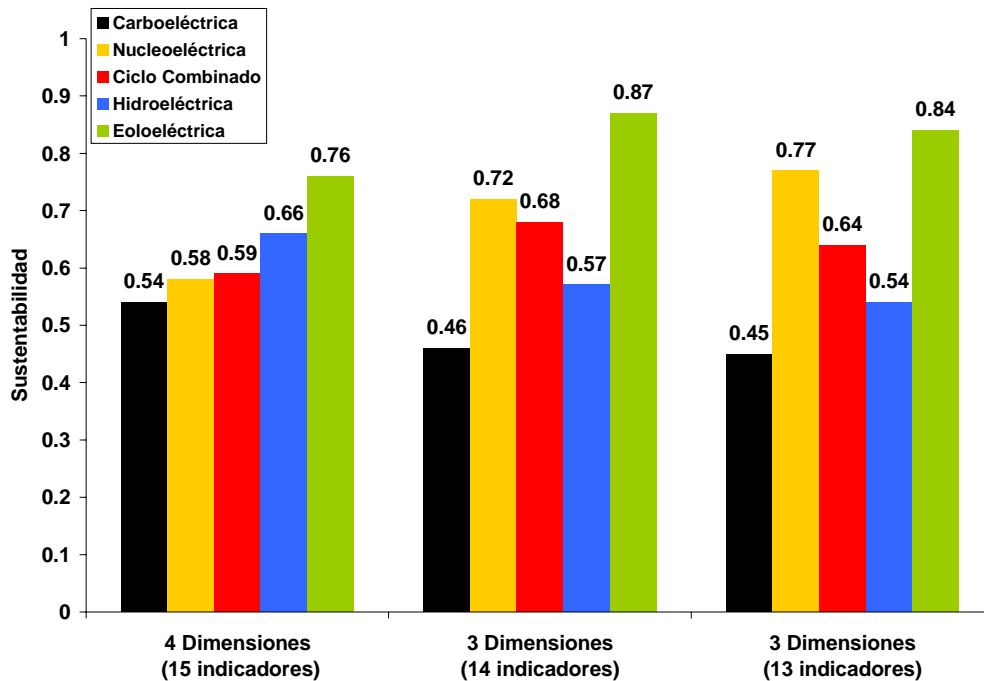
dimensión en el análisis de 3 dimensiones), y en el caso específico de la Hidroeléctrica, en las 4 dimensiones le ayuda mucho que en la dimensión política esta tecnología es la que tiene un mayor puntaje, y al eliminarla entonces la dimensión social adquiere una distribución importante que para la tecnología Hidroeléctrica es negativa debido a que en la cuestión social ésta tiene un valor muy bajo, de hecho en esta dimensión, la hidro es la tecnología con valores menores (Dimen. social [0.03]) y en el caso de la tecnologías Nucleoeléctrica es la mejor en esta dimensión (Dimen. Social [0.25]), porque tienen una baja extensión de tierra perdida y menos muertes por accidente en comparación con la Hidroeléctrica (**Figura 1**).

Cuando se consideran 3 dimensiones y no se toma en cuenta el indicador “Dependencia del exterior” en la dimensión económica, entonces la tecnología Nucleoeléctrica se posiciona en 2º Lugar de Sustentabilidad (Sust. [0.77]), dado que en el indicador “Reservas” y “Costos Internos” tiene de lo valores más altos que las otras tecnologías y no le afecta el indicador de “Dependencia del exterior” que le influye de manera negativa, porque todo el combustible que se utiliza es importado (la relación importación/producción es 100%, dado que todo el combustible se importa).

**Tabla 28. Resultados de Sustentabilidad con los Tres Enfoques**

Enfoque	Variante	Carboeléctrica	Ciclo Combinado	Nucleoeléctrica	Hidroeléctrica	Eoloeléctrica
4 Dimensiones	15 indicadores	0.54	0.59	0.58	0.66	0.76
	14 indicadores (sin Costos Externos)	0.55	0.59	0.57	0.65	0.76
	12 indicadores (sin Nox, SO2 y GEI)	0.60	0.61	0.53	0.63	0.77
3 Dimensiones (Incluye Dependencia del Exterior)	14 indicadores (sin estabilidad política)	0.46	0.68	0.72	0.57	0.87
	13 indicadores (sin Costos Externos ni estabilidad política)	0.47	0.68	0.7	0.56	0.87
	11 indicadores (sin Nox, SO2 y GEI)	0.53	0.70	0.65	0.53	0.88
3 Dimensiones	13 indicadores	0.45	0.64	0.77	0.54	0.84
	12 indicadores (sin Costos Externos)	0.47	0.64	0.75	0.53	0.84
	10 indicadores (sin Nox, SO2 y GEI)	0.52	0.66	0.70	0.51	0.85

