



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**EVALUACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS DE ESCENARIOS DE
EXPANSIÓN ELÉCTRICA EN MÉXICO CON METAS DE
GENERACIÓN LIMPIA**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA

BRANDON IVÁN PÉREZ MELO



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX

2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO

VOCAL: Profesor: LUZ MARÍA LAZCANO ARRIOLA

SECRETARIO: Profesor: CECILIA MARTÍN DEL CAMPO MÁRQUEZ

1er. SUPLENTE: Profesor: SERGIO ADRIÁN GARCÍA GONZÁLEZ

2° SUPLENTE: Profesor: ALEJANDRA MENDOZA CAMPOS

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

CIUDAD UNIVERSITARIA, FACULTAD DE INGENIERÍA

ASESOR DEL TEMA:

DRA. CECILIA MARTÍN DEL CAMPO MÁRQUEZ

SUSTENTANTE (S):

BRANDON IVÁN PÉREZ MELO

Índice temático

Resumen	v
Nomenclatura, acrónimos y siglas	vi
Introducción	1
Capítulo 1. La Energía Eléctrica	5
1.1 Historia de la Generación Eléctrica	7
Historia de la Generación Eléctrica en México	11
1.2 La Generación de la Energía Eléctrica	14
Fuentes de Energía	15
1.3 Tecnologías para la Generación de Energía Eléctrica	21
1.4 Centrales de Generación Eléctrica en México	22
Tecnologías Convencionales	22
Tecnologías Limpias	28
1.5 El Sector Eléctrico en México	42
Capítulo 2. La Contaminación Ambiental	51
2.1 El Impacto Ambiental	52
2.2 La Contaminación Atmosférica	56
2.3 Efectos de la Contaminación Atmosférica	63
Afectación a los ciclos biogeoquímicos	63
El Cambio Climático	67
2.4 La Contaminación Atmosférica Emitida por Centrales Eléctricas	76
2.5 La Contaminación Atmosférica en México	81
Capítulo 3. Evaluación de Emisiones Atmosféricas del Sector Eléctrico Mexicano	91
3.1 El Análisis del Ciclo de Vida	92
3.2 El Análisis del Ciclo de Vida aplicado a centrales eléctricas	93
Conclusiones	138
Bibliografía	140
Apéndice 1	148
Apéndice 2	151
Apéndice 3	155
Apéndice 4	166
Apéndice 5	168
Apéndice 6	173

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Eolípila de Herón	7
Ilustración 2. Máquina atmosférica de Newcomen	7
Ilustración 3. Primer dínamo usado en la estación Pearl Street	9
Ilustración 4. Vulcan Street Plant	9
Ilustración 5. Esquema de los principales equipos en una central eléctrica.	21
Ilustración 6. Esquema de una central termoeléctrica convencional.	23
Ilustración 7. Esquema de una central de combustión interna	24
Ilustración 8. Esquema de una central turbogás	25
Ilustración 9. Esquema de una central de ciclo combinado	26
Ilustración 10. Esquema una central carboeléctrica	28
Ilustración 11. Esquema de un aerogenerador	29
Ilustración 12. Esquema de un parque eólico	30
Ilustración 13. Funcionamiento de una central solar de torre central	31
Ilustración 14. Funcionamiento de una central solar de canal parabólico	32
Ilustración 15. Funcionamiento de un disco parabólico	33
Ilustración 16. Funcionamiento de un módulo fotovoltaico	35
Ilustración 17. Esquema de una central hidroeléctrica de agua fluente	36
Ilustración 18. Esquema de una central hidroeléctrica de agua embalsada	37
Ilustración 19. Funcionamiento de una central geotérmica	38
Ilustración 20. Diagrama del proceso de un reactor PWR	41
Ilustración 21. Diagrama del proceso de un reactor BWR	42
Ilustración 22. Modelo del sector eléctrico	47
Ilustración 23. Regiones de control del SEN	49
Ilustración 24. Composición por altitud y temperatura de la atmosfera	57
Ilustración 25. Diagrama de las sustancias químicas y procesos de transporte relacionados con la composición de la atmósfera	61
Ilustración 26. Representación esquemática de la remoción húmeda y la remoción seca de contaminantes	65
Ilustración 27. Esquema del efecto invernadero	69
Ilustración 28. Cambios de temperatura en el 2011 comparado con promedios 1950-1980	73
Ilustración 29. Relación entre el calentamiento global y el efecto invernadero	75
Ilustración 30. Etapas del análisis del ciclo de vida	92
Ilustración 31. Etapas del ciclo de vida de una planta nucleoelectrica	94
Ilustración 32. Cadenas energéticas por estado de agregación de combustibles	95
Ilustración 33. Esquema completo de un dínamo	149
Ilustración 34. Polos de un alternador	150
Ilustración 35. Esquema completo de un alternador	150
Ilustración 36. Ciclo Rankine	152
Ilustración 37. Ciclo Brayton	153
Ilustración 38. Ciclo Otto/ Diésel	154
Ilustración 39. Ciclo del carbono	155
Ilustración 40. Ciclo del nitrógeno	159
Ilustración 41. Ciclo del azufre	161

Ilustración 42. Ciclo del oxígeno	162
Ilustración 43. Ciclo del ozono	163
Ilustración 44. Ciclo hidrológico	165
Ilustración 45. Fases del Análisis de Ciclo de Vida	166

Índice de Tablas

Tabla 1. Potencial de calentamiento global	72
Tabla 2. Principales contaminantes emitidos por el uso de distintos combustibles fósiles.	77
Tabla 3. Intensidad de emisiones de ciclo de vida por tecnología	97
Tabla 4. Tecnologías con mayor participación en la generación eléctrica en el periodo 2015-2029	112
Tabla 5. Tasas de emisiones de GEI de las diferentes tecnologías de generación eléctrica	115

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Capacidad instalada del SEN por modalidad.	48
Gráfico 2. Producción mundial de energía primaria, 2013	76
Gráfico 3. Comparación de indicadores mundiales en materia socioeconómica, energética y ambiental.	79
Gráfico 4. Emisiones mundiales de los diferentes GEI.	80
Gráfico 5. Porcentaje del consumo anual por grupo de combustible en el mundo.	81
Gráfico 6. Producción de energía primaria nacional, 2014	88
Gráfico 7. Comparación de indicadores mexicanos en materia socioeconómica, energética y ambiental	89
Gráfico 8. Porcentaje del consumo anual por grupo de combustible en México	90
Gráfico 9. Comparación de emisiones totales por ciclo de vida de diferentes fuentes de energía y tecnologías.	98
Gráfico 10. Historial de generación por agrupación de tecnologías.	99
Gráfico 11. Participación de tecnologías en el total de energía eléctrica generada para el 2014.	100
Gráfico 12a. Emisiones por tipo de tecnología para el 2014.	101
Gráfico 13a. Evolución de adición de capacidad por grupo de tecnología.	103
Gráfico 14. Evolución de inversión por grupo de tecnología.	104
Gráfico 15. Inversión total por tipo de tecnología	105
Gráfico 16. Inversión por instalación de capacidad para cada tipo de tecnología.	106
Gráfico 17. Despliegue de costos por tecnología de generación eléctrica.	107
Gráfico 18a. Historial de la evolución de generación eléctrica por grupo de tecnología.	108
Gráfico 19. Evolución de generación eléctrica por tipo de tecnología.	110
Gráfico 20. Tasa de emisiones de metano por sector.	116
Gráfico 21. Tasa de emisión de metano por tipo de tecnología de generación eléctrica.	117
Gráfico 22. Historial y proyección de la emisión de metano del sector de generación eléctrica.	118
Gráfico 23. Tasa de emisiones de óxido nitroso por sector.	119
Gráfico 24. Tasa de emisión de óxido nitroso por tipo de tecnología de generación eléctrica.	119

Gráfico 25. Historial y proyección de la emisión de óxido nitroso del sector de generación eléctrica.	120
Gráfico 26. Tasa de emisiones de dióxido de carbono por sector.	121
Gráfico 27. Comparación de las tasa de emisión de los diferentes GEI emitidos por tipo de tecnología de generación eléctrica.	122
Gráfico 28. Historial y proyección de la emisión de dióxido de carbono del sector de generación eléctrica.	123
Gráfico 29. Comparación del historial y proyección de las emisiones de gases estudiados pertenecientes al sector de generación eléctrica.	124
Gráfico 30. Participación en el total de emisiones de GEI del sector de generación eléctrica en México.	125
Gráfico 31. Evolución de emisiones de GEI por tipo de tecnología.	128
Gráfico 32. Relación de emisiones de GEI por unidad de energía generada anualmente.	129
Gráfico 33. Mix de generación eléctrica, 2000.	130
Gráfico 34. Participación por tecnología en la emisión de GEI, 2000.	130
Gráfico 35. Mix de generación eléctrica, 2020.	131
Gráfico 36. Participación por tecnología en la emisión de GEI, 2020.	131
Gráfico 37. Mix de generación eléctrica, 2030.	133
Gráfico 38. Participación por tecnología en la emisión de GEI, 2030.	133

Resumen

Ante los inminentes problemas ocasionados por los efectos del cambio climático y el calentamiento global, es obligación de todas las economías poner en marcha programas y mecanismos que tengan la finalidad de contrarrestar los insumos que maximizan las consecuencias de estos fenómenos. Se ha comprobado que la operación de la empresa eléctrica en cualquier nación es uno de los factores que mayor relevancia tiene en cuanto a la calidad del aire se refiere, calidad que constantemente se encuentra en función a la cantidad de energía eléctrica que se consume.

Este trabajo profundiza en el tema de afectación al medio ambiente debido a la funcionalidad de las diversas tecnologías de conversión energética que se cuentan en las cada vez mayores centrales eléctricas, llegando a producir una proyección de emisiones atmosféricas en México para años posteriores.

En su desarrollo, ahonda en temas como la energía y los componentes que conforman las diferentes tecnologías que se encargan de su transformación, así como del modelo mexicano de generación en el primer capítulo. En el capítulo siguiente se habla sobre la contaminación ambiental y los impactos ambientales que el poner en funcionamiento una planta eléctrica conlleva, así como sobre las herramientas que el gobierno mexicano cuenta para limitar la emisión de contaminantes en su nación. En el último capítulo se analizan las emisiones de este sector, haciendo uso de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, la cual en los últimos años ha ido ganando mayor credibilidad y la cual fue necesaria para la realización de la prospectiva ambiental ante la meta nacional que la Ley General de Cambio Climático establece.

Nomenclatura, acrónimos y siglas

Ácido Nítrico	HNO ₃
Ácido Sulfhídrico	H ₂ S
Ácido Sulfúrico	H ₂ SO ₄
Amoniaco	NH ₃
Amonio	NH ₄ ⁺
Balance Nacional de Energía	BNE
Centro Nacional de Control de Energía	CENACE
Certificados de Energía Limpia	CEL
Clorofluorocarbonos	CFC
Comisión para la Cooperación Ambiental	CCA
Comisión Federal de Electricidad	CFE
Comisión Reguladora de Energía	CRE
Compuestos Orgánicos Volátiles	COVs
Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático	CMNUCC
Di-metilsulfuro	(CH ₃) ₂ S
Dióxido de Azufre	SO ₂
Dióxido de Carbono	CO ₂
Dióxido de Carbono Equivalente	CO ₂ eq.
Entidades Responsables de Carga	ERC
Evaluación del Impacto Ambiental	EIA
Gases de Efecto Invernadero	GEI

Hidrocarburos	HC
Hidrofluorocarbonos	HFC
Índice Metropolitano de la Calidad del Aire	IMECA
Instituto Central de Investigación de la Industria Eléctrica	CRIEPI
Julio o Joule	J
Kilowatt-hora	kWh
Ley de la Industria Eléctrica	LIE
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente	LGEEPA
Manifiesto de Impacto Ambiental	MIA
Mercado Eléctrico Mayorista	MEM
Metano	CH ₄
Miles de Watts	kW
Millones de Watts	MW
Monóxido de Carbono	CO
Monóxido de Nitrógeno	NO
Nitrato de Amonio	NH ₄ NO ₃
Nitratos	NO ₃
Nitritos	NO ₂ ⁻
Nitrógeno Molecular	N ₂
Normas Oficiales Mexicanas	NOM
Organización Internacional para la Estandarización	ISO
Óxido Nitroso	N ₂ O

Óxidos de Azufre	SOx
Óxidos de Nitrógeno	NOx
Ozono	O ₃
Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico de Costos	COPAR
Protocolo de Kioto	PK
Partículas Suspendidas Totales	PM
Perfluorocarbonos	PFC
Peroxiacetil-nitrato	PAN
Plomo	Pb
Producto Interno Bruto	PIB
Productores Independientes de Energía	PIE
Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional	PRODESEN
Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico	POISE
Radical Hidroxilo	OH-
Reactor Nuclear de Agua Hirviente	BWR
Reactor Nuclear de Agua Presurizada	PWR
Secretaría de Energía	SENER
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales	SEMARNAT
Sistema Eléctrico Nacional	SEN

Sistema Internacional de Unidades	SI
Sulfato de Amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
Sulfatos	SO_4
Sulfuro de Hidrógeno	SH_2
Sulfuro Hexafluorido	SF_6
Vatio o Watt	W
Zona Metropolitana del Valle de México	ZMVM

Introducción

El progreso de las sociedades modernas ha estado condicionado por el aprovechamiento y producción de la energía, convirtiéndose en un elemento simbiótico y consustancial al desarrollo de la humanidad. Con base en el desarrollo de tecnologías, es posible afirmar que el grado de avance de una sociedad es proporcional al desarrollo de la energía en general, y, en particular, de la electricidad.

La electricidad es una de las principales formas de energía empleadas en el mundo. Actualmente nos proporciona grandes beneficios, tales como el funcionamiento de ciertos tipos de transportes y de aparatos electrodomésticos necesarios diariamente en el hogar. En la industria es indispensable para el desarrollo de servicios y procesos al ser fundamental para la operación de máquinas de todo tipo, sin mencionar su gran utilidad para la iluminación y calefacción de espacios, y su requerimiento es básico en el área educativa y de entretenimiento. Sin ella, difícilmente podríamos imaginarnos los niveles de progreso que el mundo ha alcanzado, por lo cual, se podría decir que ha sido hasta hoy el instrumento más viable en la generación de procesos de producción de bienes y servicios para el progreso humano (Roldán, 2013).

Hoy por hoy la forma más usual de procesar electricidad, así como de generar energía térmica y de poner en funcionamiento la mayoría de los transportes a nivel mundial, es quemando combustibles fósiles como el carbón, gas natural o petróleo. El resultado del uso dominante de estos combustibles ha traído como consecuencia el incremento desmedido de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), y con ello el aumento alarmante de los problemas que conlleva el fenómeno del cambio climático y del calentamiento global.

Debido al incremento de la economía, al igual que en otros países del mundo, en México aumenta día con día la demanda eléctrica. Ante esta situación y considerando las necesidades del desarrollo de la sociedad, los avances tecnológicos y el aumento del costo de los hidrocarburos entre otros factores que

se suman a la dinámica actual del mercado energético, el hombre está empezando a optar por el uso de energías limpias para satisfacer sus requerimientos básicos, con la finalidad de volver su presencia más amigable con el medio ambiente y tratar de revertir los efectos de estos fenómenos. El sector energético en México es necesario para presentar una oportunidad estratégica que eleve el crecimiento económico y que mejore las condiciones socioeconómicas de la población. Al respecto, el gobierno contribuye a continuar con su crecimiento y optimizar el ingreso de los recursos necesarios para producir energía eléctrica de forma sustentable y a precios accesibles, a fin de asegurar el abasto de la economía nacional (Fernández de la Garza et al., 2009).

Todas las tecnologías de producción eléctrica a gran escala afectan de alguna manera al ambiente. Las características y la cantidad de las emisiones contaminantes procedentes de la generación de energía eléctrica dependen del combustible empleado y de la tecnología de conversión. Desde la inclusión voluntaria de México a las obligaciones del Protocolo de Kioto, siempre se han buscado medidas para reducir emisiones atmosféricas en todas las áreas aplicables, haciéndolas específicamente rigurosas en el sector de generación eléctrica. Las proyecciones de emisiones de GEI pueden cambiar dependiendo de las políticas energéticas y leyes que se apliquen. Dado el compromiso de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero derivados de la quema excesiva de combustibles fósiles y con el objetivo de disminuir la dependencia energética de los mismos, es imperante definir un plan energético nacional, el cual debe prever, por un lado, la intensificación de las medidas de ahorro y de uso eficiente de energía, y, por el otro, el revalorar la sustentabilidad que los diferentes modelos de generación eléctrica envuelven, con el fin de abastecer los requerimientos de consumo energético de la sociedad sin presentar un impacto ambiental de gran magnitud que afecte a la misma (Zuk et al, 2006).

Con el fin del ciclo operativo y desmantelamiento de diversos sistemas de generación de energía eléctrica, es necesaria la programación de construcción y puesta en marcha de nuevas plantas para asegurar la entrega de la demanda

máxima energética. Para ello, es la Secretaría de Energía (SENER), quien es el organismo encargado de la política energética al desarrollar y gestionar la planeación de los sistemas de generación eléctrica, ha emitido documentos como el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) y la Prospectiva del Sector Eléctrico, aunados al Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico (POISE), los tres con un alcance del 2015 al 2029, con el fin de informar a las diferentes instituciones de los proyectos por venir.

Con el fortalecimiento del Sector Eléctrico, el cual es parte de la SENER y es el encargado de la generación transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica, mediante la modernización de las plantas de generación y las redes de transmisión y distribución, no sólo se democratizará el acceso a la electricidad, también se reducirán las brechas económicas regionales buscando la integración eficiente del territorio nacional y reflejando un mayor dinamismo económico e industrial, comercial, agropecuario y de servicios.

Tras la Reforma Energética, el Sector Eléctrico presenta una nueva estructura que se considera dentro de la planeación a mediano y largo plazo. El nuevo sistema eléctrico traerá mayores inversiones, impulsará la creación de nuevos empleos, se tendrán tarifas más accesibles para los hogares e industrias y oportunidades de desarrollo empresarial, además de fomentar la transición hacia un sector más responsable con el medio ambiente (KPMG, 2015).

Este trabajo tiene como principal objetivo el evaluar la planificación energética propuesta por la SENER tomando como primordial referente la meta aspiracional del segundo artículo transitorio de la Ley General de Cambio Climático, la cual consiste en reducir al año 2020 un treinta por ciento de emisiones con respecto a la línea de base, así como un cincuenta por ciento de reducción de emisiones para el 2050 en relación con las emitidas en el año 2000.

Para lograr dicho objetivo, este trabajo estará específicamente sustentado por los proyectos y documentos de inversión del sector energético mexicano, junto con las leyes y normas internacionales y nacionales aplicables. El cálculo y evaluación de

las emisiones de contaminantes atmosféricos serán medidas a través de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida en dióxido de carbono equivalente por generación en kilowatt-hora, unidad de medida que permite homologar el impacto ambiental atmosférico, útil para comparar y evaluar los diferentes impactos ambientales que conlleva la operación de las centrales planeadas (European Commission, 1995).

La finalidad de este trabajo es apoyar la premisa del desarrollo sostenible:

“Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes, sin comprometer las posibilidades de las del futuro, para atender sus propias necesidades.”

Y dar una aproximación de generación de estos contaminantes, emitidos exclusivamente por el sector energético, los cuales son originados en todo el ciclo de vida del parque eléctrico planeado en el periodo 2015-2029. Con ello se logrará asegurar que el cumplimiento de los diferentes modelos y plantas de generación eléctrica llegarán a satisfacer la demanda máxima eléctrica y el menor impacto ambiental, relacionándose, así, directamente con el costo mínimo por instalación de capacidad de generación.

Capítulo 1. La Energía Eléctrica

La energía es un concepto abstracto que, inicialmente y de forma muy simple, se podría definir como la capacidad que posee todo cuerpo para ejecutar un trabajo a causa de su posición (energía potencial), de su constitución (energía interna) o de su movimiento (energía cinética). Por lo tanto, el realizar un trabajo implica la manifestación y uso de energía, siendo de esta forma accesible su medición. Si por el contrario se realiza un trabajo sobre un cuerpo y éste almacena la energía, entonces la medida del trabajo realizado es el valor de la energía que permanece de forma latente en el cuerpo, por todo ello, la energía liberada o acumulada tendrá las mismas unidades de trabajo¹. En el Sistema Internacional de Unidades (SI), la unidad de trabajo y de energía es el Julio (o Joule) definido como el trabajo realizado por la fuerza de un Newton cuando desplaza su punto de aplicación un metro.