**Figura 9. Evaluación de la Sustentabilidad con 4 y 3 Dimensiones y utilizando TODOS los Indicadores**

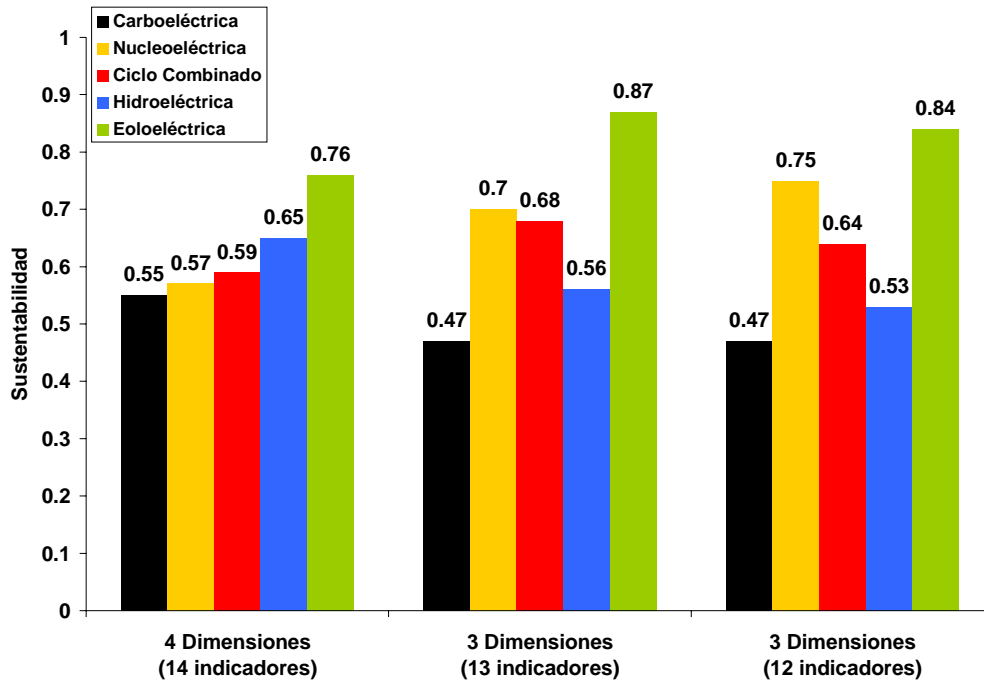


Cuando se **eliminan los Costos Externos** de los análisis (**Figura 10**), de igual forma la tecnología más sustentable es la Eoloeléctrica (Sustentabilidad 4 dimen. [0.76], 3 dimen. con ajustes [0.87], 3 dimen. [0.84]) y en segundo lugar, para el caso de 4 dimensiones se tiene a la tecnología Hidroeléctrica (Sustentabilidad 4 dimen. [0.65]), y en segundo lugar, para el caso de 3 dimensiones se tiene a la planta Nucleoeléctrica, (3 dimen. con ajustes [0.70], 3 dimen. [0.75]).

Para este análisis, la planta Carboeléctrica, siempre se mantiene como la tecnología menos sustentable.

Es importante observar (**Figura 10**), que en los tres enfoques, la tecnología que tiene el 3er. lugar de sustentabilidad es la de Ciclo Combinado.

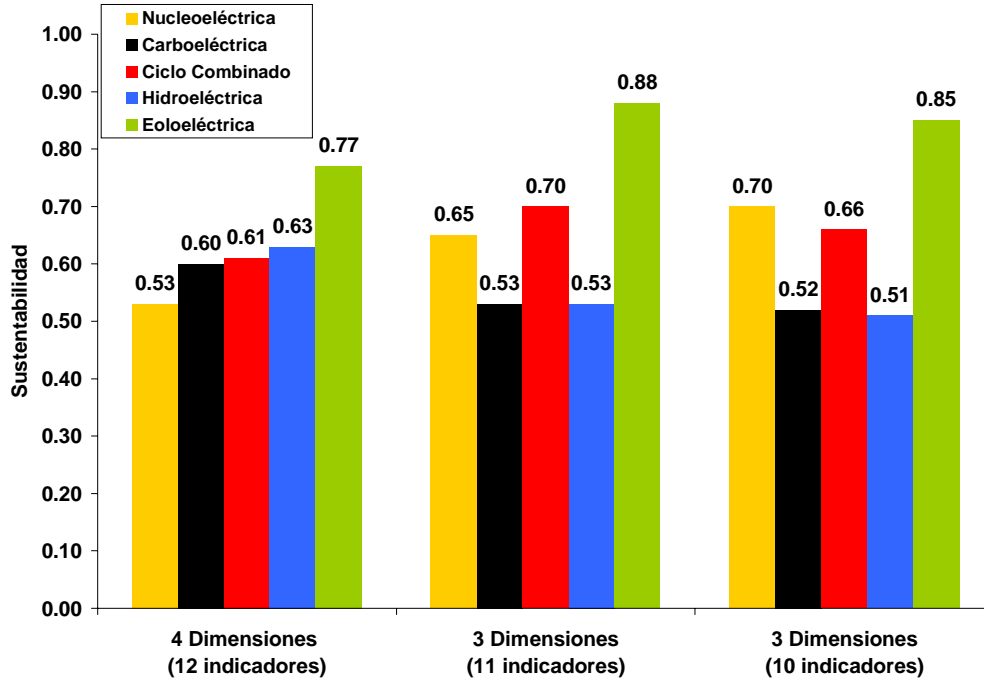
**Figura 10. Evaluación de la Sustentabilidad con 4 y 3 Dimensiones y EXCLUYENDO en los Indicadores el de COSTOS EXTERNOS**



Cuando NO se toman en cuenta los Indicadores de Emisiones ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y GEI), **Figura 11**, la tecnología más sustentable sigue siendo la Eoloeléctrica, seguida por la Hidroeléctrica, cuando se hace el análisis con 4 dimensiones, por la de Ciclo Combinado cuando se hace el análisis con 3 dimensiones con ajustes y por la Nucleoeléctrica cuando se hace el análisis con 3 dimensiones.

A diferencia de los análisis anteriores, la tecnología menos sustentable, cuando se hace el análisis con el enfoque de 4 dimensiones, es la Nucleoeléctrica, en lugar de Carboeléctrica que era la que había resultado menos sustentable en los 2 análisis anteriores. Lo anterior se explica porque se está considerando en la dimensión ambiental "la cantidad de sustancias peligrosas producidas", que únicamente la planta Nucleoeléctrica es la que produce estas sustancias.

**Figura 11. Evaluación de la Sustentabilidad con 4 y 3 Dimensiones y EXCLUYENDO en los Indicadores el de Emisiones de SO<sub>2</sub>, NOx y GEI**



## Una Visión de la Sustentabilidad a través de los Indicadores

En esta sección se presenta una visión gráfica de la Sustentabilidad, tomando en cuenta todos los indicadores para cada dimensión y solamente el Enfoque con 4 Dimensiones y todos los indicadores con valores promedio.

Si se hace un recuento del concepto de sustentabilidad se refiere a suponer un equilibrio armónico en el manejo de los elementos componentes del capital físico y del acervo natural, respetando ciertos criterios de equidad y la diversidad cultural de la sociedad, lo cual implica que las dimensiones (ambiental, económica, política y social) deben de estar en equilibrio para que el desarrollo sea sustentable, porque un cierto nivel de desarrollo con respecto a una dimensión podría poner en peligro el desarrollo en el largo plazo respecto a otras dimensiones.

En las **Figuras 12, 13, 14, 15, 16 y 17**, se presentan gráficas con los resultados de los indicadores de sustentabilidad (ya normalizados) para las diferentes tecnologías de generación analizadas. Como se comentaba en la sección anterior, de manera gráfica se evalúa la Sustentabilidad, observando el área que cubre cada tecnología con los valores de los indicadores. En el caso de la tecnología Eoloeléctrica (**Figura 12 y 17**) es la que tiene los mejores valores para

la mayoría de los indicadores y por tanto al graficar se cubre la mayor parte de la figura y por tanto es la más sustentable.

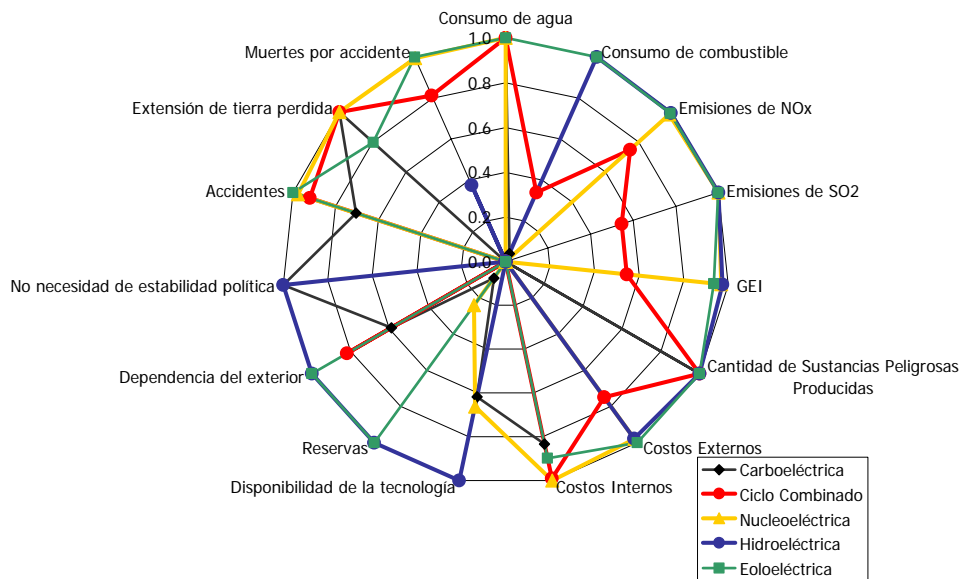
En el caso de la tecnología Carboeléctrica (**Figura 13**), con los peores valores de los indicadores en la dimensión ambiental, es la tecnología menos sustentable.

La tecnología Ciclo Combinado (**Figura 14**), es bastante uniforme, pero con valores menores que la Eoloeléctrica.

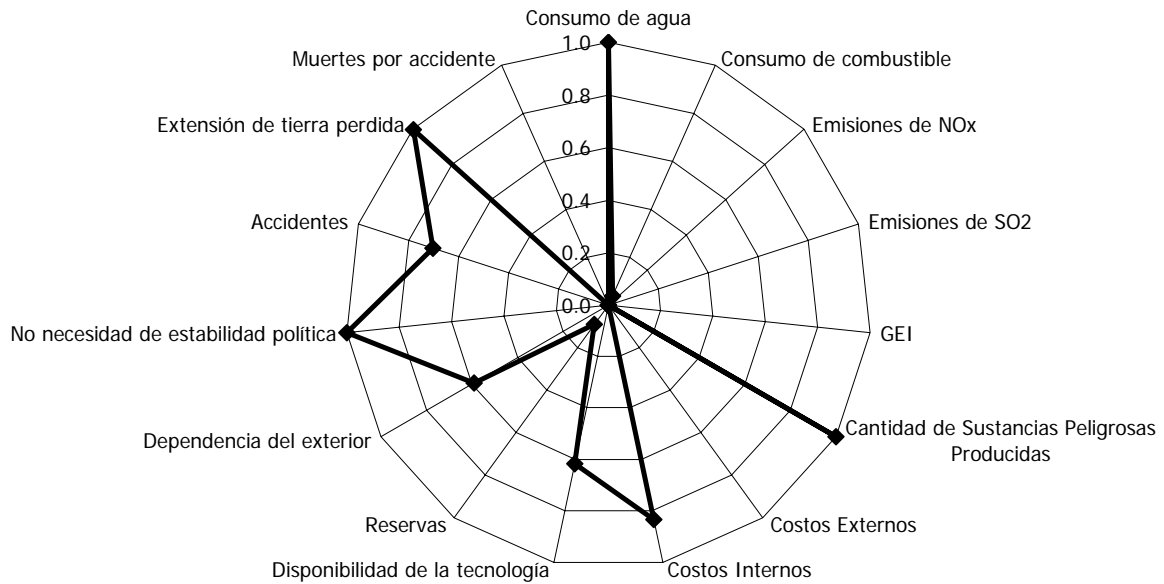
En el caso de la tecnología Nucleoeléctrica (**Figura 15**), los resultados del análisis muestran una figura bastante uniforme en los indicadores de la dimensión económica y social y en algunos de la dimensión ambiental, sin embargo en la dimensión política tiene los peores valores, lo que implica área sin sombrear y menor sustentabilidad.