La energía tiene cuatro propiedades básicas:

- La energía no se crea, sólo se transforma, siendo durante esta transformación cuando se manifiestan sus diferentes formas.
- Se conserva. Permanece constante cuando se transfiere de un cuerpo a otro o cuando una forma de energía se transforma en otra, ya que la energía no se destruye.
- Se transfiere. La energía puede cederse de un cuerpo a otro en tres diferentes formas:
 - Trabajo. Cuando se realiza un trabajo a un cuerpo que cambia de posición.
 - Ondas. Como propagación de perturbaciones de ciertas características, como el campo eléctrico, el magnetismo o la presión.
 - Calor. Se manifiesta cuando se transfiere energía de un cuerpo caliente a otro más frío, ya sea por conducción (vibración intermolecular),

¹ Foronuclear.org. (2007). *222 Cuestiones sobre la Energía*. [online] Disponible en: <http://www.foronuclear.org/es/222-cuestiones-sobre-la-energia> [Consultado 28 Mar. 2016].

radiación (a través de ondas electromagnéticas) o convección (específica para fluidos que poseen un movimiento macromolecular).

- Se degrada. Durante la generación específica de una energía siempre se tendrá una pérdida en cualquier otra forma de energía, diferente a la inicial.

El concepto de energía fue inventado en el siglo XIX para describir cuantitativamente una gran variedad de fenómenos, siendo la energía en sus múltiples transformaciones la responsable del brillo del sol, de los movimientos de los planetas, así como del crecimiento de las plantas, de la evolución de los animales y del desarrollo de las civilizaciones². Según la forma o el sistema físico en que se manifiesta, se consideran diferentes formas de energía como la térmica, mecánica, eléctrica, química, electromagnética, nuclear, luminosa, entre otras.

La energía eléctrica es un caso particular de la energía electromagnética y es la que se manifiesta cuando un cuerpo cargado eléctricamente realiza un trabajo debido a su movimiento y/o posición dado una diferencia de potencial entre dos puntos, esto ocurre cuando estos puntos son puestos en contacto mediante un conductor eléctrico, obteniéndose de esta manera una corriente eléctrica o, físicamente dicho, un flujo de electrones. En nuestros hogares podemos observar la manifestación de esta energía diariamente cuando encendemos un foco. Cuando el foco es puesto en contacto con el conductor eléctrico conectado al interruptor y éste permite el paso del flujo de electrones, lo que observamos es la conversión de energía calorífica en energía luminosa. Esto pasa por el calentamiento del filamento del foco hecho de tungsteno, el flujo de electrones choca constantemente con los átomos de este elemento, haciendo que se calienten (de energía cinética a energía calorífica) y excitando temporalmente sus electrones, obligándolos a aumentar sus niveles energéticos. Al regresar a su estado fundamental los electrones liberan el exceso de energía en forma de fotones percibibles por el ojo humano³.

² Digitales.DGSCA-UNAM, C. (2016). *Energía*. [online] Revista.unam.mx. Disponible en: <http://www.revista.unam.mx/vol.1/num2/art2/> [Consultado 27 Mar. 2016].

³ Masini Aguilera, Francisco Javier, (2014). *Análisis de Funciones, ¿Cómo funciona un foco Incandescente?* [vídeo] Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=2_ipDw-Ug04 [Consultado 27 Mar. 2016].

1.1 Historia de la Generación Eléctrica



Ilustración 1. Eolípila de Herón.
Fuente. <https://es.wikipedia.org/wiki/Eolípila>, 2016.

El aprovechamiento de la energía eléctrica empieza con la creación de la máquina de vapor, su desarrollo se origina en los tiempos de la antigua Alejandría, cuando Herón de Alejandría inventó la eolípila⁴ (Ilustración 1)⁵.

La evolución de los ingenios operados con vapor continuó a lo largo del tiempo hasta el siglo 17 – 18 cuando hubo un aumento significativo gracias a las aportaciones de Thomas Newcomen, “el padre de la revolución industrial”, al crear en 1712 la primera máquina de vapor atmosférica (Ilustración 2), la cual fue usada para drenar agua de las minas de

carbón, hierro y otros metales en el suroeste de Inglaterra. Esta máquina fue el primer motor capaz de convertir la energía potencial del flujo de vapor en energía mecánica⁶.

A pesar de ser más eficiente y barato que el trabajo desarrollado por animales, este motor tenía sus limitaciones. Su mayor problema era la cantidad de combustible (carbón) que consumía, siendo su eficiencia contraproducente para su finalidad en la extracción del mismo mineral. Al notar este problema, en 1763, James Watt realizó mejoras y construyó un motor que incluía una cámara separada de condensados, dándole la capacidad al motor de

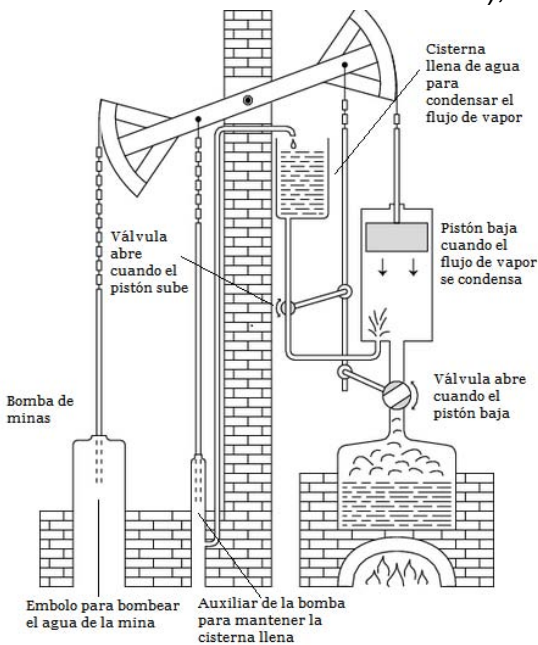


Ilustración 2. Máquina atmosférica de Newcomen.

Fuente. <https://jomariemayo.files.wordpress.com/>, 2015.

⁴ Artefacto que consiste en una esfera hueca con boquillas conectada a una caldera llena con agua hirviendo, debido al diminuto diámetro de las boquillas y la presión ejercida por el vapor, la esfera giraba rápidamente, la finalidad única de esta máquina era entretener.

⁵ Bellis, Mary. (2016). *The History of Engines - How Steam Engines Work*. [online] Disponible en: <http://inventors.about.com/library/inventors/blenginehistory.htm> [Consultado 17 Mar. 2016].

⁶ Bellis, Mary. (2015). *The Industrial Revolution – The Beginning of the Modern age*. [online] Disponible en: <https://jomariemayo.wordpress.com/2015/01/19/the-industrial-revolution-the-beginning-of-the-modern-age/> [Consultado 14 Mar. 2016].

trabajar continuamente. También modificó las dimensiones del ingenio, aumentando significativamente su eficiencia⁷. Fueron las mejoras de Watt las que abrieron las puertas a la invención de las locomotoras operadas con vapor, y con ello, la creación del ferrocarril⁸.

En reconocimiento a las importantes aportaciones de James Watt en la Revolución Industrial, el SI nombró a la unidad de potencia con su apellido: Watt (o Vatio), el cual es equivalente a un joule por segundo y mide el trabajo realizado por un sistema en un periodo de tiempo, también se define como la variación de energía registrada en el tiempo de utilización de una máquina cuando se refiere a un proceso, cual sea el caso. Esta unidad hace referencia a la rapidez con que se transforma la energía⁹.

Más convenientes que el sol y el viento, y menos costosas que un establo lleno de caballos, las máquinas de vapor se volvieron rápidamente necesarias para el transporte de materia prima, el funcionamiento de fábricas y los requerimientos granjeros. Fue hasta 1882 cuando se usó un motor de vapor alimentado con carbón en la puesta en marcha de la primera planta de generación eléctrica en Pearl Street, Nueva York, permitiéndole a Thomas Edison iluminar por primera vez Wall Street y el edificio de New York Times⁶.

Después de varios experimentos e instalando pequeños sistemas eléctricos en 1880 y 1881, Edison instaló la planta de Pearl Street Station, la cual consistía principalmente en un sistema de dínamos¹⁰ operados con motores de vapor, fusibles de seguridad y equipos de regulación.

⁷ Union of Concerned Scientists. (2016). *A Short History of Energy*. [online] Disponible en: http://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energy-choices/a-short-history-of-energy.html#.Vviw_eJ97Gh [Consultado 27 Mar. 2016].

⁸ Custom-qr-codes.net. (2016). *Transportation History: The Steam Locomotive*. [online] Disponible en: <http://www.custom-qr-codes.net/history-steam-locomotive.html> [Consultado 15 Mar. 2016].

⁹ Op. Cit. Digitales.DGSCA-UNAM, C. (2016). *Energía*. [online] Revista.unam.mx. Disponible en: <http://www.revista.unam.mx/vol.1/num2/art2/> [Consultado 27 Mar. 2016].

¹⁰ Hoy en día llamados generadores, los dínamos son máquinas capaces de convertir un flujo magnético en electricidad mediante el movimiento de un conductor a través de un par de imanes, este fenómeno es posible gracias a la inducción electromagnética y la finalidad de este proceso es la generación de una corriente continua.

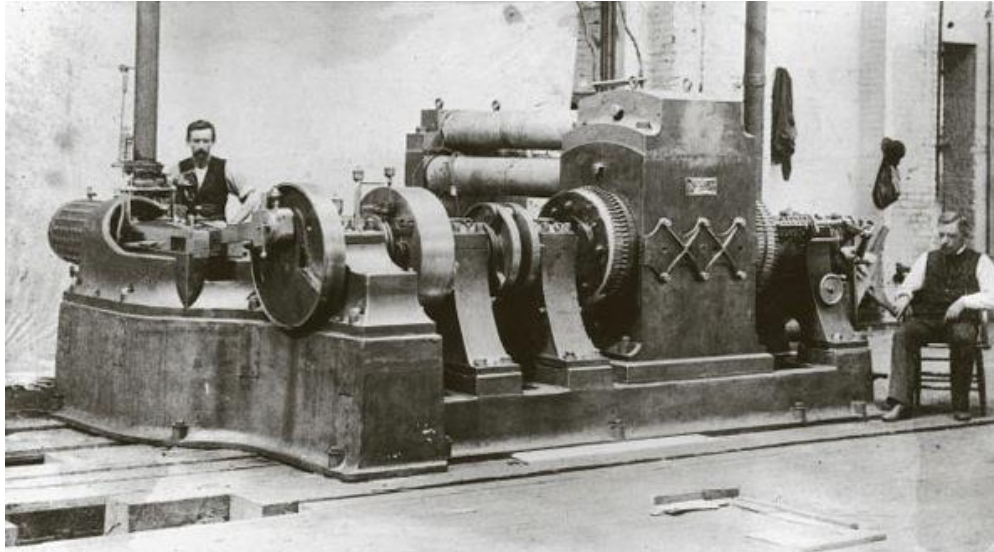


Ilustración 3. Primer dínamo usado en la estación Pearl Street.
Fuente. <https://electrocrew.files.wordpress.com>, 2012.

Una de las características más distintivas de la planta de Pearl Street es que no sólo fue la primera en producir electricidad, también fue la primera planta de cogeneración¹¹. Mientras los motores eléctricos trabajaban y se usaba agua para su enfriamiento, ésta generaba vapor, el cual era distribuido a las plantas manufactureras cercanas brindándoles calefacción¹².

Durante la puesta en marcha de Pearl Street, también en 1882, se instaló y empezó operación la primera planta hidroeléctrica: “Vulcan Street Plant” (Ilustración 4) en Appleton, Wisconsin. El responsable de este proyecto fue H. J. Rogers, quien inspirado por las ideas de Tomas Edison explotó el área de oportunidad representada por el trabajo



Ilustración 4. Vulcan Street Plant.
Fuente. americaslibrary.gov, 2016.

¹¹ La cogeneración se define como la producción secuencial de energía eléctrica y de energía térmica aprovechable en los procesos industriales y comerciales a partir de la misma fuente combustible.

¹² Engineering and Technology History Wiki. (2016). *Pearl Street Station - Engineering and Technology History Wiki*. [online] Disponible en: http://ethw.org/Pearl_Street_Station [Consultado 16 Mar. 2016].

ejercido por las aguas rápidas del Río Fox, cambiando de esta forma la finalidad del río de triturar granos a impulsar generadores eléctricos para producir electricidad suficiente para autoabastecer a esta planta e iluminar el hogar de Rogers junto a algunos edificios cercanos¹³.

Ante el éxito de Vulcan Street Plant y Pear Street Station, la ciudades de Estados Unidos no tardaron en construir más plantas de generación eléctrica, explotando las tecnologías de uso de carbón e hidrológicas. Las líneas eléctricas se extendieron por todo el país, llegando a dar electricidad a las zonas más rurales y con ello a disminuir el costo de la misma. Fue hasta finales del siglo XIX cuando el petróleo empezó a llamar la atención como una nueva fuente de energía y fue en los inicios del Siglo XX ante la creación del motor de combustión interna cuando se empezó a procesar el petróleo en gasolina y con ello el inicio de su explotación masiva.

Después de la Segunda Guerra Mundial y con los adelantos en las ciencias nucleares, en su discurso del 8 de Diciembre de 1953 Dwight D. Eisenhower, expresidente estadounidense, dio a conocer una nueva tecnología de generación eléctrica, a la que introdujo con el título “Atoms for peace”, permitiendo a la empresa nuclear ser parte del sector energético. Esto se vio reflejado en la construcción de más de 200 centrales nucleares a lo largo de Estados Unidos, haciendo aún más barato el precio de la electricidad y abriendo la puerta a nuevas formas de producción eléctrica⁶.

Para la década de 1970, fue la primera crisis del petróleo quien dio la oportunidad a las “energías verdes” —solar, eólica, geotérmica, entre otras— de cobrar fuerza, al ser renovables y su captación no necesitaba de un proceso de tratamiento ni una fuerte inversión. Los gobiernos siguieron apostando a sus evoluciones cuando la crisis ambiental empezó a representar un efecto contra la sociedad y fue entonces cuando nuevas generaciones de tecnología de conversión eléctrica empezaron a

¹³ Library Of Congress. (2016). *The World's First Hydroelectric Power Plant Began Operation*. [online] Disponible en: http://www.americaslibrary.gov/jb/gilded/jb_gilded_hydro_1.html [Consultado 16 Mar. 2016].

tomar lugar, dando como resultado a la combinación de las diferentes fuentes de energía que cubren el suministro eléctrico en todo el mundo.

Historia de la Generación Eléctrica en México

En el caso de México la generación de energía eléctrica inició a fines del siglo XIX, cuando se instaló la primera planta generadora alimentada con carbón en 1879, la cual se localizó en León, Guanajuato y su principal objetivo fue el surtir eléctricamente a la fábrica textil “La Americana”¹⁴. Al ser un éxito eminente y siendo notoria su capacidad de facilitación en las actividades desarrolladas diariamente, en los siguientes años su necesidad casi inmediatamente se volvió básica en los sectores minero y de iluminación residencial y pública, dando como resultado el inicio de la prestación del servicio de alumbrado público en 1881 por la compañía de origen canadiense “The Mexican Light and Power Company”, localizada en el centro del país y la cual hacía uso de una central termoeléctrica con una capacidad de 2,240 kW¹⁵.

Para 1889 se habían terminado las obras para aprovechar las aguas del Río Batopilas, con objetivo de generar energía para las instalaciones de la explotación minera. Alejandro R. Shepard fue el responsable del proyecto y fue quien acopló a los molinos de trituración dos generadores eléctricos, los cuales funcionaban a partir de turbinas hidráulicas de 15 caballos de fuerza. La electricidad generada se extendió por redes de distribución hacia mercados urbanos y comerciales donde la población tenía mayor capacidad adquisitiva¹⁶.

Durante el régimen de Porfirio Díaz fueron instaladas y puestas en funcionamiento más de 177 centrales eléctricas dentro del territorio nacional, las cuales se

¹⁴ Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM, S. (2005). *Invalidez de las Reformas Hechas por el Ejecutivo Federal al Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica*. 1st ed. [ebook] México DF, pp.15-17. Disponible en: <http://biblio.juridicas.unam.mx/libros/4/1730/4.pdf> [Consultado 21 Mar. 2016].

¹⁵ Covarrubias Cortes, C. (2002). *Automatización de sistemas administrativos en tiempo real en el manejo del procedimiento de cuentas de enlace en la Comisión Federal de Electricidad*. Universidad de Sonora (UNISON).

¹⁶ Braun, Eliezer. (1992). *XXIII. La Electricidad En México*. [online] Disponible en: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/112/htm/sec_25.htm [Consultado 18 Mar. 2016].

localizaban por fines lucrativos en las cercanías de las ciudades que tenían la capacidad de pagar este tipo de servicio, tales como: la Ciudad de México, Campeche, Guadalajara, Guanajuato, entre otras¹⁷. También se otorgó al sector eléctrico el carácter de servicio público, colocándose las primeras 40 lámparas "de arco" en el actual Zócalo de la Ciudad de México, cien más en la Alameda Central y comenzó la iluminación de la entonces calle de Reforma y de algunas otras vías de la Capital de México¹⁸.

La creciente necesidad eléctrica en México atrajo más compañías internacionales a invertir en este servicio al crear múltiples dependencias como el consorcio "The American and Foreign Power Company", el cual contaba con tres sistemas interconectados en el norte de México. Por su parte, la Compañía Eléctrica de Chapala se encargaba de suministrar electricidad al occidente del país.

A inicios del siglo XX, México contaba con una capacidad de 31 MW, propiedad de empresas privadas. Para 1910 eran 50 MW, de los cuales 80% los generaba The Mexican Light and Power Company, compañía que en 1905 bajo el liderazgo de Fred Stark Pearson había terminado y puesto en operación el primer gran proyecto hidroeléctrico mexicano en los ríos de la región de Huauchinango (ríos Necaxa, Tenango, Xaltepuxtla y sus afluentes), haciéndolo conveniente debido a la precipitación de los mismos por su cercanía a los acantilados de la región. El proyecto consistió en la instalación de seis unidades con una capacidad instalada de 31,500 MW. Este proyecto fue un parteaguas en la construcción de nuevas plantas dentro del territorio nacional, obligando a las tres compañías eléctricas que en aquel tiempo tenían las concesiones e instalaciones de la mayor parte de las plantas en México a buscar mejores formas de gestionar la explotación de los recursos en las regiones donde predominaba su quehacer¹⁷.

¹⁷ Op. Cit. Library Of Congress. (2016). *The World's First Hydroelectric Power Plant Began Operation*. [online] Disponible en: http://www.americaslibrary.gov/jb/gilded/jb_gilded_hydro_1.html [Consultado 16 Mar. 2016].

¹⁸ Op. Cit. Engineering and Technology History Wiki. (2016). *Pearl Street Station - Engineering and Technology History Wiki*. [online] Disponible en: http://ethw.org/Pearl_Street_Station [Consultado 16 Mar. 2016].

Debido a las constantes interrupciones de luz, las tarifas elevadas y la exclusión de comunidades rurales de este servicio, el gobierno federal creó en 1937 la Comisión Federal de Electricidad (CFE), que tendría por objetivo organizar y dirigir un sistema nacional de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, basado en principios técnicos y económicos, sin propósitos de lucro y con la finalidad de obtener un costo mínimo y mayor rendimiento en beneficio de los intereses generales. Esta comisión comenzó a construir plantas generadoras y ampliar las redes de transmisión y distribución, logrando en 1938 tener una capacidad de 64 kW, misma que, en ocho años, aumentó hasta alcanzar 45,594 kW.

Cuando las compañías privadas dejaron de invertir, la CFE se vio obligada a generar energía para que éstas la distribuyeran en sus redes, mediante la reventa.

A pesar de los esfuerzos de generación y electrificación, para 1960 apenas 44% de la población contaba con electricidad. Para dar solución, el 27 de Septiembre de ese mismo año el presidente Adolfo López Mateos decidió nacionalizar la industria eléctrica, dando inicio a la integración del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), extendiendo la cobertura del suministro y acelerando la industrialización. La CFE, por su parte, definió y unificó los criterios técnicos y económicos del SEN, normalizando los voltajes de operación, con la finalidad de estandarizar los equipos, reducir sus costos y los tiempos de fabricación, almacenaje e inventariado, unificando las frecuencias de todas las centrales eléctricas a 60 Hertz.

A inicios del año 2000 se tenía ya una capacidad instalada de generación de 35,385 MW, cobertura del servicio eléctrico del 94.70% a nivel nacional, una red de transmisión y distribución de 614,653 km y más de 18.6 millones de usuarios, incorporando casi un millón cada año¹⁹.

¹⁹Comisión Federal de Electricidad (2016). *CFE y la electricidad en México*. [online] Disponible en: http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/CFE_y_la_electricidad_en_Mexico/Paginas/CFEylaelectricidadMexico.aspx [Consultado 17 Mar. 2016].