La Tecnología Hidroeléctrica (**Figura 16**) también muestra una figura bastante uniforme en los indicadores de la dimensión ambiental y en la dimensión política, en este caso; sin embargo en los indicadores de la dimensión social los valores son los más bajos de todas las tecnologías.

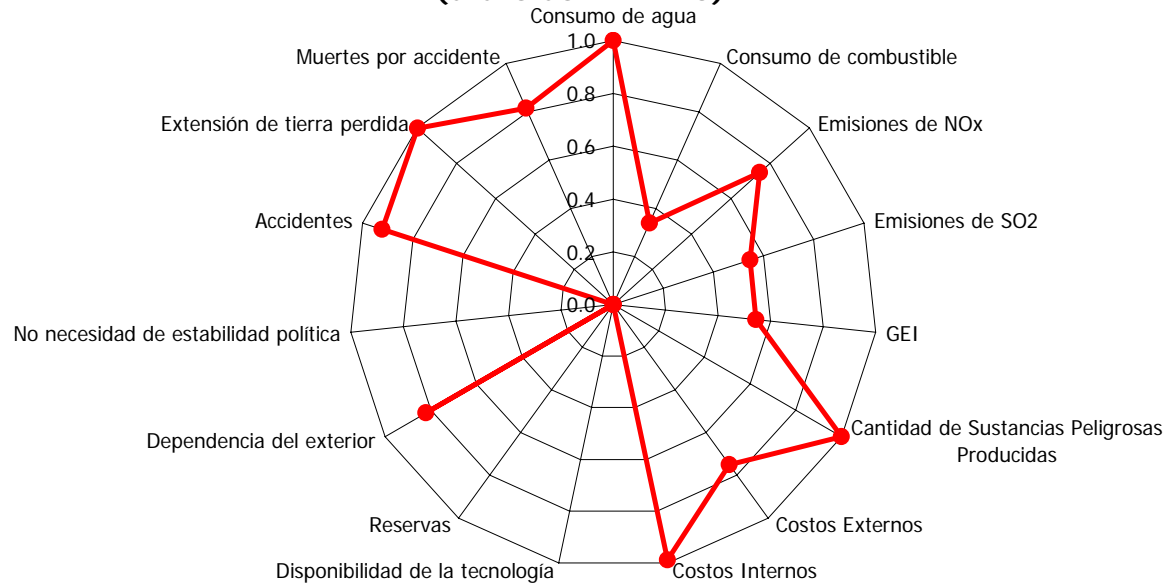
**Figura 12. Evaluación de la Sustentabilidad con 15 Indicadores y Valores Promedio**



**Figura 13. Evaluación de la Sustentabilidad con 15 Indicadores y Valores Promedio (CARBOELÉCTRICA)**

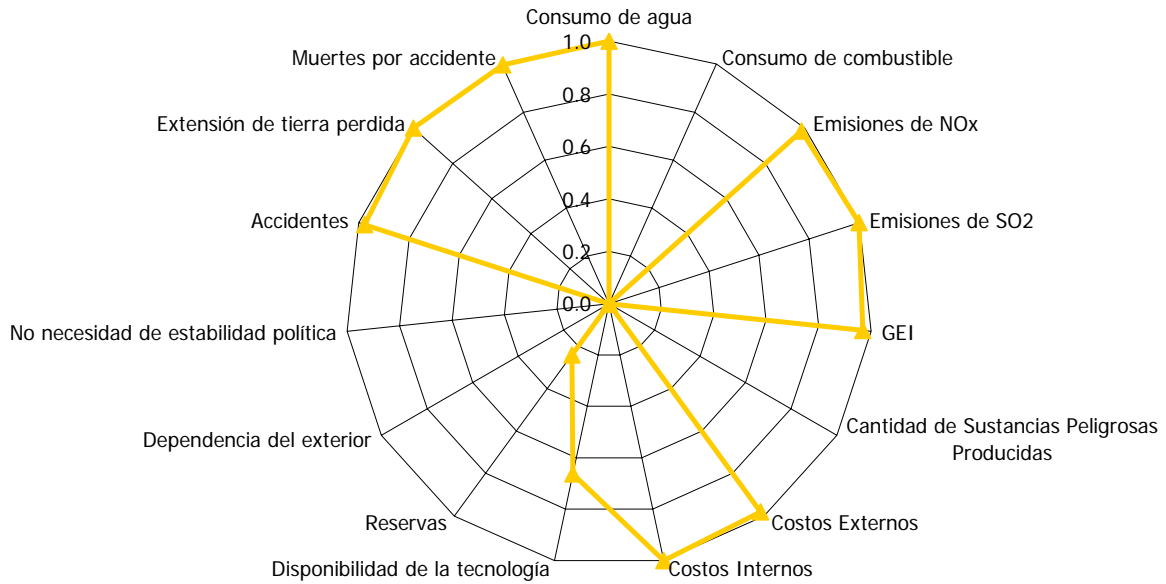


**Figura 14. Evaluación de la Sustentabilidad con 15 Indicadores y Valores Promedio (CICLO COMBINADO)**

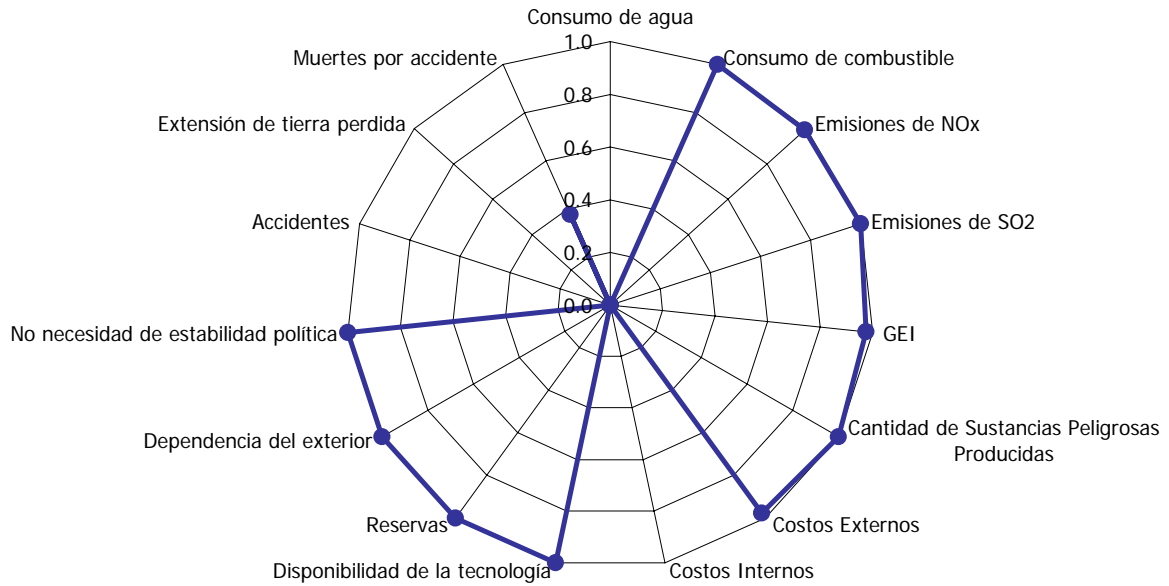




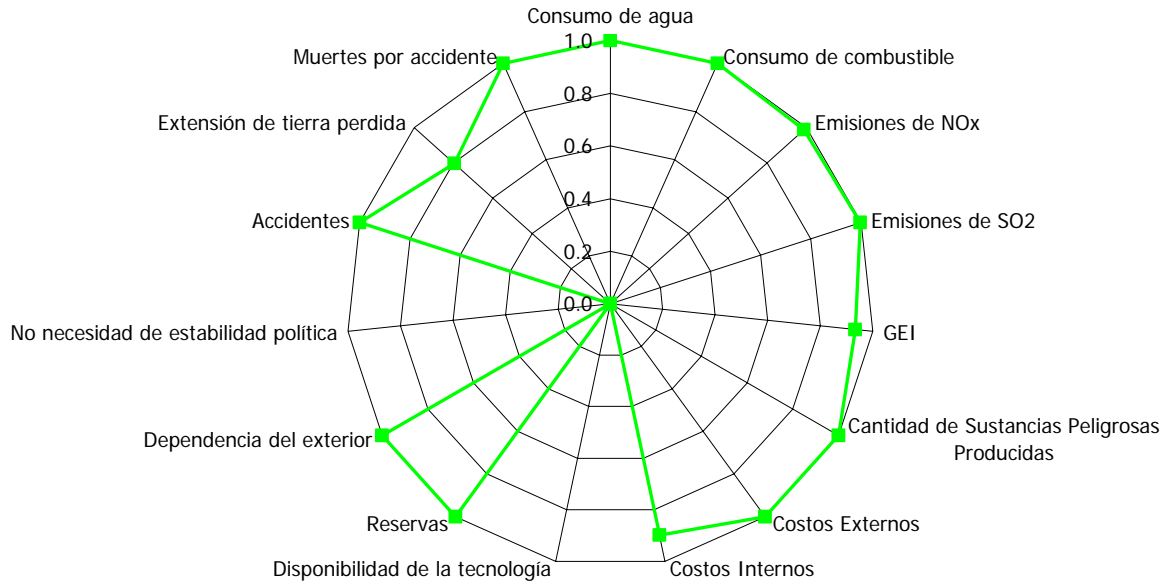
**Figura 15. Evaluación de la Sustentabilidad con 15 Indicadores y Valores Promedio (NUCLEOELÉCTRICA)**



**Figura 16. Evaluación de la Sustentabilidad con 15 Indicadores y Valores Promedio (HIDROELÉCTRICA)**



**Figura 17. Evaluación de la Sustentabilidad con 15 Indicadores y Valores Promedio (EOLOELÉCTRICA)**



## 6. Conclusiones

La comparación de las diferentes opciones de generación eléctrica desde el punto de vista del desarrollo sustentable se ha convertido en una tarea indispensable para la toma de decisiones en los planes de expansión eléctrica de cualquier nación. Sin embargo como se puede ver en este trabajo, esta tarea no es fácil de realizar dada la gran cantidad de parámetros involucrados, la mayoría de ellos relacionados entre sí y con diferentes referencias para su determinación.

En este trabajo la tecnología más sustentable resultó ser la Eoloeléctrica, se observa que aún con las variantes que se hicieron en el análisis, no existe mucha discrepancia en los resultados, cuando se toman en cuenta todos los indicadores, cuando se excluyen los costos externos y cuando se excluyen las emisiones de SO<sub>2</sub>, NOx y GEI, sin embargo se debe estar consiente que la evaluación hecha con todos los indicadores tiende a repetir información.

Con el análisis realizado, más que dar un resultado, se ha establecido un método de cálculo que permitirá comparar la sustentabilidad de las plantas que se seleccionen, pero también cambiar los valores de los indicadores para que se apeguen a la realidad en donde se apliquen; de tal manera que se convierta en un estudio dinámico a lo largo del tiempo.