Para estos años en México, la CFE ya había instalado y puesto en marcha proyectos de energías renovables como la Planta de energía geotérmica Cerro Prieto²⁰ en 1973, la Central Nucleoeléctrica “Laguna Verde”²¹, la cual empezó a operar en 1990 y el parque eólico “La Ventosa” en Oaxaca en 1994²², dando inicio a una generación eléctrica más diversa y sustentable, haciéndola más competitiva internacionalmente, la cual atribuye actualmente el 18.5%²³ de la energía que se consume nacionalmente y se encuentra en aras de expansión ante lo propuesto en la Reforma Energética del 2014.

Actualmente el resultado del conjunto de acciones de planeación y su ejecución, se reflejan al asegurar que el 98.4% de la población mexicana cuente con energía eléctrica, esto significa proveer de electricidad a 119.9 millones de habitantes, y con una infraestructura de 190 centrales generadoras de CFE, equivalente a 41,516 megawatts (MW) en capacidad efectiva²⁴.

1.2 La Generación de la Energía Eléctrica

La energía eléctrica se produce y distribuye mediante sistemas eléctricos, los cuales son un conjunto de elementos que operan de forma coordinada en un determinado territorio para satisfacer la demanda de energía eléctrica de los consumidores, garantizando de esta forma su disponibilidad. La ubicación de estos sistemas se determina tomando en cuenta la cercanía con las poblaciones que tienen una mayor demanda, las zonas con mayor riqueza en ciertos tipos de fuentes de energía, la aproximación entre otros sistemas eléctricos y en algunos casos, con los requerimientos para garantizar la seguridad de su operación.

²⁰ González González, M. (2010). *Geotermia Como Alternativa Energética En México, ¿Es Realmente Viable?* [ebook] Los Humeros, Puebla México. Disponible en: <http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/treMiguelGG09.pdf> [Consultado 28 Mar. 2016].

²¹ Energía Nuclear. (2016). *Energía nuclear en México*. [online] Disponible en: http://energia-nuclear.net/situacion/energia_nuclear_mexico.html [Consultado 28 Mar. 2016].

²² Suplementos Corporativos. (2010). *Primeros pasos de la energía eólica en México, Parques Eólicos*. [online] Disponible en: <http://www.parqueseolicosonline.com/2010/02/primeros-pasos/> [Consultado 28 Mar. 2016].

²³ Secretaría de Energía (SENER), (2015). *Balance Nacional de Energía (BNE) 2014*. México.

²⁴ Secretaría de Energía (SENER), (2015). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2015-2029*. México.

Los sistemas eléctricos se conforman de la siguiente manera:

- Centros o plantas de generación eléctrica. Son las instalaciones destinadas a aprovechar las distintas fuentes de energía (o energéticos) mediante la conversión energética de las mismas. Esto se logra a través de las diversas tecnologías de generación eléctrica. Algunos ejemplos son: centrales nucleares, hidroeléctricas, de ciclo combinado, parques eólicos, etc.
- Redes de tensión. Encargadas de transportar grandes cantidades de energía:
 - De muy alta tensión. Son alimentadas por las centrales generadoras y son las que abastecen a los sistemas de subtransmisión. Transportan magnitudes de 230kV a 400 kV.
 - De subtransmisión o líneas de alta tensión. Suministran energía a las redes de media tensión (69 kV a 161 kV).
 - De media tensión. Líneas encargadas de distribuir energía dentro de zonas geográficas relativamente pequeñas. Suministran energía a las líneas de baja tensión y transportan voltajes de 2.4 kV a 60 kV.
 - De baja tensión. Son las líneas usadas para llevar electricidad a los usuarios de bajo consumo.
- Estaciones transformadoras o subestaciones. Son las encargadas de ajustar el voltaje entre líneas de diferentes tensiones para que el transporte de electricidad sea factible.
- Centro de control eléctrico. Instalaciones que tienen el objetivo de gestionar la capacidad de generación y transporte de energía.

Fuentes de Energía

Una fuente de energía es todo sistema natural o artificial cuyo contenido energético es susceptible a ser transformado física o químicamente con el objetivo de obtener energía eléctrica. Industrialmente son explotadas como combustibles en las distintas tecnologías de generación, logrando con ello cumplir con fines económicos y sociales. Las fuentes energéticas más valoradas son aquellas que logran una mayor conversión energética, para ello la energía que se encuentra en ellas debe

de estar muy concentrada; en otras palabras, mucha energía por unidad de masa²⁵. En México las principales fuentes explotadas de energía según el Balance Nacional de Energía (2014) son:

Carbón

Mineral sedimentario de color negro, muy rico en carbono y con cantidades variables de otros elementos como hidrógeno, azufre, oxígeno y nitrógeno. Arde fácilmente y es uno de los combustibles fósiles más utilizados. Proviene de la degradación a altas condiciones de presión y temperatura de componentes orgánicos acumulados en zonas pantanosas, lagunares o marinas, de poca profundidad, cubiertas o sepultadas por sedimentos²⁶. El carbón puede categorizarse en:

- Coquizable: carbón con bajo contenido de cenizas, característica que favorece la generación de coque de carbón cuando se somete un proceso de destilación destructiva (a altas temperaturas en ausencia de aire).
- No coquizable: carbón con alto contenido de cenizas y finos, de flama larga adecuado para su empleo en la generación eléctrica.

Petróleo

Líquido aceitoso de color café oscuro que se presenta como un fluido viscoso formado por restos enterrados de animales y plantas existentes hace millones de años. Las condiciones de calor y presión de esas capas permitieron su producción. Esta fuente de energía se encuentra almacenada en yacimientos subterráneos naturales.

Gas Natural

Mezcla de hidrocarburos parafínicos ligeros con el metano como su principal constituyente. También contiene pequeñas cantidades de etano y propano, así como proporciones variables de compuestos inorgánicos, tales como nitrógeno,

²⁵ Op Cit. Foro Nuclear. (2016). *222 Cuestiones sobre la Energía*. [online] Disponible en: <http://www.foronuclear.org/es/222-cuestiones-sobre-la-energia> [Consultado 28 Mar. 2016].

²⁶ Servicio Geológico Mexicano (2016). *¿Qué es el carbón mineral?* [online] Disponible en: http://www.sgm.gob.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=167&Itemid=126 [Consultado 22 Mar. 2016].

dióxido de carbono y ácido sulfhídrico. El gas natural puede encontrarse asociado con el petróleo o independiente en pozos de gas no asociado o gas seco y es enviado a plantas de acondicionamiento, en donde se obtienen productos comerciales como gas seco, gas licuado de petróleo, nafta y etano.

Nucleoenergía

Es la energía contenida en el núcleo de un átomo y es la responsable de mantener unidas a las partículas que lo componen (neutrones y protones). Esta energía puede ser eléctricamente útil mediante dos procesos:

- Fusión nuclear. Es la reacción nuclear en la que dos núcleos de átomos ligeros, en general el hidrógeno y sus isótopos (deuterio y tritio), se unen para formar otro núcleo más pesado, siendo esto posible al absorber y después liberar grandes cantidades de energía emitidas por rayos gamma, entre otros. Así es como el Sol produce energía.
- Fisión nuclear. Es la reacción en la cual un núcleo pesado es bombardeado con neutrones, después de un pequeño tiempo este átomo se vuelve inestable y termina por descomponerse en dos o más cuyos tamaños son del mismo orden de magnitud y la emisión de dos o tres neutrones. Se sabe que la suma de las masas de los átomos producidos y la de los neutrones desprendidos es menor que la masa del átomo original. De acuerdo con la Teoría de la Relatividad de Einstein la masa faltante se transforma en grandes cantidades de energía expresada en calor. Actualmente éste es el proceso usado en las centrales nucleares para la producción de electricidad.

El combustible usado para el aprovechamiento de este tipo de energía es el mineral de uranio, después de pasar por un proceso de purificación y enriquecimiento.

Hidroenergía

Energía aprovechada mecánicamente por la fuerza de un caudal hidráulico (energía cinética y potencial de los saltos, las mareas y las corrientes de agua). Esta energía está basada en la energía solar que permite la conformación del ciclo hidrológico.

Geoenergía

Energía en forma de calor que, desprendido desde el interior de la tierra, puede ser aprovechada energéticamente.

Eoloenergía

Fuente de energía que utiliza la energía cinética del viento. La eoloenergía es una forma indirecta de energía solar, puesto que son las diferencias de temperatura y presión de la atmósfera las que ponen en movimiento los vientos.

Bioenergía

Combustible conformado únicamente por materia orgánica susceptible de ser aprovechada energéticamente, originada de un proceso biológico espontáneo o provocado, y puede agruparse de forma general en agrícola o forestal. También puede provenir de orígenes sintéticos como la materia orgánica de las aguas y lodos residuales, así como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Ejemplos de biomasa son el estiércol granjero, el bagazo de caña y la leña, entre otros.

Biogás

Gas compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono, producidos por la digestión anaeróbica de la biomasa, compuesto por:

- Gas de relleno sanitario, formado por la digestión de los residuos vertidos.
- Gases de los lodos de alcantarillado, producidos por la fermentación anaeróbica.
- Otro tipo de biogás es producido por la fermentación anaeróbica de estiércol animal así como de desechos de animales en los mataderos, cervecerías y otras industrias agro-alimentarias.

Energía Solar

Energía correspondiente a la radiación solar y es utilizada con motivo de calentamiento de agua o generación de electricidad, aprovechada en calentadores solares o módulos fotovoltaicos.

Clasificación de las Fuentes de Energía

Técnicamente las fuentes de energía o energéticos que reciben el nombre de primarios son provenientes de recursos naturales, mientras que los secundarios son el resultado del procesamiento de un energético primario. Son considerados como energéticos primarios el petróleo, gas natural, condensados, la nucleenergía, energía solar, hidroenergía, geoenergía, eoloenergía y bioenergía. En los energéticos secundarios se incluye el coque de petróleo, gas licuado de petróleo, gasolinas y naftas, querosenos, diésel, combustóleo, productos no energéticos, gas seco y electricidad²⁷. Por otra parte, el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) categoriza las tecnologías de conversión según la importancia económica de los combustibles usados, teniendo así tecnologías “convencionales” y tecnologías “limpias”. El primer grupo se integra por centrales que requieren el uso de combustibles fósiles como energético primario y son las responsables de la mayor parte de los daños atmosféricos relacionados a la operación del sector eléctrico. El segundo, comprende a las plantas cuyo proceso de conversión de fuentes de energía no representa grandes efectos secundarios en los equilibrios ambientales, evitando de esta forma las transformaciones nocivas de los sistemas naturales, ya que produce un menor volumen de emisiones y residuos contaminantes en comparación con las tecnologías convencionales.

Con el desarrollo de la tecnología, el agotamiento de los combustibles convencionales y la investigación en áreas emergentes, cada vez surgen nuevas fuentes de energía, por lo que uno de los aspectos más importantes que éstas deben cumplir es la capacidad de garantizar el abastecimiento energético de las economías que las usen. Para ello, estas nuevas fuentes de energía deben

²⁷ Op. Cit. Secretaría de Energía (SENER), (2015). *Balance Nacional de Energía (BNE) 2014*. México.

presentar una gran facilidad de captación y conversión energética, en cantidades suficientes para satisfacer lo invertido en ellas y concretar su uso.

Dada la importancia actual de la electricidad y la creciente demanda mundial energética, todas las fuentes de energía de utilización concreta son importantes y necesarias de explotar. En la actualidad existen tecnologías que pueden aprovechar más de un energético, abriendo otro ramo en las nuevas generaciones de tecnologías de conversión y en la selección de fuentes de energía, logrando de esta manera que estas puedan ser sustituidas entre sí.

Se les otorga el nombre de fuentes de energía renovables a aquellos recursos cuyo origen no es sintético y tampoco necesitan de procedimiento de tratamiento, de potencial inagotable y, una vez consumidos, se pueden regenerar de manera natural o con un proceso de purificación. Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía²⁸, las energías renovables son recursos limpios cuyo impacto es prácticamente nulo y siempre reversible. Ejemplos de estos recursos son la energía solar, eólica, hidráulica, mareomotriz²⁹ y la biomasa. Las fuentes de energía no renovables son aquellas que existen en una cantidad limitada en la naturaleza y que su formación tarda entre decenas a centenas de millones de años (Legrand, 2015). La demanda mundial de energía en la actualidad se satisface en un 94% con este tipo de fuentes y ejemplos de esta categoría son: el carbón, petróleo, gas natural y uranio³⁰.

Las fuentes de energía tradicionales son aquellas que técnicamente forman parte de los energéticos que tradicionalmente se comercializan, relacionándose directamente en el cálculo del Producto Interno Bruto (PIB) y tienen una

²⁸ Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2006). *Energías renovables*. [online] Disponible en: <http://www.idae.es/index.php/idpag.16/relmenu.301/mod.pags/mem.detalle> [Consultado 29 Mar. 2016].

²⁹ La energía mareomotriz es aquella energía que aprovecha el ascenso y descenso del agua del mar producido por la acción gravitatoria del sol y la luna para generar electricidad de forma limpia. Se trata, por tanto, de una fuente de energía renovable e inagotable que utiliza la energía de las mareas producida en nuestros océanos.

³⁰Op. Cit. González González, M. (n.d.). *Geotermia Como Alternativa Energética En México, ¿Es Realmente Viable?* [ebook] Los Humeros, Puebla México. Disponible en: <http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/treMiguelGG09.pdf> [Consultado 28 Mar. 2016].

participación esencial en los balances energéticos de los países industrializados. Las energías convencionales no tienen por qué ser energías no renovables, pero debido a circunstancias históricas, se puede decir que se constituyen principalmente por las no renovables³¹ y son el caso del carbón, petróleo, gas natural, hidroenergía y energía nuclear.

1.3 Tecnologías para la Generación de Energía Eléctrica

El proceso de todas las diversas tecnologías de aprovechamiento eléctrico se rige bajo “el principio de la conversión energética” (a excepción de los módulos fotovoltaicos), el cual consiste en la transformación de la energía cinética en energía eléctrica. Para ello lo primero que se necesita es una fuente de energía mecánica como un motor, turbina de viento, turbina de gas o turbina de vapor y un eje unido a uno de estos dispositivos que se encuentre conectado a un generador eléctrico el cual tiene la función de “inductor”³² para producir energía eléctrica.

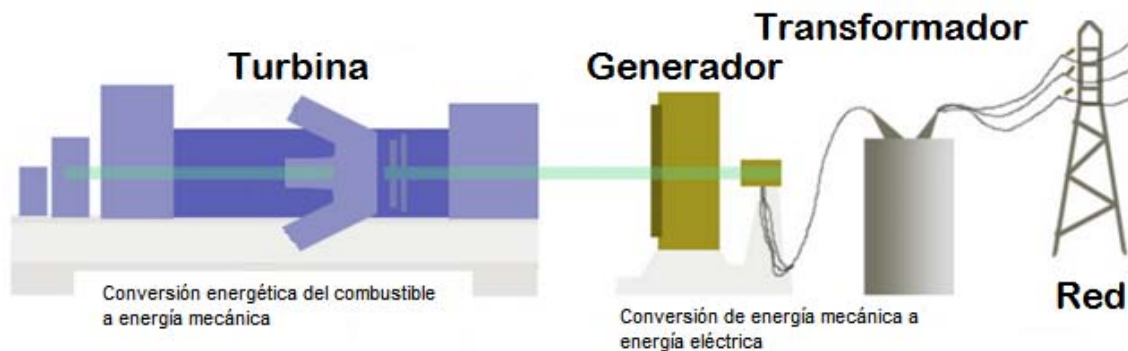


Ilustración 5. Esquema de los principales equipos en una central eléctrica.
Fuente. edisontechcenter.org, 2011.

Desde la creación de la primera central eléctrica en 1882 por Thomas Edison hasta las plantas instaladas actualmente, se utiliza un sistema de motores o de turbinas para el aprovechamiento de los energéticos y es conocido como el sistema primario de una central eléctrica. El objetivo de este sistema es generar la energía cinética que alimentará al generador eléctrico para la producción de electricidad, este

³¹ Espada, Blanca (2016). *Las energías convencionales*. [online] Disponible en: <http://erenovable.com/las-energias-convencionales/> [Consultado 29 Mar. 2016].

³² Para conocer más sobre los generadores eléctricos consultar Apéndice 1.

sistema es puesto en operación con el flujo de algún fluido que forma parte de un ciclo termodinámico³³, generado cuando el energético es aprovechado por su energía expresada en calor y es usada para poner en funcionamiento las turbinas de las centrales, o por la fuente de energía en sí, como pasa con las plantas que utilizan energía hidráulica o los parques eólicos. Por lo que la diferencia entre las diversas tecnologías generadoras radica en el funcionamiento de su sistema principal.

1.4 Centrales de Generación Eléctrica en México

México es uno de los pocos países que cuenta con una cartera ampliamente diversificada de recursos energéticos, lo cual se mantiene a la vanguardia en la utilización de tecnologías para su explotación adecuada, buscando actualmente integrar o modificar sus procesos para hacerlas más sustentables. A continuación se describirán las tecnologías de conversión de las diferentes centrales que atribuyen la mayor parte de energía eléctrica al país.

Tecnologías Convencionales

Centrales Termoeléctricas Convencionales

Se le da el nombre de central termoeléctrica a las centrales que basan su funcionamiento en tecnologías de aprovechamiento de energía térmica (o calorífica), la cual es procedente de la combustión de algún combustible fósil para producir electricidad, normalmente para ello se utiliza carbón, petróleo o gas; en México una central térmica convencional utiliza principalmente derivados del petróleo (combustóleo³⁴). La producción de electricidad de este tipo de centrales depende del aprovechamiento del ciclo Rankine, en el que al darse las condiciones de presión y temperatura idóneas, provoca el movimiento mecánico necesario para dar movimiento rotacional al inductor del generador, haciendo que éste produzca electricidad.

³³ Para más información consultar Apéndice 2.

³⁴ Combustible residual de la refinación del petróleo. Abarca todos los productos pesados y se incluye el residuo de vacío, Virgin Stock, residuo de absorción y residuo largo. Se divide en combustóleo pesado, ligero e intermedio.

El proceso de condensación de este tipo de centrales depende de un segundo circuito de agua. Así, el primer circuito puede cumplir con las fases de dicho ciclo y el agua del circuito secundario puede ser enfriada en torres de refrigeración, o bien puede ser tomada de algún cuerpo de agua (laguna, río, etc.) cercano a la planta, siempre y cuando esto no represente un problema a la biota de la región.

Se puede encontrar este tipo de centrales en casi todos los estados de la República, pero los estados de Sonora, Veracruz, Tamaulipas, Colima e Hidalgo es donde se genera mayor energía eléctrica a partir de esta tecnología, siendo su aportación energética la más importante para el país, al formar parte del grupo de tecnologías de generación base.



Ilustración 6. Esquema de una central termoeléctrica convencional.

Fuente. <http://energiaxdlisjfh.blogspot.mx>, 2015.

Centrales de Combustión Interna

Al igual que las centrales térmicas convencionales, las centrales de combustión interna basan su proceso en la combustión de un combustible fósil, pero con la

diferencia de que esto se lleva a cabo en estos ingenios gracias al uso del Ciclo Otto o Diésel (depende del equipo). En México estos motores aprovechan la combustión del diésel³⁵ (principal energético) para propiciar la expansión de los gases de combustión mediante lo cual se obtiene energía mecánica y con ello lograr la conversión eléctrica, al poner en funcionamiento el generador. Los modelos más recientes pueden quemar diferentes combustibles como el gas natural, gas asociado al petróleo crudo, biogás, combustibles vegetales (biodiesel), emulsiones de residuos pesados y combustóleo.

En nuestro País, el estado con mayor generación eléctrica por el uso de estos motores es Baja California Sur y esta tecnología es empleada en la generación pico.

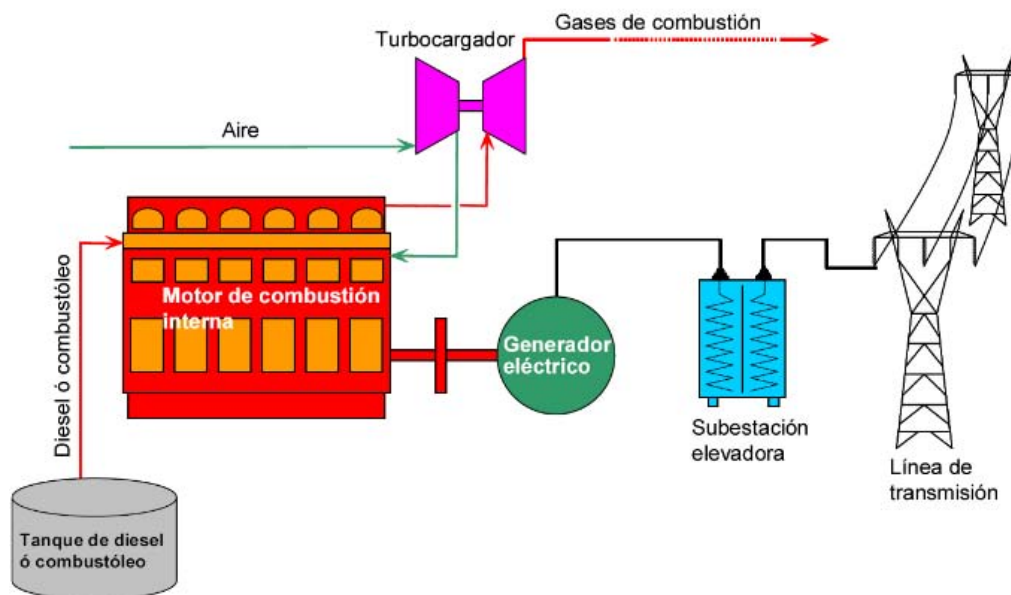


Ilustración 7. Esquema de una central de combustión interna. **Fuente.** CFE, 2008.