Dado que este estudio es estático, debido a que se toman en cuenta valores de los indicadores puntuales, ya sea actuales o pasados, sería conveniente llevar a cabo un estudio similar pero en donde se evalúe la sustentabilidad para diferentes escenarios de evolución de los diferentes indicadores para las diversas energías y de esta manera hacer propuestas de las combinaciones de plantas convenientes para instalarse en el futuro, de tal manera que se pueda proponer el sistema más sustentable.

Este estudio no implica que se tenga que elegir una sola tecnología de generación eléctrica, más bien, se tiene que utilizar una combinación de tecnologías que impliquen el escenario más sustentable.

Los resultados mostraron que la tecnología más sustentable es la Eoloeléctrica, por lo que es conveniente usarla al máximo, pero sin dejar a un lado las otras tecnologías, sobre todo porque se tiene que tomar en cuenta que la tecnología Eoloeléctrica es intermitente y esa característica la pone en una seria desventaja frente a las demás. Por ejemplo, cuando se instalan 100 MW de eólica, se tiene que instalar adicionalmente una planta base (Carbón, Ciclo Combinado, o Nuclear) para suministrar la energía cuando no haya viento. Por esta razón la energía eólica generalmente

no es comparada con las energías que ofrecen potencia firme como son las otras. En el presente trabajo la eólica se comparó con las otras fuentes porque en el sitio de la Venta en Oaxaca se tienen excelentes vientos y se contempla la estrategia de que las Hidroeléctricas que se encuentren ya en la zona sur del país cubran la potencia de las eólicas cuando el viento no sople. Esta estrategia está actualmente en estudio y habrá que esperar los resultados para llegar a una conclusión.

En el caso de la tecnología Hidroeléctrica, en este estudio se consideró que ésta tenía una buena estabilidad sociopolítica y financiera, sin embargo recientemente se ha visto que en el caso de México, la aceptación social ha influido sobremanera para llevar a cabo la construcción de estas plantas, debido a que la sociedad ha rechazado su instalación y por otra parte la elevada inversión inicial también ha sido un factor desfavorable.

Una tecnología que podría ser recomendada sería la Nucleoeléctrica, que mostró buenos resultados de sustentabilidad en el estudio. La energía nuclear ofrece generación eléctrica en forma planeada y por otro lado cada día es una tecnología que por su experiencia a nivel mundial es más aceptada por los diferentes sectores de la sociedad tanto a nivel internacional como nacional.

Finalmente, no hay tecnología de generación que sea la mejor en todos los indicadores, por lo que un análisis como éste, ayuda a identificar el equilibrio entre las dimensiones de sustentabilidad.

## Anexo 1. Resultados de los Análisis

### Resultados por Dimensión del Enfoque "4 Dimensiones" considerando Valores Promedio

#### Considerando todos los indicadores

Dimensión	Carboeléctrica	Ciclo Combinado	Nucleoeléctrica	Hidroeléctrica	Eoloeléctrica
Ambiental	0.07	0.18	0.18	0.21	0.25
Económica	0.13	0.08	0.16	0.17	0.16
Política	0.20	0.10	0.00	0.25	0.13
Social	0.14	0.23	0.25	0.03	0.23
<b>Total</b>	<b>0.54</b>	<b>0.59</b>	<b>0.58</b>	<b>0.66</b>	<b>0.76</b>

#### Sin considerar los Costos Externos

Dimensión	Carboeléctrica	Ciclo Combinado	Nucleoeléctrica	Hidroeléctrica	Eoloeléctrica
Ambiental	0.08	0.17	0.16	0.21	0.25
Económica	0.13	0.08	0.16	0.17	0.16
Política	0.20	0.10	0.00	0.25	0.13
Social	0.14	0.23	0.25	0.03	0.23
<b>Total</b>	<b>0.55</b>	<b>0.59</b>	<b>0.57</b>	<b>0.65</b>	<b>0.76</b>

#### Sin Considerar las emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y GEI

Dimensión	Carboeléctrica	Ciclo Combinado	Nucleoeléctrica	Hidroeléctrica	Eoloeléctrica
Ambiental	0.13	0.19	0.12	0.19	0.25
Económica	0.13	0.08	0.16	0.17	0.16
Política	0.20	0.10	0.00	0.25	0.13
Social	0.14	0.23	0.25	0.03	0.23
<b>Total</b>	<b>0.60</b>	<b>0.61</b>	<b>0.53</b>	<b>0.63</b>	<b>0.77</b>

## Resultados por Dimensión del Enfoque "3 Dimensiones" considerando Valores Promedio

### Considerando todos los indicadores

Dimensión	Carboeléctrica	Ciclo Combinado	Nucleoeléctrica	Hidroeléctrica	Eoloeléctrica
Ambiental	0.10	0.23	0.23	0.28	0.33
Económica	0.17	0.11	0.21	0.22	0.21
Social	0.19	0.30	0.33	0.04	0.31
<b>Total</b>	<b>0.45</b>	<b>0.64</b>	<b>0.77</b>	<b>0.54</b>	<b>0.84</b>

### Sin considerar los Costos Externos

Dimensión	Carboeléctrica	Ciclo Combinado	Nucleoeléctrica	Hidroeléctrica	Eoloeléctrica
Ambiental	0.11	0.23	0.22	0.27	0.33
Económica	0.17	0.11	0.21	0.22	0.21
Social	0.19	0.30	0.33	0.04	0.31
<b>Total</b>	<b>0.47</b>	<b>0.64</b>	<b>0.75</b>	<b>0.53</b>	<b>0.84</b>