Centrales Turbogás

La generación eléctrica en unidades turbogás se lleva a cabo usando turbinas de gas, las cuales funcionan siguiendo las fases del ciclo Brayton. En México estas centrales normalmente consumen gas natural y en menor medida diésel.

³⁵ Combustible líquido que se obtiene de la destilación del petróleo entre los 200 y 380° C. Es un producto de uso automotriz e industrial, que se emplea principalmente en motores de combustión interna.

Los estados con mayores centrales de este tipo son Baja California, Nuevo León, Veracruz y Estado de México. Esta tecnología es mayoritariamente usada cuando la demanda de electricidad rebasa la generación base dado su corto tiempo de entrada en operación.

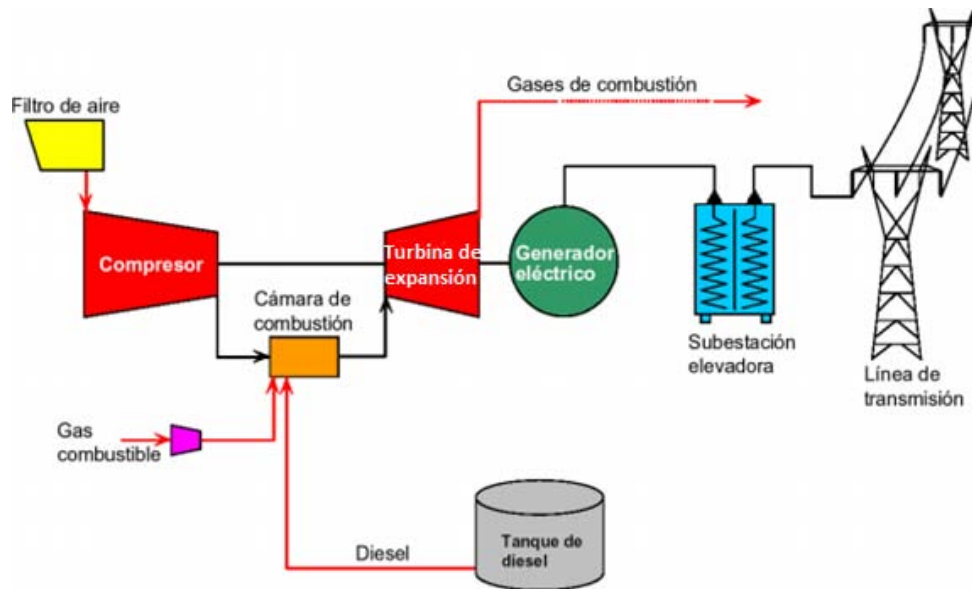


Ilustración 8. Esquema de una central turbogás. **Fuente.** CFE, 2008.

Centrales de Ciclo Combinado

El proceso de generación en las centrales de ciclo combinado parte del procedimiento utilizado en las centrales turbogás, donde una vez terminado el ciclo Brayton, se aprovecha la energía térmica de los gases de escape que salen de la turbina de gas, los cuales salen con una temperatura de aproximadamente 623°C , en una caldera de recuperación³⁶, siendo utilizado en un ciclo Rankine, tal como se hace en una central termoeléctrica convencional, e impulsa una segunda turbina ahora de vapor, generalmente de menor capacidad que la turbina de gas. Los ciclos

³⁶ Martín del Campo, Cecilia. *Apuntes de Energía y Ambiente, Capítulo Centrales Eléctricas en México*. Maestría en Ingeniería en Energía, Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, 2007.

combinados se caracterizan por utilizar gas natural como energético primario y tener altos niveles de eficiencia en comparación con otras tecnologías convencionales.

Ésta es una de las tecnologías que mayor uso tiene en México, destacándose como principal productor de electricidad en los estados de Baja California, Sonora, Chihuahua, Durango, Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Colima, Veracruz y Yucatán. Gracias a su gran eficiencia y confiabilidad, esta tecnología es la que tiene mayor participación en la generación de la carga base y también puede participar en la generación de la carga pico.

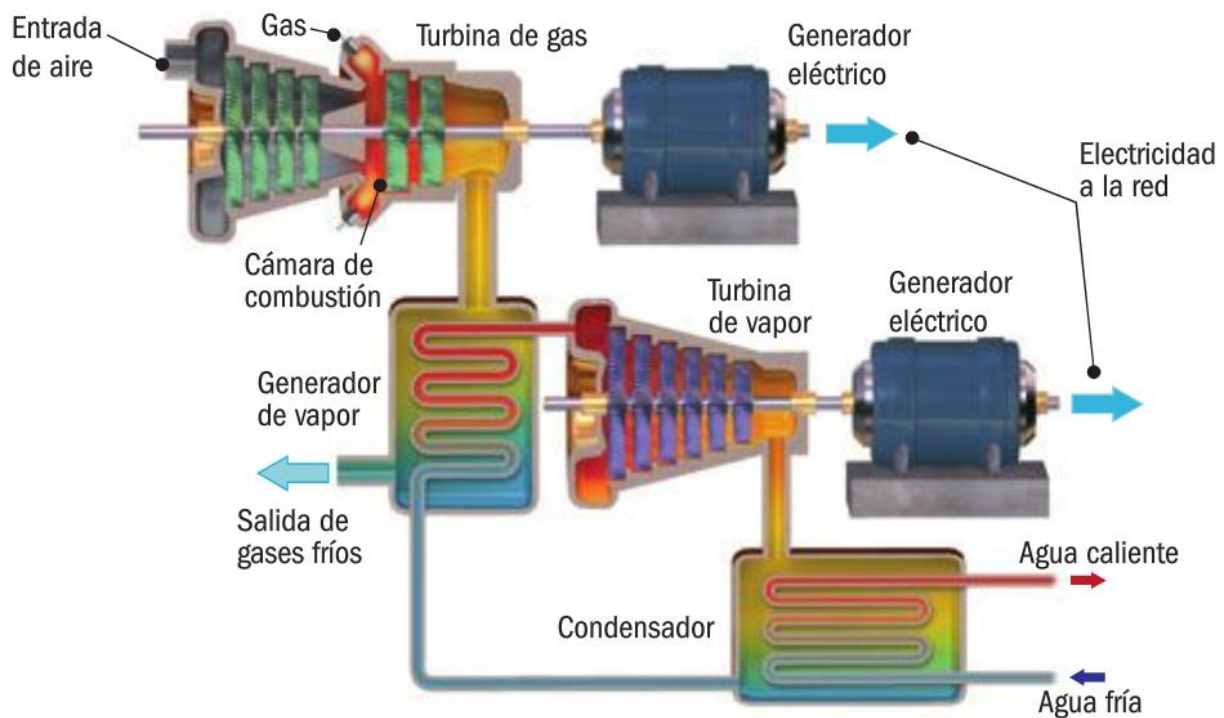


Ilustración 9. Esquema de una central de ciclo combinado.
Fuente. <http://pelandintecno.blogspot.mx>, 2012.

Centrales Carboeléctricas

El procedimiento en una central carboeléctrica es análogo a una central termoeléctrica convencional, la diferencia principal radica en los recursos necesarios para generar el vapor que impulsará la turbina. El hecho que este tipo de tecnología use carbón como combustible predominante, hace necesario el requerimiento un sistema o procedimiento de manejo de alimentación de carbón y

remoción de cenizas, también se requiere de un tratamiento especial del combustible dependiendo del tipo que se use (hulla, antracita o lignito), el cual consiste en la pulverización y secado del mismo. Se reconocen dos tipos de centrales carboeléctricas:

Carboeléctrica subcrítica

Este modelo es el más usual debido a su baja complejidad en comparación con las centrales carboeléctricas supercríticas. Además de no contar con un sistema de desulfuración ni equipos anticontaminantes para el control de la emisión de dióxido de azufre (SO₂), hace obligatorio el uso de carbón de bajo contenido de azufre y un manejo más complejo de los residuos de la combustión.

Carboeléctrica supercrítica

Las centrales que reciben este nombre son las que operan en condiciones de temperatura y presión por encima del punto crítico del agua, es decir, condiciones en las que las fases líquida y gaseosa del agua coexisten en equilibrio y dejan de distinguirse como fases separadas. Para el funcionamiento óptimo de estas plantas es necesaria la integración de equipos más grandes que aseguren los lineamientos de seguridad. El costo de la maquinaria y construcción se ve solventado ya que gracias a estas condiciones la eficiencia de la conversión energética aumenta, logrando producir más electricidad a menor cantidad de combustible y consecuentemente emisiones de GEI bajas en comparación con las carboeléctricas subcríticas.

Dado que este tipo de centrales emite muchos contaminantes y otros medios pueden cubrir su participación sin implicar un gran impacto al ambiente, las centrales carboeléctricas han sido desplazadas del grupo preferente de tecnologías de generación. Por tal motivo sólo son dos los estados en México que aún cuentan con este tipo de plantas: Coahuila y Guerrero. Aunque la participación de esta tecnología era de requerimiento básico en el consumo eléctrico de los años anteriores al nuevo milenio, actualmente sólo se usa en caso de demanda pico.

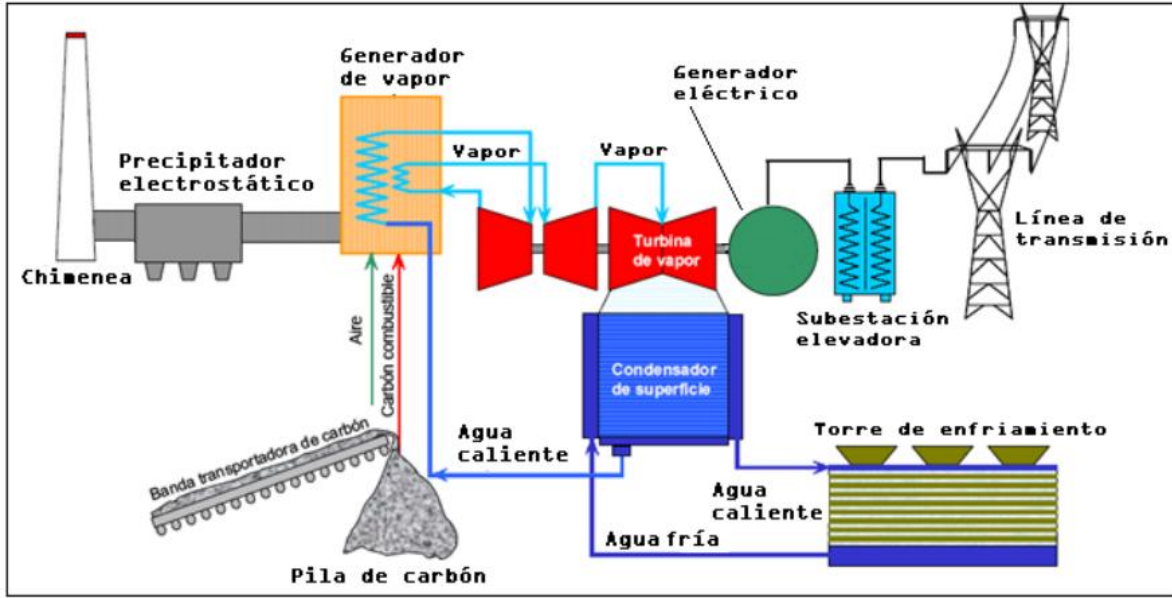


Ilustración 10. Esquema una central carboeléctrica Fuente. CFE, 2008.

Tecnologías Limpias

Centrales Eólicas

La explotación de la energía cinética del viento se hace mediante el uso de turbinas eólicas —aerogeneradores—, al aprovechar un flujo dinámico de aire con dirección cambiante y desplazamiento horizontal, de donde resulta que la cantidad de energía obtenida es proporcional al cubo de la velocidad del viento. Un aerogenerador o turbina eólica es un dispositivo constituido principalmente por un rotor, formado por un conjunto de hélices que tiene la finalidad de girar cuando el viento las atraviesa, un eje principal o góndola, en el que se encuentra el multiplicador que tiene la función de acondicionar la velocidad de giro del rotor a la velocidad que ingresa al generador, y una torre, estructura responsable de soportar al aerogenerador a la altura necesaria para aprovechar eficazmente las corrientes de aire de la región. Un parque eólico está conformado por un gran número de turbinas dispuestas estratégicamente en lugares donde existe el recurso eólico adecuado³⁷.

³⁷ ENERGÍA. (n.d.). 1st ed. [ebook] Disponible en: <http://www.edu.xunta.es/centros/iesfelixmuriel/system/files/La%20Energ%C3%ADa.pdf> [Consultado 8 Apr. 2016].

Aunque esta tecnología es relativamente joven dentro de las tecnologías consideradas para satisfacer el consumo eléctrico de nuestra sociedad, son varios los estados donde se pueden encontrar parques eólicos, siendo el estado de Oaxaca el que mayor electricidad produce por este medio. Este tipo de tecnología no necesita ser desconectado de las líneas de transmisión ya que sólo generan cuando las condiciones climatológicas lo permiten, es por ello que se puede considerar dentro de la generación base, aunque no necesariamente se encuentre operando todo el día y no tenga una participación importante dentro de este grupo de tecnologías.

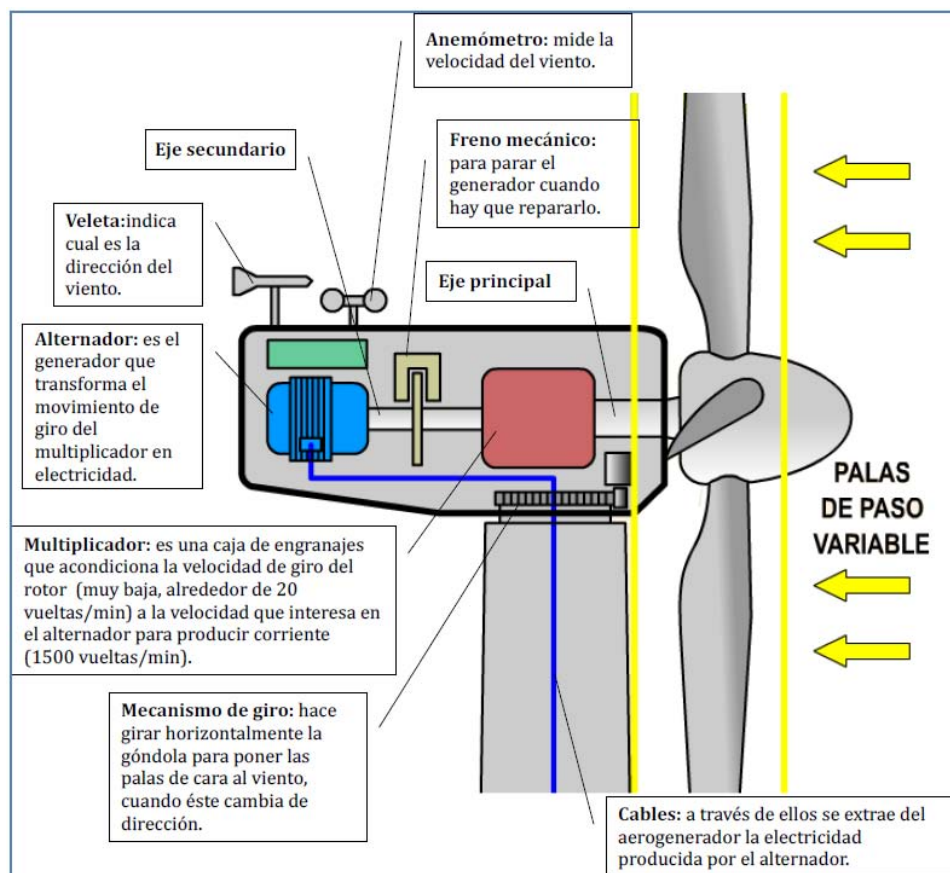


Ilustración 11. Esquema de un aerogenerador. Fuente. *edu.xunta.es*, 2016.

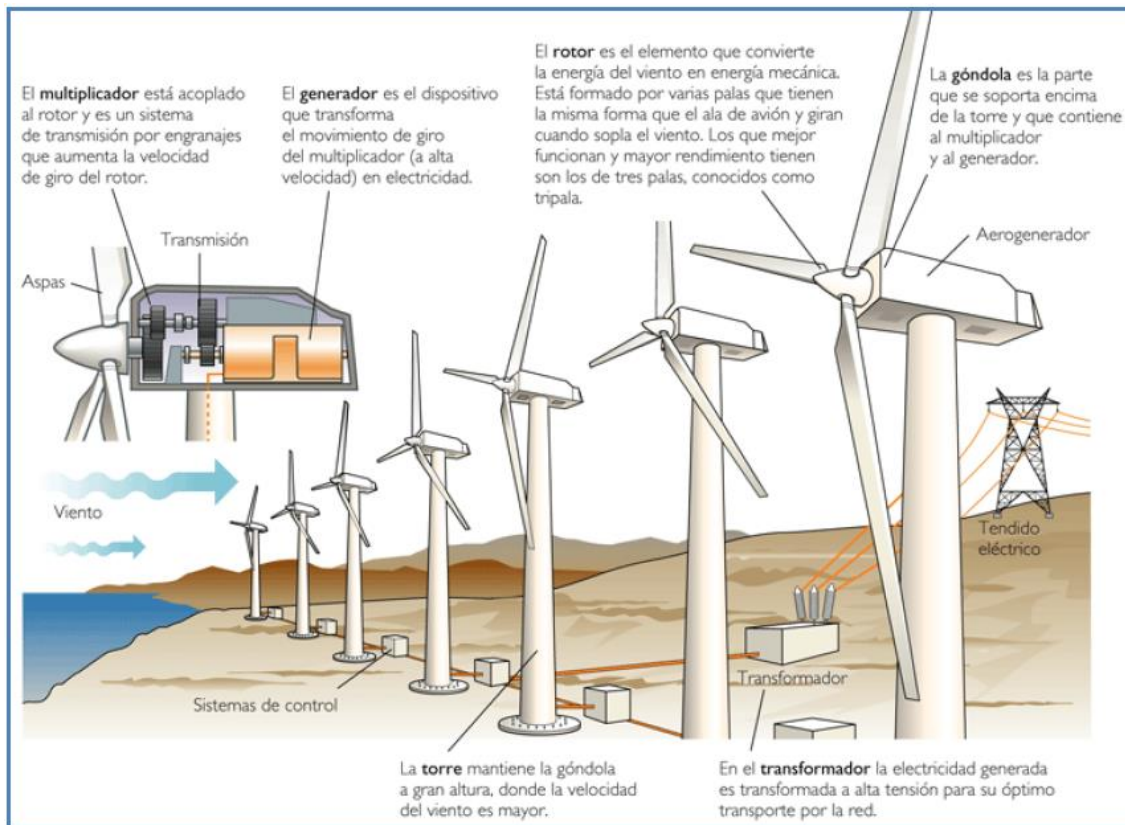


Ilustración 12. Esquema de un parque eólico. Fuente. edu.xunta.es, 2016.

Centrales de Aprovechamiento Solar

La explotación de la radiación solar puede llevarse a cabo a través de dos opciones. La primera, al usar calentadores solares y aprovechar la energía solar como fuente térmica (fototérmicamente), y la segunda, al generar directamente electricidad a base del fenómeno fotoeléctrico³⁸ en módulos fotovoltaicos. A partir de estas formas de explotación han surgido cuatro tecnologías para el aprovechamiento de este recurso.

Torre Central

En las plantas de torre central, se aprovecha la radiación solar mediante el uso de heliostatos (espejos planos), los cuales reflejan la luminiscencia solar en un receptor situado en lo alto de una torre por el que circulan sales de nitrato fundidas. Estas sales son impulsadas desde un ‘tanque frío’ hasta el receptor situado en la parte superior de una torre donde se calientan hasta alcanzar temperaturas mayores a

³⁸ El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones (corriente eléctrica) que se produce cuando la luz incide sobre una superficie metálica en determinadas condiciones.

los 500°C. Estas sales calientes bajan a un intercambiador de calor para generar vapor de agua y de esta forma llevar el mismo proceso que una central termoeléctrica³⁹.

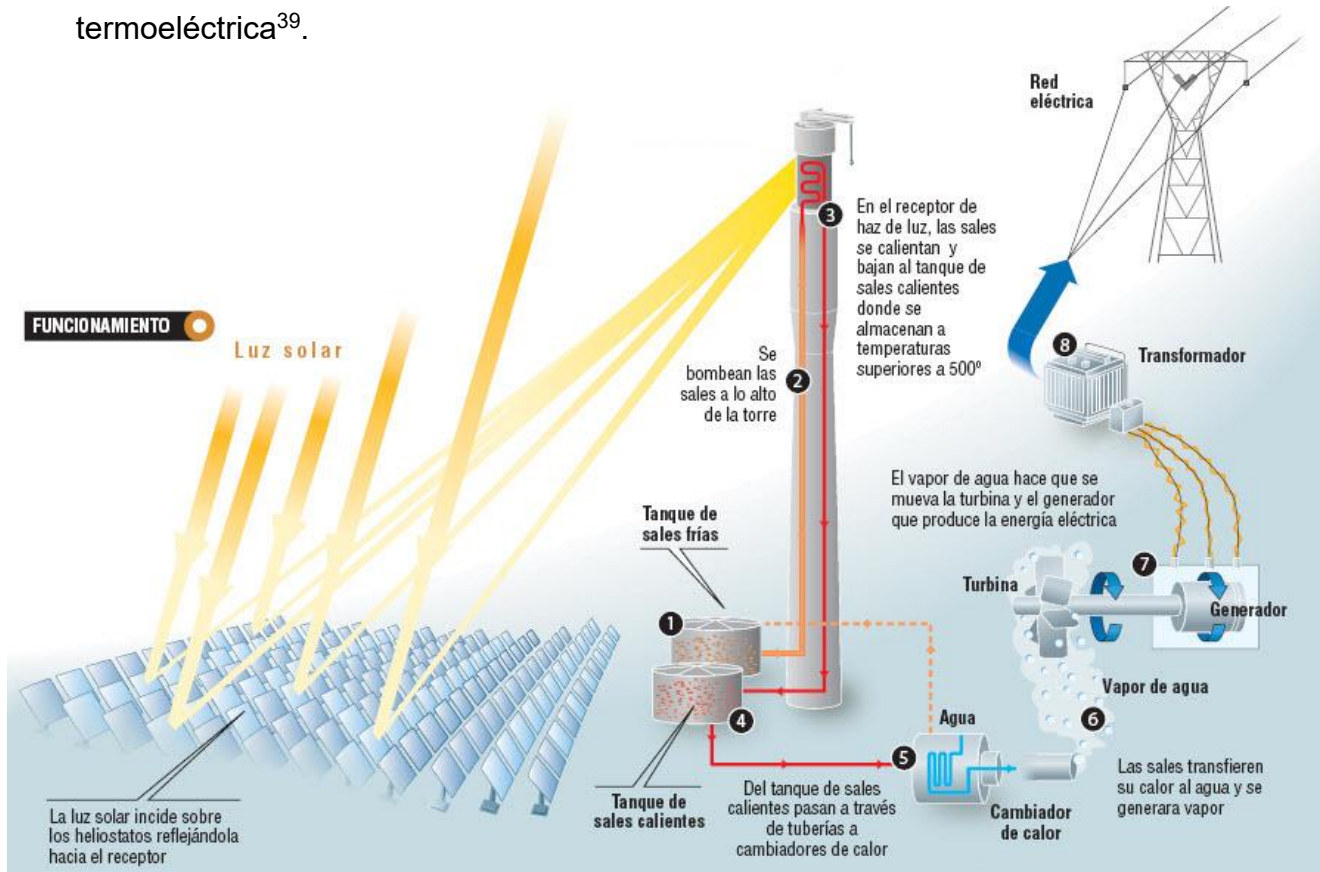


Ilustración 13. Funcionamiento de una central solar de torre central.

Fuente. torresolenergy.com, 2016.

Canal Parabólico

Un canal parabólico, al igual que una torre central, es una tecnología que concentra la radiación solar para su aprovechamiento en procesos térmicos de alta temperatura. Este canal es un dispositivo estructurado por heliostatos dispuestos de tal forma en la que se puede hacer fluir una corriente de algún líquido (agua, aire, aceite o sales fundidas) a través de ellos, capaz de transferir calor y que al irradiarle ópticamente luz solar puede alcanzar temperaturas entre 250 a 2000°C y con ello

³⁹ Torresol Energy (2016). *Tecnología de Torre Central*. [online] Disponible en: <http://www.torresolenergy.com/TORRESOL/tecnologia-torre-central/mx> [Consultado 13 Apr. 2016].

generar electricidad mediante el uso de un ciclo Rankine. Al conjunto de canales parabólicos se le conoce como campo solar⁴⁰.

Actualmente se ha empezado a usar esta tecnología en otras centrales para aumentar su eficiencia sin representar grandes impactos ambientales y es el caso de centrales de ciclo combinado y sistemas híbridos solar-geotermia.

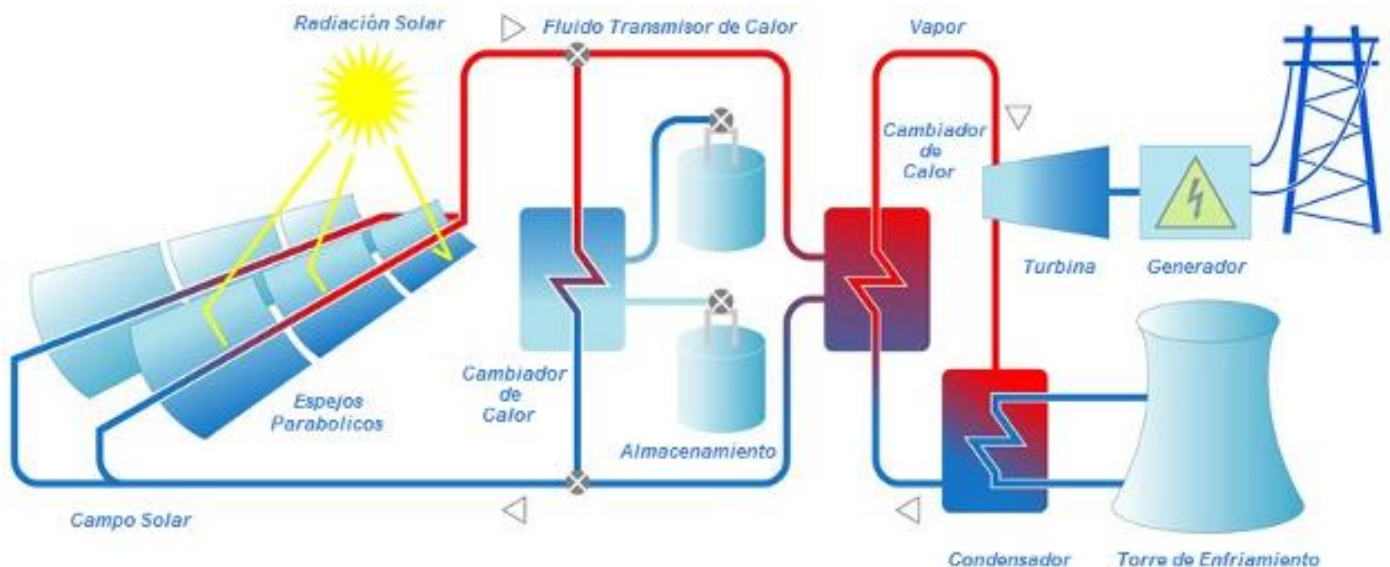


Ilustración 14. Funcionamiento de una central solar de canal parabólico.

Fuente. *unistmo.edu.mx*, 2016.

Disco Parabólico

Los sistemas de disco parabólico son estructuras individuales que, al igual que los dos sistemas descritos anteriormente, generan electricidad mediante un proceso fototérmico y, a diferencia, tienen anexo el receptor en el área focal del disco de tal forma que la radiación solar se concentra en ese punto.

El concentrador puede ser de varios tipos, puede estar formado por una o varias membranas tensionadas a las que se les agrega un film reflectante (puede ser metálico o de vidrio), o puede estar formado por espejos curvados. También puede tener diferentes formas, por ejemplo, estar formado por “pétalos” en forma paraboloidal.

⁴⁰ Asociación Nacional de Energía Solar (2016). *Red Termosolar SCP*. [online] Disponible en: http://www.anes.org/anes/index.php?option=com_wrapper&Itemid=76 [Consultado 13 Apr. 2016].

En los sistemas de discos parabólicos el receptor se conforma de un motor Stirling. El principio de su funcionamiento es el trabajo realizado por la expansión y contracción de un gas (normalmente helio, hidrógeno, nitrógeno o simplemente aire) al ser obligado a seguir un ciclo de enfriamiento en un foco frío, con lo cual se contrae, y de calentamiento en un foco caliente (el receptor de la energía solar en este caso), con lo cual se expande. Posteriormente, mediante un alternador se transforma la energía mecánica del motor en energía eléctrica. Existe un elemento adicional al motor, llamado regenerador, que permite alcanzar mayores rendimientos⁴¹.

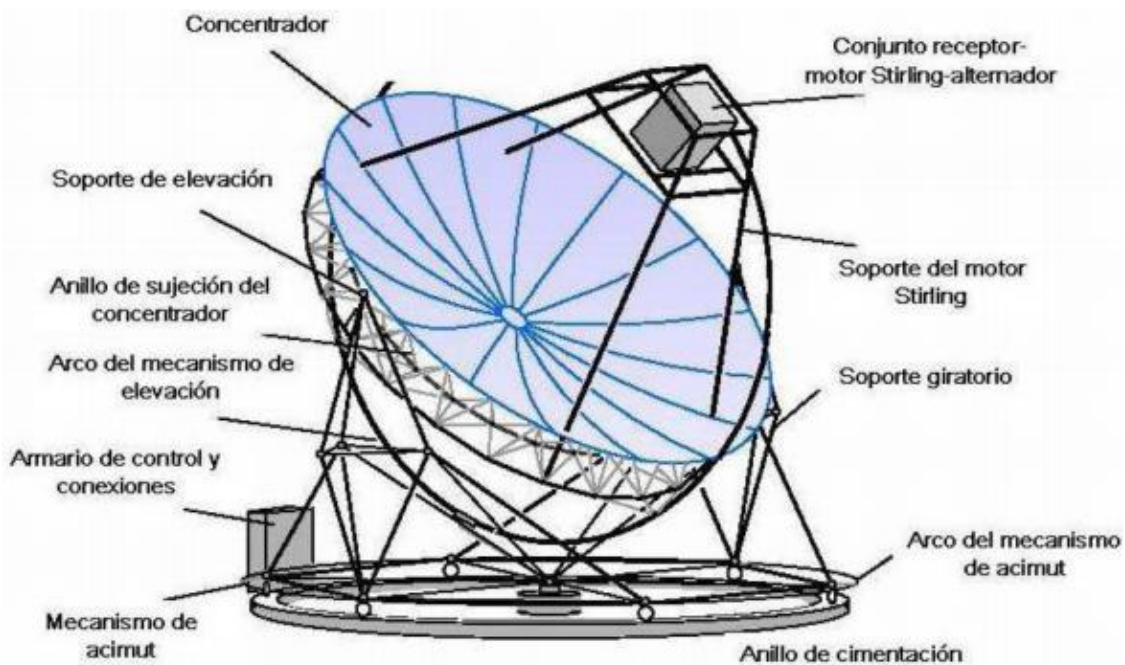


Ilustración 15. Funcionamiento de un disco parabólico.
Fuente. *bibing.us.es*, 2016.

Módulos Fotovoltaicos

Las celdas o células fotovoltaicas son los dispositivos capaces de transformar la energía luminosa, procedente de los rayos solares, en una diferencia de potencial proporcional a la cantidad de luz que incida sobre dicha célula. Las celdas fotovoltaicas son elaboradas con materiales semiconductores como el silicio o el selenio, siendo el silicio “impuro” (al que se le agregan átomos de otros elementos

⁴¹ Energiadoblezero (2016). *Sistemas de discos parabólicos*. [online] Disponible en: <http://energiadoblezero.com/energias-renovables/energia-solar-termoelectrica/sistemas-de-discos-parabolicos> [Consultado 13 Abr. 2016].

con número de valencia diferente) el más utilizado al tener una mayor eficiencia gracias a la combinación de silicio tipo P y N. Los átomos de silicio forman enlaces covalentes entre sí siendo su número de valencia igual a 4, pero el silicio tipo P es aquel en el cual algunos átomos no se encuentran totalmente enlazados formando así un “hueco” entre un átomo y otro. En este caso los elementos agregados son el boro o aluminio de valencia tres. El tipo N tiene la característica de tener átomos de elementos como fósforo y arsénico (elementos de valencia 5), los cuales gracias a su configuración electrónica hacen que este tipo de silicio tenga electrones “suelos” es decir, no todos tienen un hueco asociado; sin embargo, el material se encuentra eléctricamente neutro ya que el número de átomos que le fueron introducidos es muy pequeño.

El silicio funciona de la siguiente manera: cuando inciden los rayos solares, en especial los rayos que se encuentran en el rango de luz visible y en menor cantidad los rayos UV, el silicio tipo P es golpeado por los fotones que conforman las ondas solares electromagnéticas, entonces los electrones del material son excitados, rompiendo los enlaces covalentes y con ello promueven el movimiento de los electrones que se encuentran suelos, llevándolos de la banda de valencia a la banda de conducción, por donde se podrán desplazar libremente hasta llegar a la placa de silicio tipo N, siendo atraídos por la carga positiva de ésta y siguiendo su camino cerrando así el circuito gracias a los contactos óhmicos⁴² que sirven para conducir fuera del panel la corriente generada. Esta corriente fluye por convención de positivo a negativo, que viéndolo de esta manera, los huecos son los que se desplazan pero en realidad son los electrones los que se mueven en ese sentido. El sistema fotovoltaico se conforma por paneles fotovoltaicos y sus componentes adicionales (inversores, baterías, componentes eléctricos y sistemas de montaje)⁴³.

⁴² Cuando un metal hace contacto con un semiconductor, se forma una barrera en la interfaz entre estos dos. Esta barrera es responsable del control de la corriente así como del comportamiento de la capacitancia del contacto y es esto lo que define si un contacto es óhmico o rectificador.

⁴³ Energía e Impacto Ambiental. (2010). *Energía Solar Fotovoltaica: Principio Físico*. [online] Disponible en: <https://energiaunam.wordpress.com/2010/03/02/81/> [Consultado 14 Apr. 2016].

El uso de esta tecnología, al igual que la eólica, dentro de las tecnologías de generación es relativamente reciente. A pesar de ello, se encuentra constantemente generando energía eléctrica en los estados del norte de la República, como Baja California, Baja California Sur, Durango, Sinaloa, Aguascalientes y Guanajuato. Esta tecnología tampoco requiere ser desconectada de la red de transmisión, dado que su operación es facilitada sólo en ciertas horas del día.

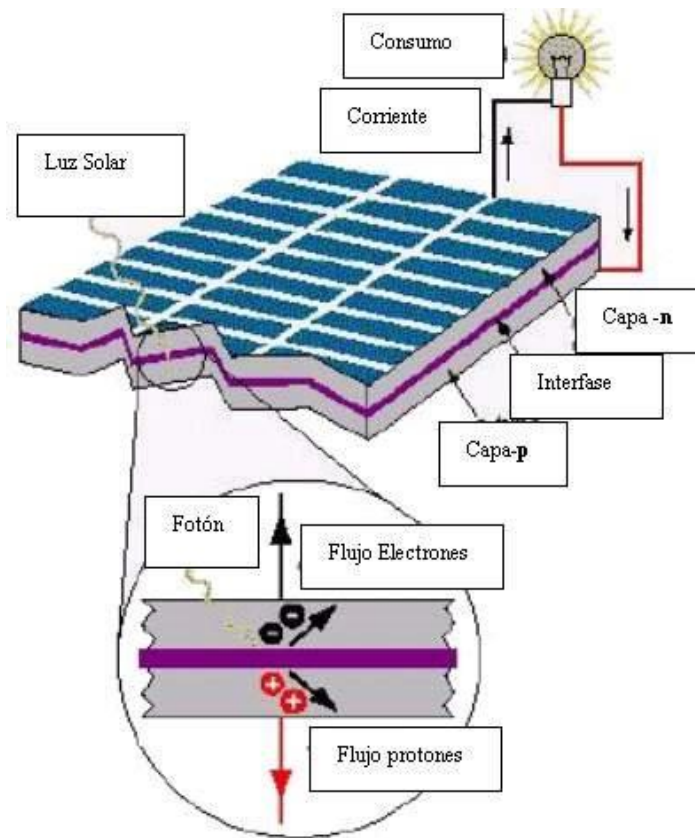


Ilustración 16. Funcionamiento de un módulo fotovoltaico.
Fuente. <http://celdasfotovoltaicas.blogspot.mx/>, 2016.

Centrales Hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas basan su proceso de conversión energética en el aprovechamiento de la energía potencial y/o cinética del agua de los ríos. Para ello, es necesaria la construcción de presas, las cuales tienen el objetivo de ser el sustento físico que permita la operación de las turbinas hidráulicas, y entran en operación cuando sus álabes son movidos por el caudal que las atraviesa, de esta forma generar el movimiento de rotación del eje unido al alternador y finalmente

generar energía eléctrica. Se definen principalmente dos tipos de centrales hidráulicas:

Centrales Hidroeléctricas de Agua Fluente

Llamadas también de agua corriente. Se construyen en los lugares en que la energía hidráulica debe ser utilizada en el instante en que se dispone de ella. Para ello, su construcción se realiza sobre el propio cauce del río. No cuentan con reserva de agua, por lo que el caudal suministrado oscila según las estaciones del año. En la temporada de precipitaciones abundantes (de aguas altas), desarrollan su potencia máxima, y dejan pasar el agua excedente. Durante la época seca (aguas bajas), la potencia disminuye en función del caudal, llegando a ser casi nulo en algunos ríos.

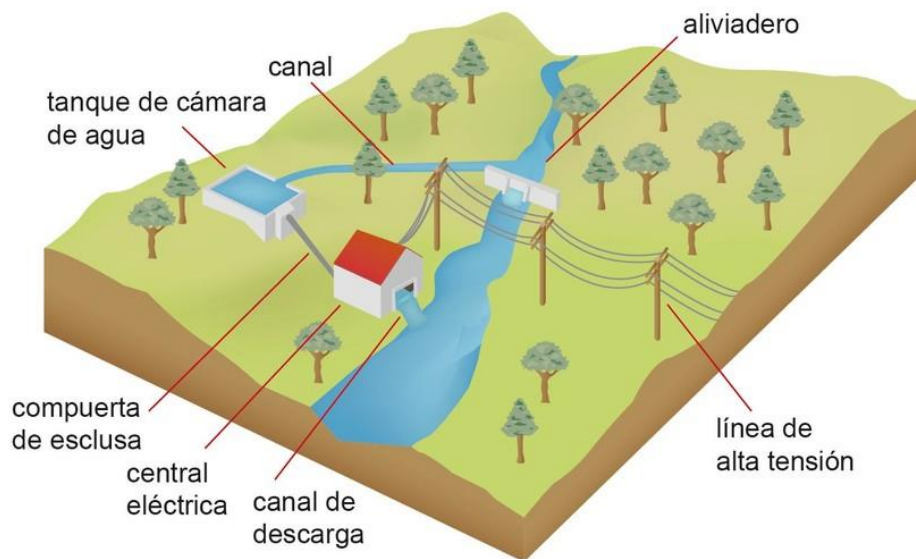


Ilustración 17. Esquema de una central hidroeléctrica de agua fluente.
Fuente. Sunbeam GmbH, 2016.

Centrales Hidroeléctricas de Agua Embalsada

Se alimenta del agua de grandes lagos o de pantanos artificiales (embalses), conseguidos mediante la construcción de presas. El embalse es capaz de almacenar los caudales de los ríos afluentes, llegando a elevados porcentajes de captación de agua en ocasiones. El agua es utilizada según la demanda, a través de conductos que la encauzan hacia las turbinas. A diferencia de las centrales de

agua fluente, los conductos permiten tener un caudal constante pero más pequeño a comparación⁴⁴.

En México, esta forma de generación eléctrica es muy importante y es una de las que mayor participación ha tenido a lo largo del historial de generación de nuestro país. Por lo mismo, se pueden encontrar estos tipos de centrales en la mayoría de los estados de la República, siendo los estados con mayor generación Nayarit, Guerrero y Chiapas. Dada su alta confiabilidad y sus bajas tasas de emisión de contaminantes, esta tecnología se posiciona como la principal tecnología limpia participante en la generación de la carga base y también puede participar en la generación de la carga pico.