### Sin Considerar las emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y GEI

Dimensión	Carboeléctrica	Ciclo Combinado	Nucleoeléctrica	Hidroeléctrica	Eoloeléctrica
Ambiental	0.17	0.25	0.16	0.25	0.33
Económica	0.17	0.11	0.21	0.22	0.21
Social	0.19	0.30	0.33	0.04	0.31
<b>Total</b>	<b>0.52</b>	<b>0.66</b>	<b>0.70</b>	<b>0.51</b>	<b>0.85</b>

## Resultados por Dimensión del Enfoque "3 Dimensiones con Ajustes" considerando Valores Promedio

### Considerando todos los indicadores

Dimensión	Carboeléctrica	Ciclo Combinado	Nucleoeléctrica	Hidroeléctrica	Eoloeléctrica
Ambiental	0.10	0.23	0.23	0.28	0.33
Económica	0.18	0.15	0.16	0.25	0.24
Social	0.19	0.30	0.33	0.04	0.31
<b>Total</b>	<b>0.46</b>	<b>0.68</b>	<b>0.72</b>	<b>0.57</b>	<b>0.87</b>

### Sin considerar los Costos Externos

Dimensión	Carboeléctrica	Ciclo Combinado	Nucleoeléctrica	Hidroeléctrica	Eoloeléctrica
Ambiental	0.11	0.23	0.22	0.27	0.33
Económica	0.18	0.15	0.16	0.25	0.24
Social	0.19	0.30	0.33	0.04	0.31
<b>Total</b>	<b>0.47</b>	<b>0.68</b>	<b>0.70</b>	<b>0.56</b>	<b>0.87</b>

### Sin Considerar las emisiones de SO<sub>2</sub>, NOx y GEI

Dimensión	Carboeléctrica	Ciclo Combinado	Nucleoeléctrica	Hidroeléctrica	Eoloeléctrica
Ambiental	0.17	0.25	0.16	0.25	0.33
Económica	0.18	0.15	0.16	0.25	0.24
Social	0.19	0.30	0.33	0.04	0.31
<b>Total</b>	<b>0.53</b>	<b>0.70</b>	<b>0.65</b>	<b>0.53</b>	<b>0.88</b>





## Referencias

- [1] SEMARNAT / INE / INEGI. *Indicadores de Desarrollo Sustentable en México*. México. 2000.
- [2] OLADE / CEPAL / GTZ. *Energía y Desarrollo Sustentable en América Latina y el Caribe: Enfoques para la Política Energética*. Ecuador. 1997
- [3] OLADE / CEPAL / GTZ. *Energía y Desarrollo Sustentable en América Latina y el Caribe: Guía para la Formulación de Políticas Energética*. Ecuador. 2000
- [4] OLADE / CEPAL / GTZ; SALGADO Rene / ALTOMONTE Hugo. *Indicadores de Sustentabilidad 1990-1999*. Chile. 2001
- [5] Martín del Campo Márquez C. *Potencial de la Energía Nucleoeléctrica para el Desarrollo Sustentable en México*. México. 2003.
- [6] SEMARNAT, Muñoz Villarreal C. / González Martínez A.C. *Economía, Sociedad y Medio Ambiente: Reflexiones y Avances hacia un Desarrollo Sustentable en México*. México. 2000.
- [7] Mathis Wackernagel / William Rees. *Nuestra Huella Ecológica: Reduciendo el Impacto Humano sobre la Tierra*. Chile. 2001.
- [8] SENER. *Prospectiva del Sector Eléctrico 2003-2012*. México. 2004.
- [9] ATPAE. *Justificación para la Selección de la Metodología en Metodologías para Calcular el Coeficiente de Emisión Adecuado para Determinar las Reducciones de GEI Atribuibles a Proyectos de Eficiencia Energética y Energías Renovables*. México. 2003
- [10] NREL/ USAID / DOE. *Wind Energy Resource Atlas of Oaxaca*. México. 2003
- [11] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *External Costs – Environment, Health and Safety Issues en Nuclear Electricity 7<sup>th</sup> edition*, ch 6.
- [12] Martín del Campo C. / Revista Técnica México Nuclear, *Opciones de Generación Eléctrica y Sustentabilidad*, Volumen 5 Número 1, Enero - Abril 2004

- [13] SENER, *Prospectiva del Mercado de Gas Natural 2004-2013*. México. 2004. p. 21.
- [14] SENER, *Balance Nacional de Energía 2002*. México. 2004. p. 136, 141, 146, 147, 151 y 169.
- [15] CAMECO Corporation, BIAC Task Force on Climate Change, *Discussion on Nuclear Energy*. Agosto 2002.
- [16] Canadian Nuclear Association/ The Paul Scherrer Institut/ Hirschberg S., Spiekerman G., Dones R./ *Severe accident analysisi for large energy system: executive summary*. Suiza. Abril 2003.
- [17] UIC Nuclear Issues Briefing Paper # 71. *Energy Subsidies and External Costs*. 2004. p.7 y 8.
- [18] CFE. *Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico*. Generación. México. 2002.
- [19] European Commission / Community Research. *External Cost: Research Results on Socio-Environmental Damages Due to Electricity and Transport*. Belgica. 2003. p.15.
- [20] BIAC Task Force on Climate Change, *Discussion on Nuclear Energy*. Agosto 2002.
- [21] PIMENTEL David / PIMENTEL Marcia, Department of Entomology and Division of Nutritional Sciences, / Cornell University. *Land, Energy and Water: The Constraints Governing Ideal U.S. Population Size*. Ithaca, New York, U.S.A. 1989.
- [22] ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING. *The Cost of Generating Electricity*. Londres. Marzo 2004.
- [23] NREL / Spath Pamela L., Mann Margaret K. *Life Cycle Assessment of a Natural Gas Combined – Cycle Power Generation System*. U.S.A. September 2000.
- [24] European Commission – Directorate-General XII, Science, *Research and Development. ExternE, Externalities of Energy Vol. XX: National Implementation*. Union Europea.
- [25] UIC Nuclear Issues Briefing Paper # 57. *Energy Analysis of Power Systems*. 2004. [www.uic.com.au/nip57.htm](http://www.uic.com.au/nip57.htm)