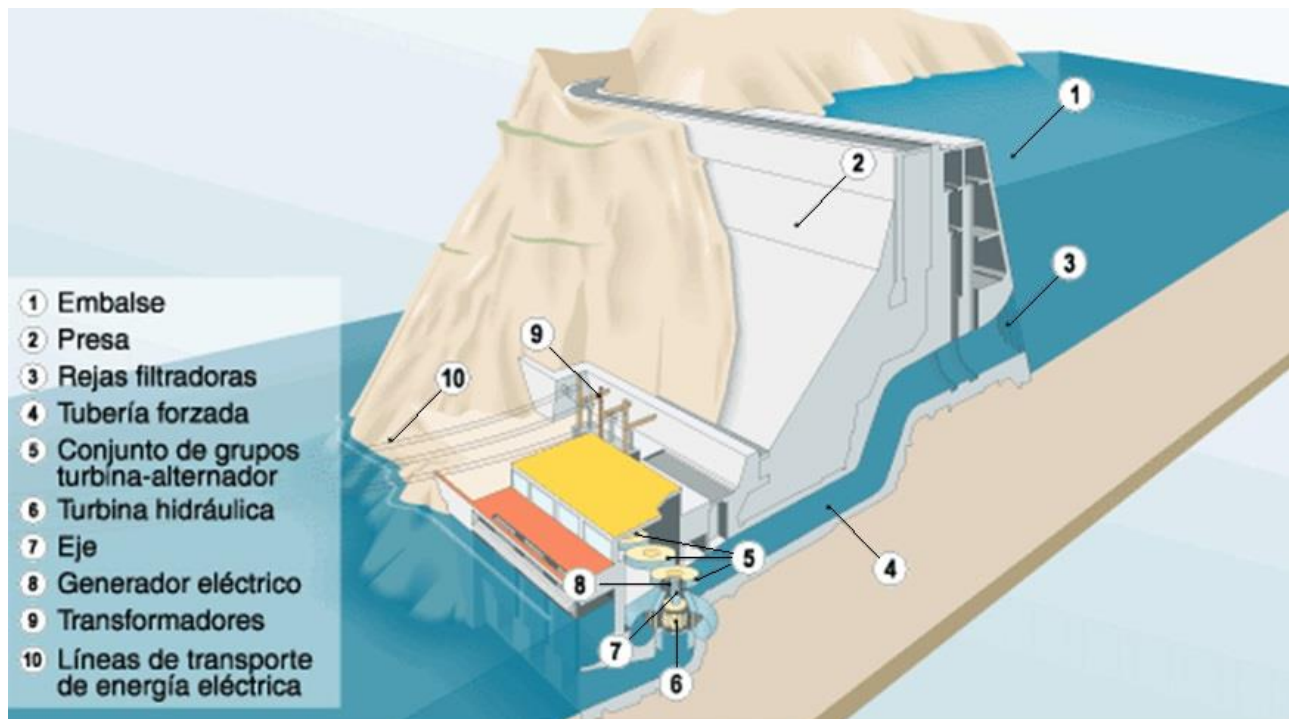


Ilustración 18. Esquema de una central hidroeléctrica de agua embalsada.
Fuente. <http://globalelectricity.files.wordpress.com>, 2016.

⁴⁴ Escuela de Ingeniería de Antioquia (n,d). *Tipos de Centrales Hidroeléctricas*. [online] Disponible en: http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/interesantes/centrales/pagina_nueva_1.htm [Consultado 14 Apr. 2016].

Centrales Geotermoeléctricas

Las centrales geotérmicas operan con los mismos principios que las centrales termoeléctricas, con la diferencia de que éstas obtienen el vapor del subsuelo. El vapor geotérmico se envía a un separador de humedad, una vez seco se conduce a una turbina para transformar la energía cinética en mecánica, cuyo movimiento se transmite al generador para producir electricidad.

Se pueden encontrar centrales de este tipo en los estados de Baja California, Baja California Sur, Michoacán y Puebla. La explotación de este energético se considera dentro la producción de la generación base.

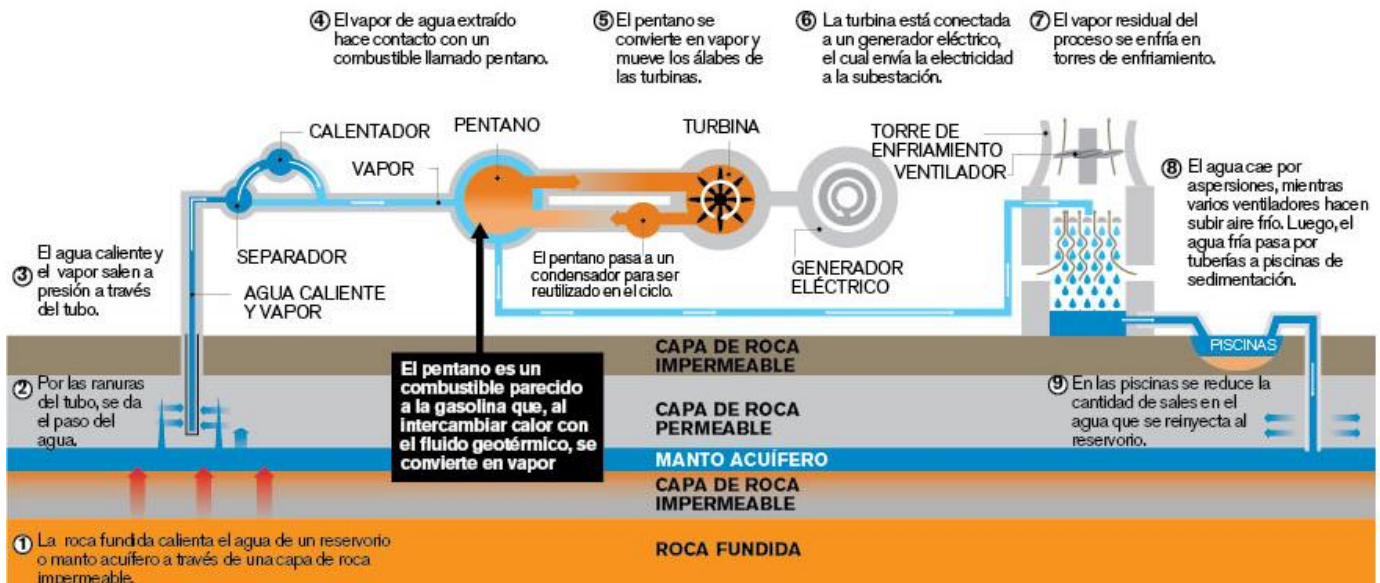


Ilustración 19. Funcionamiento de una central geotérmica.

Fuente. *Instituto Costarricense de Electricidad, 2016.*

Centrales Nucleoeléctricas

La producción de energía en una central nuclear sigue el mismo proceso de generación de energía eléctrica que una central que depende del ciclo Rankine, con la diferencia de que no requieren de un proceso de combustión para facilitar esta fase del ciclo. El vapor que se requiere para poner en marcha la turbina y ésta a su vez el generador, se obtiene a través del funcionamiento de un reactor nuclear. Un reactor nuclear es una instalación en la cual se puede iniciar y controlar una serie de fisiones nucleares auto-sostenidas. Estos dispositivos son utilizados como herramientas de investigación, como sistemas para producir isótopos radiactivos y

también como productores de energía eléctrica. Los reactores que producen energía eléctrica son comúnmente conocidos como reactores de potencia. La composición del reactor nuclear está formada por el combustible, el refrigerante, los elementos de control, los materiales estructurales y, en el caso de que se trate de un reactor nuclear térmico, el moderador⁴⁵.

El calor generado por la fisión se aprovecha mediante un refrigerante, el cual puede ser agua, sodio líquido, entre otros. Este fluido absorbe el calor emitido por las reacciones nucleares que se llevan dentro del reactor y permite generar vapor de agua mediante un sistema secundario y éste será el encargado de poner en movimiento la turbina al formar parte del ciclo Rankine. Es importante mencionar que esta forma de generación eléctrica ha evolucionado desde hace más de seis décadas, teniendo en cuenta la experiencia de construcción y operación de más de 434 reactores, haciendo que los sistemas de seguridad cada vez se vuelvan más estrictos, y la necesidad de explotar de mejor forma el uranio, por lo que se distinguen hasta ahora cuatro generaciones de reactores nucleares.

Los reactores de primera generación fueron los prototipos experimentales que demostraron que la producción de electricidad a partir de la fisión nuclear era factible a escala comercial.

Los reactores de segunda generación fueron los primeros en construirse como reactores comerciales, los cuales iniciaron operación a partir de la década de los setentas y fueron destinados para equipar la mayor parte de las plantas nucleoelectricas existentes.

Los reactores de tercera generación son aquellos que evolucionaron a partir de los anteriores. Estos reactores presentan mejoras considerables en aspectos de seguridad, tiempo de construcción, vida útil y aprovechamiento del combustible, reduciendo el volumen de los residuos radiactivos, y representando una potente

⁴⁵ Medio para disminuir la velocidad de los neutrones, lo cual propicia una reacción nuclear de fisión en cadena eficaz. La razón principal para efectuar este proceso de frenado de los neutrones es permitir la interacción de éstos con los átomos fisionables presentes en el combustible de un reactor nuclear.

opción en la actualidad de generación eléctrica económicamente competitiva y ambientalmente más amigable.

Los reactores de cuarta generación son una serie de proyectos, programas e iniciativas para el desarrollo y prueba de varios sistemas nucleares muy innovadores, que ofrecen ventajas muy marcadas con respecto a las centrales nucleares existentes. Actualmente, la mayoría se encuentran en fase de diseño y su desarrollo plantea grandes desafíos, sobre todo en temas de materiales y combustibles. Los reactores de esta generación parten de nuevos diseños, usando diferentes ciclos termodinámicos y con enfoque a aumentar la eficiencia térmica, la conservación y extensión de la disponibilidad de los recursos, la disminución de desechos nucleares, la no proliferación de armas nucleares, y la seguridad de la instalación con base en sistemas pasivos, tanto en condiciones de operación normal, como ante la presencia de eventos externos causados por fenómenos naturales extremos o ataques terroristas.

Hoy en día hay 438 reactores en operación alrededor del mundo, de los cuales más del 95% son reactores de segunda generación, siendo los más destacados los *Pressurized Light-Water-Moderated and Cooled Reactor (PWR)* y los *Boiling Light-Water-Cooled and Moderated Reactor (BWR)*.

[Pressurized Light-Water-Moderated and Cooled Reactor](#)

El reactor de agua presurizada conocido por sus siglas en inglés como PWR usa agua pura como refrigerante y moderador de neutrones. Un PWR se compone principalmente por dos sistemas de corrientes, las cuales son utilizadas para convertir el calor generado por la reacción nuclear en energía eléctrica. El primer sistema transfiere el calor del combustible reaccionante al generador de vapor, usando agua lo más pura posible. En el generador se encuentra el segundo sistema de corriente de agua, la cual al entrar en contacto con la primera, hierve y da lugar a una corriente de vapor (he aquí la diferencia con el BWR, donde el agua con la que modera y refrigera es la misma que pasa a ser vapor para generar electricidad), la cual es transferida a un sistema de turbinas que ponen en funcionamiento al

generador y de esta forma se puede generar electricidad. Después de este sistema, la corriente de vapor es llevada al condensador, donde otras líneas de agua fría intervienen para sustraer el exceso de calor y así condensar el vapor, para después ser llevado nuevamente al generador de vapor.

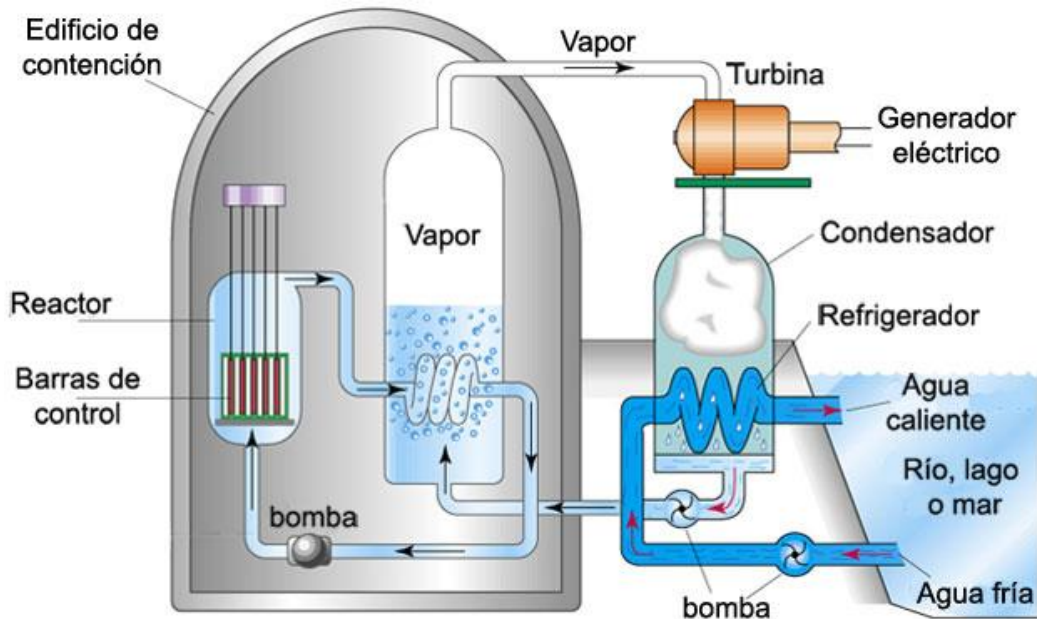


Ilustración 20. Diagrama del proceso de un reactor PWR.
Fuente. <http://energia-nuclear.net/>, 2014.

Boiling Light-Water-Cooled and Moderated Reactor

El reactor de agua en ebullición, mejor conocido como BWR por sus siglas en inglés, al igual que el reactor PWR, utiliza agua muy pura como enfriador y moderador, la cual hierve junto a los elementos combustibles, pero, esta tecnología no transfiere el calor generado a un segundo circuito de agua, siendo el vapor de agua formado en el núcleo del reactor el responsable de poner en funcionamiento el sistema de turbinas. Para ello, la mezcla agua-vapor resultante asciende hacia los separadores de vapor (localizados en la salida superior de la vasija), en donde el agua es separada de las burbujas de vapor, y retorna hacia el núcleo del reactor, repitiéndose la ebullición. Actualmente, México cuenta con sólo una central nucleoelectrónica ubicada en el estado de Veracruz, la cual produce electricidad mediante dos unidades de este tipo y su generación se considera dentro de la carga base.

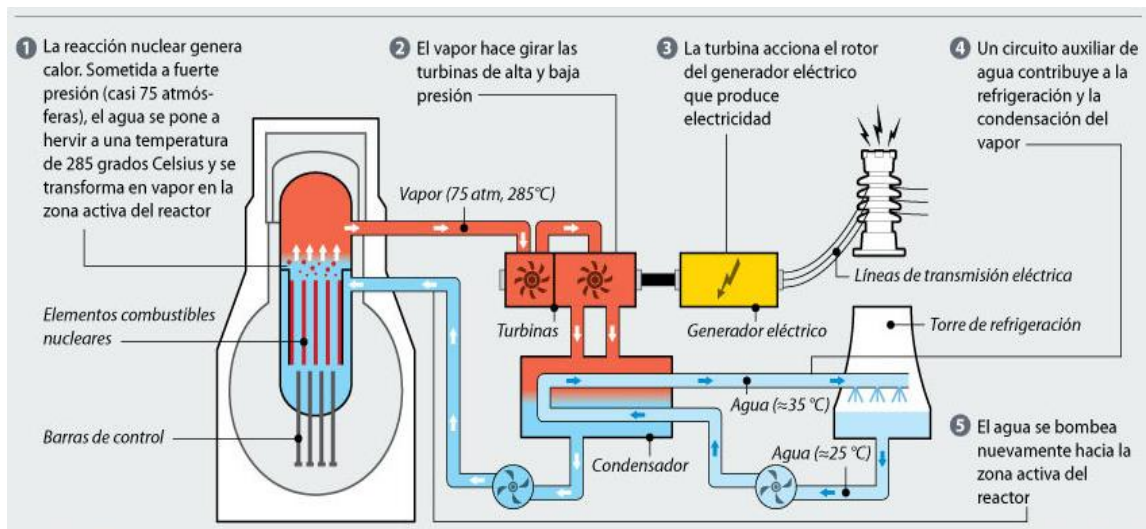


Ilustración 21. Diagrama del proceso de un reactor BWR.
Fuente. RIANOVOSTI, 2011.

Centrales de aprovechamiento de Bioenergía

La bioenergía es la energía derivada de la conversión de biomasa, dependiendo del origen de la misma se utilizan diferentes tecnologías. Por ejemplo, los residuos forestales o agrícolas se aprovechan mediante su combustión en una caldera doméstica o industrial para obtener energía calorífica. Los residuos agrícolas o animales son fermentados en biodigestores para obtener gas metano o alcoholes utilizables como biocombustible. También se pueden usar los residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios para extraer biogás y usarlo en centrales que consuman gas metano.

Este energético es explotado principalmente en los estados de Chihuahua, Durango, Nuevo León, San Luis Potosí, Aguascalientes, Jalisco, Estado de México, Veracruz y Tabasco. Puede ser usado dentro de la generación base y pico, lo cual depende del tipo de central donde es aprovechado energéticamente.

1.5 El Sector Eléctrico en México

Como se ha mencionado anteriormente, la energía eléctrica es un insumo primario para la realización de las actividades productivas y de transformación en nuestro país. Desde los inicios de la producción eléctrica mexicana en 1879, la necesidad de definición de un sector energético ha sido primordial para el efectivo funcionamiento del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), el cual es el sistema

encargado de generar y transmitir electricidad como servicio público a lo largo de México. Tras la aprobación de la Reforma Constitucional en materia de energía el 20 de diciembre de 2013, México dio un paso importante hacia la construcción de un sector energético mundialmente competitivo, a través de la ejecución de las acciones para la transformación de los organismos clave del sector, apertura para una mayor participación de la inversión productiva y mejores opciones para el consumidor⁴⁶.

Son tres los organismos clave del funcionamiento del sector eléctrico en México: La Secretaría de Energía (SENER), la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE). A continuación se resumen algunas de sus actividades más relevantes:

SENER

- Diseño de la política energética del país y planeación del SEN.
- Coordinación de la evaluación del desempeño del CENACE y del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM).
- Establecimiento de criterios y requisitos en materia de Certificados de Energía Limpia (CEL)⁴⁷.
- Coordinación y supervisión en la transformación de la CFE en empresa productiva del Estado.

CRE

- Regular y otorgar permisos de generación de electricidad y modelos de contratos de interconexión.
- Expedición y aplicación de la regulación tarifaria para la transmisión, distribución, operación de servicios básicos y el CENACE, entre otros.
- Emisión de las bases del MEM y vigilancia de su operación.

⁴⁶ Op. Cit. Secretaría de Energía (SENER), (2015). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2015-2029*. México.

⁴⁷ Instrumento de mercado que permite transformar en obligaciones individuales las metas nacionales de generación de electricidad limpia, de forma eficaz y al menor costo para el país.

- Verificar el cumplimiento de los requisitos en materia de CEL.
- Establecer requisitos para suministradores de usuarios calificados y llevar el registro de dichos usuarios.
- Expedición de la regulación en materia de eficiencia y calidad en el SEN.

CENACE

- Control operativo del SEN.
- Operador del MEM, revisión y actualización de las disposiciones operativas del mismo.
- Llevar a cabo subastas para la celebración de contratos de cobertura eléctrica entre los generadores y los representantes de los centros de carga⁴⁸.
- Instruir a transportistas y distribuidores en la celebración del contrato de interconexión de las centrales eléctricas o conexión de los centros de carga.
- Cálculo de las aportaciones que los interesados deberán realizar por la construcción, ampliación o modificación de redes cuando los costos no se recuperen⁴⁹.

El Sistema Eléctrico Nacional se conforma por:

- La red nacional de transmisión,
- Las redes generales de distribución,
- Las centrales eléctricas que entregan energía eléctrica a la red nacional de transmisión o a las redes generales de distribución, y
- Los equipos e instalaciones del CENACE utilizados para llevar a cabo el control operativo del sistema eléctrico nacional.

El SEN se divide en dos sectores: el público y el privado. El sector público se integra por la CFE y las centrales construidas por los Productores Independientes de Energía (PIE), estos últimos entregan la totalidad de su energía a CFE para el

⁴⁸ Instalaciones y equipos que, en un sitio determinado, permiten que un Usuario Final reciba el Suministro Eléctrico. Un Usuario Final.

⁴⁹ PricewaterhouseCoopers (2014). *Transformación del Sector Eléctrico Mexicano, Implicaciones de la Ley de la Industria Eléctrica y la Ley de la CFE*. México.

servicio público de energía eléctrica. Por otro lado, el sector privado agrupa las modalidades de cogeneración, autoabastecimiento, usos propios y exportación⁵⁰.

Para la correcta expansión del SEN el gobierno mexicano creó el MEM a través de la Ley de la Industria Eléctrica (LIE), el cual es operado por el CENACE, y los participantes de dicho mercado pueden realizar transacciones de compraventa de:

- Energía eléctrica,
- Servicios conexos que se incluyan en el MEM,
- Potencia o cualquier otro producto que garantice la suficiencia de recursos para satisfacer la demanda eléctrica,
- Los productos anteriores, vía importación o exportación,
- Derechos financieros de transmisión,
- Certificados de energías limpias, y
- Los demás productos, derechos de cobro y penalizaciones que se requieran para el funcionamiento eficiente del SEN.

Asimismo, las reglas del mercado establecen los requisitos mínimos para ser participante del mercado, determinan los derechos y obligaciones de éstos y definen los mecanismos para la resolución de controversias.

La CRE está facultada para autorizar al CENACE para llevar a cabo subastas a fin de adquirir potencia cuando lo considere necesario para asegurar la confiabilidad del SEN, determinar la asignación de los costos que resulten de dichas subastas y expedir protocolos para que el CENACE gestione la contratación de potencia en casos de emergencia.

El subastar en el MEM es un mecanismo por el cual les permite a las Entidades Responsables de Carga (ERC) cerrar contratos en forma competitiva y en condiciones de prudencia para satisfacer las necesidades de potencia, energía eléctrica acumulable y CELs. Estas entidades pueden participar en las subastas de

⁵⁰ Mendoza Rodríguez, C. *Viabilidad técnica-económica de una central solar termoeléctrica de colectores cilíndricos parabólicos para su implementación en México*. Tesis de Licenciatura para obtener el título de Ingeniero Eléctrico- Electrónico, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2011.

mediano y largo plazo, unilateral o bilateralmente mediante los contratos de suministrador⁵¹ :

- Suministrador de servicios básicos. Permisionario que ofrece el suministro básico⁵² a los usuarios de suministro básico⁵³ y representa en el MEM a los generadores exentos⁵⁴ que lo soliciten.
- Suministrador de servicios calificados. Permisionario que ofrece el suministro calificado⁵⁵ a los usuarios calificados⁵⁶ y puede representar en el MEM a los generadores exentos en un régimen de competencia.
- Suministrador de último recurso. Permisionario que ofrece el suministro de último recurso⁵⁷ a los usuarios calificados y representa en el MEM a los generadores exentos que lo requieran.
- Usuario calificado participante del mercado. Usuario final que cuenta con registro ante la CRE para adquirir el suministro eléctrico como participante del mercado o mediante un suministrador de servicios calificados⁵⁸.

Las subastas de mediano plazo tienen como propósito adquirir con anticipación la potencia y energía eléctrica que será consumida por los usuarios de suministro

⁵¹ Comercializador titular de un permiso para ofrecer el suministro eléctrico. Entiéndase entonces que un generador es un titular de uno o varios permisos para generar electricidad en Centrales Eléctricas, o bien, titular de un contrato de Participante del Mercado que representa en el MEM a dichas centrales o, con la autorización de la CRE, a las Centrales Eléctricas ubicadas en el extranjero

⁵² Suministro Eléctrico que se provee bajo regulación tarifaria a cualquier persona que lo solicite que no sea Usuario Calificado

⁵³ También entendido como Usuario Final, es toda persona física o moral que adquiere, para su propio consumo o para el consumo dentro de sus instalaciones, el suministro eléctrico en sus centros de carga, como participante del mercado o a través de un suministrador, lo cual se provee bajo regulación tarifaria a cualquier persona que lo solicite que no sea usuario calificado.

⁵⁴ Propietario o poseedor de una o varias Centrales Eléctricas que no requieren ni cuentan con permiso para generar energía eléctrica en términos de la LIE.

⁵⁵ Suministro Eléctrico que se provee en un régimen de competencia a los Usuarios Calificados

⁵⁶ Usuario Final que cuenta con registro ante la CRE para adquirir el Suministro Eléctrico como Participante del Mercado o mediante un Suministrador de Servicios Calificados

⁵⁷ Suministro Eléctrico que se provee bajo precios máximos a los Usuarios Calificados, por tiempo limitado, con la finalidad de mantener la Continuidad del servicio cuando un Suministrador de Servicios Calificados deje de prestar el Suministro Eléctrico

⁵⁸ Ley de la Industria Eléctrica (LIE), Diario Oficial de la Federación, México, DF., 11 de Agosto del 2014.

básico, a fin de reducir o eliminar su exposición a los precios de estos productos en el corto plazo.

Las subastas de largo plazo tendrán por objeto:

- Permitir a los suministradores de servicios básicos firmar contratos con el fin de satisfacer las necesidades de potencia, energía eléctrica acumulable y CELs de acuerdo con los requisitos establecidos por la CRE,
- Permitir a las demás ERC participar en ellas cuando así lo decidan y una vez que se establezca la cámara de compensación, a fin de celebrar contratos para cantidades de productos en proporción al portafolio de potencia, energía eléctrica acumulable y CELs que se llegue a obtener para los suministradores de servicios básicos, y,
- Permitir a quienes cuenten con estos contratos, en calidad de vendedores, contar con una fuente estable de pagos que contribuya a apoyar el financiamiento de las inversiones eficientes requeridas para desarrollar nuevas centrales eléctricas o para repotenciar las existentes⁵⁹.

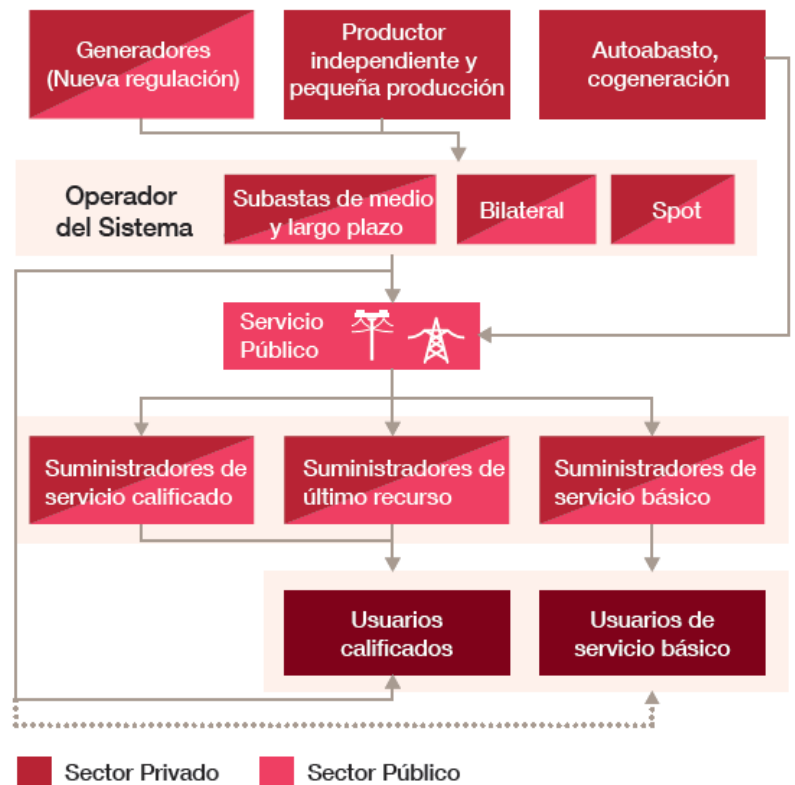


Ilustración 22. Modelo del sector eléctrico.
Fuente. PwC, 2015.

En la Ilustración 22 se muestra resumidamente el modelo actual del sector eléctrico mexicano, iniciando por los componentes del SEN y finalizando con la entrega de la demanda a los distintitos tipos de usuarios.

⁵⁹ Centro Nacional de Control de Energía (2016). *Subastas a Largo Plazo*. [online] Disponible en: <http://www.cenace.gob.mx/paginas/publicas/MercadoOperacion/Subastas.aspx> [Consultado 20 Apr. 2016].

Hablando sobre el funcionamiento del SEN es necesario dejar en claro que este sistema sólo maneja un producto: corriente eléctrica medida en kWh. Este producto es generado en las centrales eléctricas, definido como el trabajo realizado en horas (h) por una máquina de potencia (kW). Una vez producida la corriente en el generador, es adecuada en un transformador eléctrico implantado dentro de la central para después conducirla a la red. En la red, la corriente se sigue adecuando en estaciones transformadoras para transportarse a largas distancias rumbo a los centros de consumo mediante las líneas de transmisión de alta o media tensión. Al llegar al sitio de consumo, se vuelve a adecuar en otras subestaciones para su distribución en baja tensión. La última etapa es su comercialización a los millones de usuarios.

En el 2014 el SEN contaba con una capacidad instalada de 65,451.8 MW, distribuidas en las modalidades mostradas en el gráfico 1:

La Comisión Federal de Electricidad (CFE), en el presente, proporciona el servicio de energía eléctrica a 39.8 millones de clientes, de los cuales el 88.58% se agrupan en el sector doméstico, el 0.32% en el agrícola, 0.79% en el industrial, 9.80% en el comercial y el 0.51% restante, en el de servicios⁶⁰.

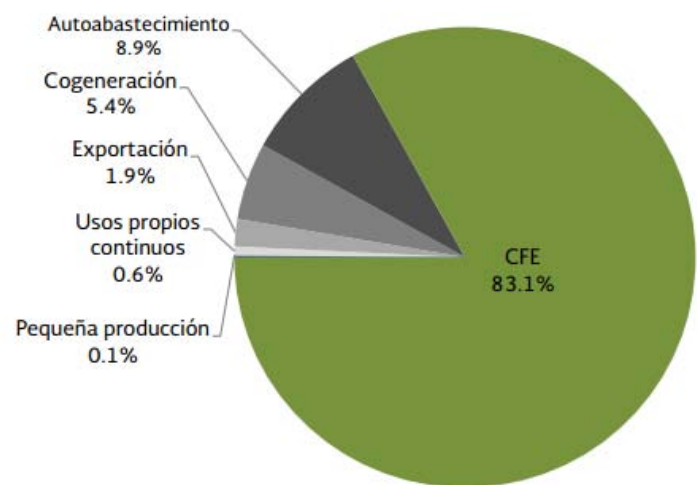


Gráfico 1. Capacidad instalada del SEN por modalidad.
Fuente. CFE, 2015.

No hay forma de almacenar la electricidad generada masivamente y su demanda en general es variable a lo largo de horas, aunque el patrón de esta variación es bastante repetitivo a lo largo de los días, pero puede cambiar significativamente entre estaciones del año dependiendo sobre todo del nivel económico de la región.

⁶⁰ Comisión Federal de Electricidad (2016). *Clientes*. [online] Disponible en: http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/Estadisticas/Paginas/clientes.aspx [Consultado 22 Apr. 2016].

Para cubrir la demanda, los centros de control de las distintas regiones del SEN ordenan la incorporación y desincorporación de diferentes unidades de generación a lo largo del día para satisfacer la demanda variable de los usuarios. El criterio para el despacho es minimizar los costos variables⁶¹ de la generación de energía eléctrica; así se despachan primero las unidades generadoras de menor costo variable. Las unidades que operan para satisfacer la demanda mínima del día y que operan las 24 horas corresponden a la llamada “generación o carga base”. Por encima de ésta, le sigue lo que se llama la "generación medio pico", que opera una parte del día. Finalmente, se insertan las unidades para satisfacer la demanda que tiene mayor excedencia y es llamada “generación pico”, las cuales sólo trabajan una pequeña fracción del día, ya que el costo del kWh que generan estas últimas unidades, el cual incluye el costo del financiamiento, suele ser muy alto, del orden de cinco a seis veces el costo de la generación base⁶².

Para tener un eficaz despacho eléctrico, la infraestructura del SEN se integra por 10 regiones de control que están interconectadas entre sí (Ilustración 23). A su vez la operación de estas regiones queda a cargo de 9 centros de control ubicados en las ciudades de México, Puebla, Guadalajara, Hermosillo, Gómez Palacio, Monterrey, Mexicali, Santa Rosalía y La Paz. Todas ellas se encuentran coordinadas por el CENACE, en lo que respecta a su despacho económico y a una operación segura y confiable.

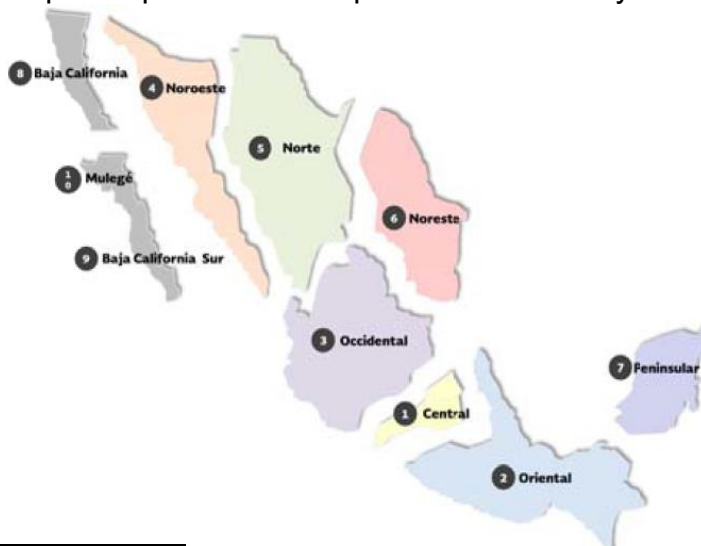


Ilustración 23. Regiones de control del SEN.
Fuente. CFE, 2015.

⁶¹ Costos de operación y mantenimiento que es función de la cantidad de energía producida.

⁶² Energía a Debate (2014). *El sector eléctrico, de monopolio a mercado competitivo* [online] Disponible en: <http://energiaadebate.com/el-sector-electrico-de-monopolio-a-mercado-competitivo/> [Consultado 23 Abr. 2016].

La integración regional del SEN ha permitido grandes ahorros en la generación de energía eléctrica, así como beneficios locales al evitar afectaciones. Una de las ventajas operativas de que las regiones estén interconectadas, es que pueden compartir recursos de capacidad y lograr un funcionamiento más económico y estable del sistema en su conjunto. Por último, es significativo comentar que México está dentro de las 20 economías de mayor producción energética, alcanzando en el 2014 el décimo tercer lugar en la producción de kWh⁶³, al totalizar en ese mismo año, una producción anual total de energía primaria de 2,451.71 TWh, de acuerdo con el Balance Nacional de Energía (BNE) 2014.

⁶³ Index Mundi (2016). *Electricidad - producción por país - Mapa Comparativo de Países - Mundo*. [online] Disponible en: <http://www.indexmundi.com/map/?v=79&l=es> [Consultado 20 Abr. 2016].

Capítulo 2. La Contaminación Ambiental

En los dos últimos siglos, la formulación de tecnología y la explotación de los recursos ambientales han contribuido potencialmente en el desarrollo económico y social alrededor del mundo. Lamentablemente uno de sus resultados es el creciente deterioro de nuestro entorno, a causa del excesivo uso de estos recursos y la emisión desmedida de contaminantes ambientales. Ante la creciente concentración de estos contaminantes, actualmente no existe manera de removerlos inmediatamente de nuestro medio ambiente, relacionándose directamente con nuestros requerimientos básicos, lo cual aumenta la afectación de diversos ecosistemas y contribuyen en la extinción de especies.

A medida que la concentración de los contaminantes ambientales aumenta, más inhabitable se vuelve nuestro hábitat, perjudicándonos de diversas formas. Las más comunes son al aumentar la probabilidad de desarrollar enfermedades respiratorias, problemas cardiovasculares, apendicitis, trastornos neurológicos, manifestaciones cancerígenas y alteraciones genéticas⁶⁴.

La contaminación ambiental se define como la presencia de un elemento, energía u organismo extraño que en cantidad suficiente, en el lugar inadecuado y en el momento inoportuno, es capaz de provocar, en forma directa o indirecta, mediata o inmediata, un desequilibrio ecológico⁶⁵, afectando directamente al ambiente y a la biota existente en él. Esta contaminación puede producirse naturalmente o por acciones antropogénicas⁶⁶ y pueden estar en cualquier fase (sólida, líquida o gaseosa).

⁶⁴ Sistemas, N. (2016). *Contaminación ambiental* [online] Inspiraction.org. Disponible en: <https://www.inspiration.org/cambio-climatico/contaminacion/tipos-de-contaminacion/contaminacion-ambiental> [Consultado 25 Abr. 2016].

⁶⁵ La alteración de las relaciones de interdependencia entre los elementos naturales que conforman el ambiente, que afecta negativamente la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos.

⁶⁶ Acciones hechas por el hombre que tienen una repercusión en el ambiente al emitir uno o más contaminantes, ya sea por actividades industriales, domésticas o agrícolas.

Los tipos de contaminación más importantes son los que afectan a los recursos naturales básicos: el aire, los suelos y el agua. Existen diferentes tipos de contaminación, los cuales dependen de determinados factores que afectan distintamente al ambiente. El crecimiento exagerado de la población y la expansión masiva de los centros urbanos en las últimas décadas han llevado a las principales actividades humanas⁶⁷ a contribuir cada vez más a las emisiones de estos contaminantes, siendo el mismo aumento de la población el que no ha permitido lograr una regulación exacta e impide la aceleración de acciones para contrarrestar estas emisiones.

2.1 El Impacto Ambiental

El impacto ambiental se define como la “modificación del ambiente ocasionado por la acción del hombre o de la naturaleza” (Ley Ambiental del Distrito Federal, 2000) y se presenta cuando una acción o actividad produce una alteración favorable o desfavorable en el medio ambiente o en alguno de sus componentes. El estudio de un impacto ambiental evalúa las diferencias entre la situación del ambiente en el presente y la del futuro, presentando atención en su proceso evolutivo cuando la acción que los origina se desarrolla. Estos impactos pueden producirse a corto o a largo plazo, pueden tener una corta o larga duración y también pueden ser bioacumulativos, irreversibles o inevitables.

Tradicionalmente, los tipos de impacto ambiental se clasifican por sus atributos y alcances, como carácter, duración, magnitud y reversibilidad, entre otros. Así, podemos mencionar las siguientes categorías⁶⁸:

- Impacto negativo o positivo. En términos del efecto resultante en el ambiente, toma en cuenta si los resultados de una acción terminan perjudicando o beneficiando al mismo.

⁶⁷ Actividades industriales, comerciales, agrícolas, domiciliarias y móviles.

⁶⁸ Enciclopedia de Tipos (2016). *Tipos de impacto ambiental*. [online] Disponible en: <http://www.tiposde.org/ciencias-naturales/763-tipos-de-impacto-ambiental/> [Consultado 2 May 2016].

- Impacto cierto, probable, improbable o desconocido. Alude a la probabilidad de ocurrencia de algún impacto.
- Impacto actual y potencial. Refiere a los efectos sobre el ambiente como ciertos e inmediatos o a la posibilidad de que ocurran en otro momento.
- Impacto directo (o primario) e indirecto (o secundario). Define la existencia de un vínculo directo entre la acción ejercida y el impacto ambiental, o si la acción impacta sobre un primer componente del ambiente y éste, a su vez, impacta en un segundo. El ejemplo de un impacto directo es la afectación del recurso suelo por derrames industriales, de un impacto indirecto es la afectación de la calidad del suelo por tala indiscriminada.
- Impacto acumulativo. Especifica si los resultados del impacto ambiental se agravan de manera progresiva conforme transcurre el tiempo. Esto a menudo sucede porque no existen mecanismos de disipación del daño.
- Impacto temporal (o reversible) o permanente (o irreversible). Hace referencia a la posibilidad de que el ambiente impactado retorne a sus condiciones originales.
- Impacto sinérgico. Ocurre cuando la presencia simultánea de varios contaminantes o el impacto de varias acciones ocasionan una alteración en el ambiente y su efecto excede al de las incidencias individuales.
- Impacto residual. Nombre que se le asigna al impacto que perdura aun después de haber aplicado medidas de mitigación o saneamiento.
- Impacto local, regional y global. Clasificación que indica el alcance espacial que resulta impactado.

La planeación y realización de un proyecto productivo se fundamenta en el desarrollo de cuatro etapas: selección, construcción, operación y abandono del sitio. Con respecto al impacto ambiental, cada una de esas etapas deben ser valoradas según las actividades o procesos que las compongan. Así la gestión ambiental⁶⁹, estudia el nivel de todos los tipos de impacto que éstos generen, tomando en cuenta las afectaciones bióticas y abióticas, así mismo el impacto en el nivel

⁶⁹ Conformada por un conjunto de acciones encaminadas a lograr la racionalidad en el proceso de decisión relativo a la conservación, defensa, protección y mejora del ambiente

socioeconómico, el paisaje, entre otros. Una vez identificados se proceda a establecer medidas preventivas o de mitigación con respecto a cada uno de los impactos negativos encontrados⁷⁰.