- [26] UIC Nuclear Issues Briefing Paper # 54. *Sustainable Energy*. 2004. p.2 y 3  
[www.uic.com.au/nip54.htm](http://www.uic.com.au/nip54.htm)
- [27] CFE. *Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico*. Generación. México. 2004.
- [28] VOORSPOOLS Kris. R. / BROUWERS Els A. / D'HAESELEER William D. / Universidad de Leuven - División de Conversión de Energía y Mecánica Aplicada. *The indirect Greenhouse Gas Emissions Embedded in the Investment Goods for Emission-Free Power-Generating Technologies, Evaluated for Belgian Conditions*. Bélgica. 1998
- [29] VOORSPOOLS Kris. R. / BROUWERS Els A. / D'HAESELEER William D. / Universidad de Leuven - División de Conversión de Energía y Mecánica Aplicada. *The indirect Greenhouse Gas Emissions Embedded in "Emission -Free" Power Plant; Result for the Low Countries*. 2000.
- [30] IEA / Implementing Agreement for Hydropower Technologies and Programmes / KOCH Frans H. *Hydropower-Internalise Cost and Externalised Benefits*. Canadá. 2002.  
[www.nei.org/doc.asp?catnum=2&catid=260&doid=&format=print](http://www.nei.org/doc.asp?catnum=2&catid=260&doid=&format=print)
- [31] MEIER Paul J. / University of Wisconsin - Fusion Technology Institute. Life-Cycle Assessment of Electricity Generation Systems and Applications for Climate Change Policy Analysis. Wisconsin, E.U. 2002.
- [32] SPITZLEY David V & KEOLEIAN Gregory A.. / Center for Sustainable Systems, University of Michigan. Life Cycle Environmental and Economic Assessment of Willow Biomass Electricity: A Comparison with Other Renewable and Non-Renewable Sources. Ann Arbor, MI, E.U. 25 de marzo 2004.
- [33] ROTH Ian F., AMBS Lawrence L / ELSEVIER. Incorporating externalities into a full cost approach to electric power generation life-cycle costing. U.S.A. 2004.
- [34] DOE/RW-0006, Rev. 1, U.S. Department of Energy. *Spent Fuel and Radioactive Waste Inventories, Projections and Characteristics", Table 9.1 Lifetime Radioactive Waste Generation From a PWR and a BWR*. Diciembre 1985.

- [35] SEMARNAT / CEPAL. Evaluación de las Externalidades Ambientales de la Generación Termoeléctrica en México. Mexico. Noviembre de 2004. p. 9
- [36] International Atomic Energy Agency (IAEA) / United Nations Department of Economic and Social Affairs / International Energy Agency (IEA) / Eurostar / European Environment Agency. *Energy Indicator for Sustainable Development: Guidelines and Methodologies*. Abril 2005.
- [37] SENER. *Prospectiva del Sector Eléctrico 2004-2013*. México. 2005.
- [38] PNUD. *Desarrollo Humano: Informe 1992, publicado para el PNUD*. Bogotá. 1992. p.18
- [39] World Commission on Environment and Development (WECD). *Our Common Future*. New York Oxford. 1987
- [40] SEMARNAT / INE. *Estrategia Nacional de Acción Climática*. México. 2002. p.178.
- [41] International Energy Agency (IEA) - Implementing Agreement for Hydropower Technologies and Programmes. Frans H. Koch. *Hydropower-Internalized, Costs and Externalized Benefits*. Ottawa, Canada. 2000.
- [42] W. Krewitt, P. Mayerhofer, R. Friedrich, A. Trukenmüller, T. Heck, A. Greßmann, F. Raptis, F. Kaspar, J. Sachau, K. Rennings, J. Diekmann, B. Praetorius. *ExternE - Externalities of Energy. National Implementation in Germany*. IER, Stuttgart. 1998.
- [43] Jiménez C. Blanca E. *La Contaminación Ambiental en México: Causas, Efectos y Tecnología Apropiaada*. México. 2001. p.787.

# Glosario de Términos

ATPAE	Asociación de Técnicos y Profesionistas en Aplicación Energética
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CFC	Cluorofluorocarbonos
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub>	Bióxido de carbono
cUSD	Centavos de Dólar
DOE	Departamento de Energía de Estados Unidos
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GTZ	Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit
GW	Gigawatt
IAEA	Agencia Internacional de Energía Atómica
IEA	Agencia Internacional de Energía
INE	Instituto Nacional de Ecología
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
km <sup>2</sup>	kilómetros cuadrados
kWh	kilowatt hora
m <sup>3</sup>	metros cúbicos
MJ	Megajoules
MW	Megawatt
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Nitrógeno
NREL	National Renewable Energy Laboratory
OECD	Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía
PHWR	Reactor de agua pesada a presión
PNUD	Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo
PWR	Reactor de agua ligera a presión
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER	Secretaría de Energía
SO <sub>2</sub>	Bióxido de azufre
tCO <sub>2</sub> eq.	Toneladas de bióxido de carbono equivalente, es la suma de emisiones de CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O, en su equivalencia en CO <sub>2</sub> ,
TW-año	Terawatt - año
UE	Unión Europea
USAID	Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional
USD	Dólar
WECD	World Commission on Environment Development