La Evaluación del Impacto Ambiental (EIA), es el procedimiento que surge del estudio de impacto ambiental y a través del cual se establecen las condiciones a las que se sujetará la realización de obras y actividades que puedan causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente y para preservar y/o restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el medio ambiente.

En consecuencia, la EIA es un estudio realizado para identificar, producir e interpretar, así como prevenir las consecuencias o efectos ambientales que determinadas acciones, planes, programas o proyectos pueden causar a la salud, al bienestar humano y al medio ambiente, en donde la calidad ambiental es la meta. Por lo tanto la EIA, es concebida como un instrumento de la política ambiental, analítico y de alcance preventivo, que permite integrar al ambiente un proyecto o una actividad determinada. En esta concepción el procedimiento ofrece un conjunto de ventajas al ambiente y al proyecto, invariablemente esas ventajas sólo son apreciables después de largos períodos de tiempo y se concretan en las inversiones y en los costos de las obras, en diseños más eficientes e integrados al ambiente y en una mayor aceptación social de las iniciativas de inversión. A través de este instrumento se plantean opciones de desarrollo que sean compatibles con la preservación del medio ambiente y manejo de los recursos naturales.

El objetivo de la evaluación del impacto ambiental es la sustentabilidad: equilibrio existente entre una especie con los recursos del entorno al cual pertenece. Para que un proyecto sea sustentable debe considerar, además de la factibilidad

⁷⁰ Yáñez Vargas, A. (2008). *Impacto Ambiental y Metodologías de Análisis*. 1st ed. [ebook] México. Disponible en: <http://www.iztacala.unam.mx/biocyt/volumenes/volumen%201/biocyt1%207-15.pdf> [Consultado 2 May 2016].

económica y el beneficio social, el aprovechamiento razonable de los recursos naturales.

Para la realización definitiva de cualquier proyecto productivo, el gobierno mexicano, a través de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), exige a los líderes del mismo la realización de estudios de impacto ambiental, en los cuales se analicen y describan las condiciones ambientales anteriores a la realización del proyecto, con la finalidad de demandar herramientas metodológicas adecuadas para prevenir o mitigar cualquier impacto potencial que la construcción y operación de dichas obras o la realización de las actividades podrían causar al ambiente, haciendo obligatorio el definir y proponer las medidas necesarias para prevenir, mitigar o compensar esas alteraciones en el menor tiempo posible. Los resultados de estos estudios son entregados en el Manifiesto de Impacto Ambiental (MIA), el cual tiene diferentes modalidades dependiendo del carácter del proyecto a desarrollar⁷¹.

Los proyectos productivos que necesitan presentar este manifiesto pueden ser de carácter regional, estatal o municipal, y se centran en materia de desarrollo urbano, turístico, de vivienda, agropecuarios, sectoriales de industria, de centros de población, así como aquellos que promuevan las actividades económicas o prevean el aprovechamiento masivo de los recursos naturales del estado.

En la industria eléctrica, la exigencia de realización de una MIA es obligatoria en:

- La construcción de centrales nucleoelectricas, hidroelectricas, carboelectricas, geotermoelctricas, eoloelctricas o termoelctricas, convencionales, de ciclo combinado o de unidad turbogas, con excepci3n de las plantas de generaci3n con una capacidad menor o igual a medio MW, utilizadas para respaldo en residencias, oficinas y unidades habitacionales,

⁷¹ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2016). *Definici3n y Objetivo*. [online] Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/impacto-ambiental-y-tipos/definicion-y-objetivo> [Consultado 2 May 2016].

- Construcción de estaciones o subestaciones eléctricas de potencia o distribución,
- Obras de transmisión y subtransmisión eléctrica, y
- Plantas de cogeneración y autoabastecimiento de energía eléctrica mayores a 3 MW.

Con la excepción de obras que no requerirán autorización en materia de impacto ambiental cuando se traten de construcciones de (sub)estaciones u obras de (sub)transmisión y que pretendan ubicarse en áreas urbanas, suburbanas, de equipamiento urbano o de servicios, rurales, agropecuarias, industriales o turísticas⁷².

2.2 La Contaminación Atmosférica

Se le da el nombre de atmósfera a la capa gaseosa de 200 kilómetros de espesor que rodea la Tierra. Esta capa ha necesitado miles de millones de años para alcanzar su actual composición y estructura, haciéndola apta para la respiración de los seres vivos que la habitan y es uno de los componentes más importantes de protección terrestre, ya que constituye el principal mecanismo de defensa de las distintas formas de vida al proteger a los seres vivos de los efectos nocivos de las radiaciones solares ultravioleta, gracias a la acción del ozono y el oxígeno en la misma, que actúan como filtro absorbiendo la mayor parte de estas radiaciones.

⁷² SEMARNAT. *Obras y/o Actividades que Requieren MIA, Rama Productiva: Industria Eléctrica*. (2013). 1st ed. [ebook] México. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/transparencia/transparenciafocalizada/Documents/electrica.pdf> [Consultado 3 May 2016].

La atmósfera se divide en varias capas, las cuales son definidas a través de la distribución de temperaturas en función de la altura, siendo distintas en su composición química, propiedades magnéticas y eléctricas. Esta forma de definir las se adapta adecuadamente en el estudio de impacto ambiental originado por la contaminación atmosférica. Según esta clasificación se distinguen en la atmósfera, de abajo hacia arriba, las siguientes capas: troposfera, tropopausa, estratosfera, estratopausa, mesosfera, mesopausa y termosfera⁷³.

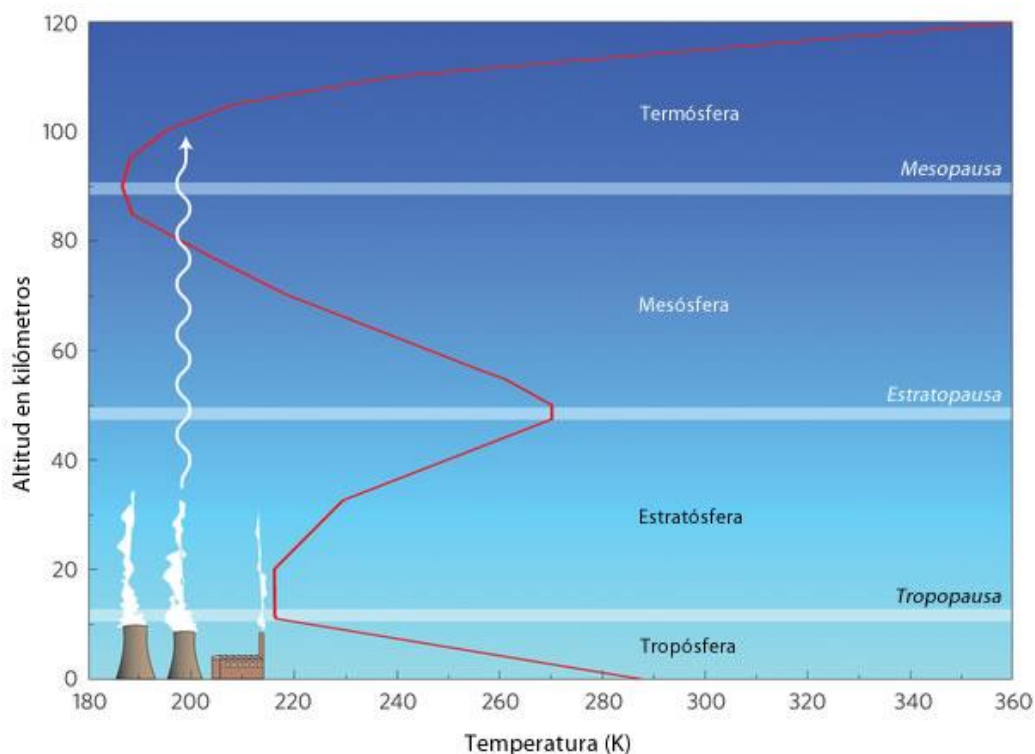


Ilustración 24. Composición por altitud y temperatura de la atmósfera.

Fuente. Nature geoscience, 2015.

La contaminación atmosférica se define como la presencia de partículas o energía en el aire que puede implicar un riesgo, daño o desagrado, al corto o mediano plazo, grave para animales y plantas de cualquier hábitat, así como representar un daño o desgaste de materiales, reducción de visibilidad o producción de olores desagradables. Este tipo de contaminación incluye elementos de origen natural y emisiones resultantes de actividades humanas. Los contaminantes atmosféricos

⁷³ Craco.galeon.com. (2016). *Índice 1*. [online] Disponible en: <http://craco.galeon.com/ecologi.html> LA ATMÓSFERA [Consultado 2 May 2016].

pueden ser compuestos gaseosos, aerosoles o material particulado. Los principales mecanismos de contaminación atmosférica son los procesos industriales, automotrices o de calefacción de espacios que implican la combustión de algún combustible, generando monóxido y dióxido de carbono (CO y CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO₂), entre otros contaminantes. Estos procesos también pueden emitir partículas suspendidas (PM) y estructuras complejas ligeras altamente tóxicas como los compuestos orgánicos volátiles (COVs), metales e hidrocarburos.

Por ello, la evaluación del impacto potencial que sobre la atmósfera pueden tener las emisiones provenientes de una fuente o conjunto de fuentes, así como el diseño de estrategias costo-efectivas orientadas a su control, demanda un conocimiento preciso de los procesos que determinan la dispersión, la transformación química y el destino final de los contaminantes en la atmósfera.

Como se ha mencionado anteriormente, toda organización, empresa o actividad industrial puede impactar negativamente al medio ambiente a través de sus actividades, productos o servicios. Esto incluye no sólo la extracción, explotación y procesamiento de los recursos naturales que el ambiente provee, sino la producción y acumulación de residuos o desechos que resultan de tales actividades y que, dependiendo de las condiciones y lugares en los que son eliminados, pueden ocasionar mayores impactos ambientales. Las fuentes de contaminación son aquellas que dan origen a las mismas y en general se categorizan en dos grupos: en fuentes fijas⁷⁴ y móviles⁷⁵.

1. Fuentes fijas.

Existen tres tipos de fuentes fijas generadoras de emisiones:

⁷⁴ Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2016). *Fuentes de contaminación del aire*. [online] Disponible en: <http://www.inecc.gob.mx/calibre-informacion-basica/537-calibre-fuentes> [Consultado 27 Abr. 2016].

⁷⁵ Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2016). *Instituto Nacional de Ecología*. [online] Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/396/tipos.html> [Consultado 5 May 2016].

- Fuentes puntuales: Se refieren a fuentes de punto fijo o estacionario, donde los contaminantes llegan al medio ambiente desde un punto definido y muy claro de identificar por su ubicación geográfica. Este punto de origen se puede determinar con anterioridad a la alteración del ecosistema. Ejemplo de ellos son las plantas de energía eléctrica y de actividades industriales como son la química, textil, alimentaria, maderera, metalúrgica, metálica, manufacturera y procesadora de mercancías vegetales y animales, entre otras. Según la industria o proceso específico, las fuentes estacionarias pueden emitir uno o varios contaminantes aéreos, además de muchos otros contaminantes peligrosos.

Las emisiones derivadas de la combustión utilizada para la generación de energía o vapor, dependen de la calidad de los combustibles y de la eficiencia de los quemadores, mantenimiento del equipo y de la presencia de equipo de control al final del proceso (filtros, precipitadores y lavadores, entre otros). Los principales contaminantes asociados a la combustión son las PM, el SO₂, gases de efecto invernadero (GEI), los NO_x, el CO y CO₂ e hidrocarburos (HC). Hablando particularmente de las centrales eléctricas, la tendencia internacional para disminuir las emisiones contaminantes de este tipo de fuentes, en gran medida, está dirigida a la adopción de tecnologías más limpias a través del uso de energías renovables o nuclear y la implantación de medidas cada vez más efectivas para elevar la eficiencia energética de los procesos, siendo prioritario en los que usen energéticos no renovables, y mejorar la calidad de los combustibles, entre otras. Y en menor medida, la instalación de dispositivos de control y reducción de las emisiones de las chimeneas industriales.

- Fuentes de área o difusas: Serie de fuentes pequeñas, numerosas y dispersas, que no pueden ser incluidas de manera eficiente en un inventario de fuentes puntuales, pero que en conjunto pueden afectar la calidad del aire en una región, por ejemplo: la generación de emisiones inherentes a actividades y procesos tales como el consumo de solventes, limpieza de superficies y equipos, recubrimiento de superficies arquitectónicas, industriales, lavado en seco, artes gráficas, panaderías, distribución y almacenamiento de gas LP,

principalmente. Esta fuente también incluye las emisiones de actividades como son el tratamiento de aguas residuales, plantas de composteo, rellenos sanitarios, entre otros.

- Fuentes naturales: Además de las actividades humanas, los fenómenos naturales y la vida animal y vegetal pueden jugar un papel importante en el problema de la contaminación del aire. Se refiere a la generación de emisiones producidas por volcanes, océanos, plantas, suspensión de suelos, emisiones por digestión anaerobia y aerobia de sistemas naturales. En particular es todo aquello emitido por la vegetación y la actividad microbiana en suelos y océanos, que se denomina emisiones biogénicas, cuyo papel es importante en la química de la troposfera al participar directamente en la formación de ozono. Las emisiones biogénicas incluyen el óxido de nitrógeno, hidrocarburos no metanogénicos, metano, dióxido y monóxido de carbono y compuestos nitrogenados y azufrados.

2. Fuentes móviles.

Ejemplos de fuentes móviles son los aviones, helicópteros, ferrocarriles, tranvías, tractocamiones, autobuses, camiones, automóviles, motocicletas, embarcaciones, equipo y maquinarias no fijas con motores de combustión y similares, que por su operación generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera.

Al igual que los impactos ambientales, resulta muy útil distinguir a los contaminantes en dos grandes grupos, con el criterio de si han sido emitidos directamente a la atmósfera por fuentes de emisión, como los automóviles, las chimeneas de la industria, entre otros, o si se han formado en la atmósfera.

Así, tenemos:

- Contaminantes primarios. Aquellos procedentes directamente de las fuentes de emisión, como: GEI, CO, SO_x, NO_x, HC, PM, metales, entre otros.
- Contaminantes secundarios. Aquellos originados en el aire por la interacción entre dos o más contaminantes primarios, o por sus reacciones con los componentes naturales de la atmósfera. Por ejemplo, : ozono (O₃), peroxiacetil-

nitrate (PAN), hydrocarbons (HC), sulfates (SO₄), nitrates (NO₃), sulfuric acid (H₂SO₄), particulate matter (PM), among others⁷⁶.

Once in the atmosphere, pollutants undergo complex processes of transport, mixing and chemical transformation, which give rise to a spatial and temporally variable distribution, both in terms of their concentration, as well as in terms of their composition in the air. Thus, once emitted, pollutants are subjected to transport processes by advection⁷⁷, transport by diffusion, chemical transformation and dry or wet deposition, and are affected, to a greater or lesser degree, by the meteorological conditions that prevail during their emission. Illustration 25 shows in a schematic way these processes, which are described briefly in the subsequent paragraphs.

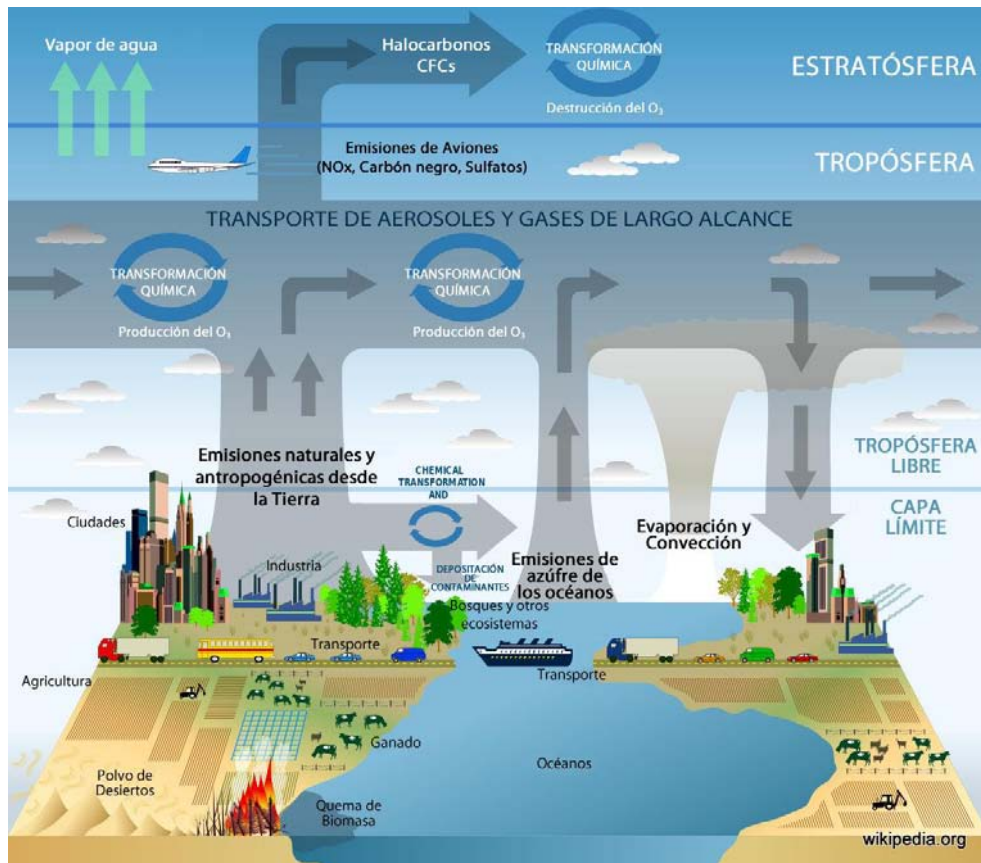


Ilustración 25. Diagrama de las sustancias químicas y procesos de transporte relacionados con la composición de la atmósfera. Fuente: Philippe Rekacewicz, 2002.

⁷⁶ Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2016). *Contaminantes primarios y secundarios*. [online] Disponible: <http://www.inecc.gob.mx/calair-info-basica/525-calair-cont-primarios-secundarios> [Consultado 30 Abr. 2016].

⁷⁷ Cuando el transporte de los contaminantes se da con la misma velocidad y en la misma dirección que el viento que los transporta, se le conoce como transporte por advección.

La dispersión de los contaminantes emitidos depende de la cantidad de turbulencia en la atmósfera cercana, turbulencia que se puede crear por el movimiento horizontal (viento) y vertical de la atmósfera. Por lo general, una mayor velocidad del viento reduce las concentraciones de los contaminantes al nivel del suelo, ya que facilita su dilución.

Al transporte y la dispersión de los contaminantes por efecto del movimiento vertical de la atmósfera se le conoce como transporte por difusión, y puede ser de tipo molecular o turbulento. El primero se refiere al movimiento de las moléculas en el aire por diferencias de concentración entre dos puntos del espacio (gradiente de concentraciones), y tiene poca importancia para fines del estudio de la contaminación del aire. El segundo se debe básicamente a la existencia de remolinos en el aire, que se producen por irregularidades en el terreno (turbulencia mecánica) o por diferencias de temperatura entre las capas atmosféricas (turbulencia térmica).

La turbulencia mecánica se produce por la fricción de las masas de aire en movimiento con la superficie terrestre, y puede afectar a una capa de aire de hasta 1000 metros de altitud. La turbulencia térmica, por su parte, se genera por el intercambio de calor entre la atmósfera y la superficie terrestre. Ambos procesos contribuyen al movimiento vertical de las masas de aire y definen las condiciones de estabilidad atmosférica.

La contaminación atmosférica es un problema característico de las grandes ciudades causada principalmente por el desarrollo urbano, industrial y demográfico, los cuales demanda el uso de bienes y servicios, con la consecuente generación de emisiones contaminantes a la atmósfera. Para que las diferentes economías pudieran tener una medida de la contaminación que emiten día a día, se generó otra clasificación que se basa en la identificación de la concentración de los contaminantes más perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos. Para fines de este trabajo sólo fueron estudiadas las emisiones de gases de efecto invernadero.

2.3 Efectos de la Contaminación Atmosférica

Afectación a los ciclos biogeoquímicos

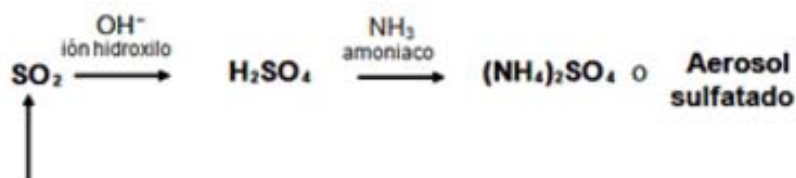
La atmósfera es un sistema extremadamente complejo y reactivo, donde la composición química de la misma depende de procesos naturales que reciclan numerosos elementos químicos en sus diferentes estados, los cuales proceden del medio ambiente donde habita la biota y son dispersos naturalmente al ambiente abiótico atmosférico, y viceversa. Estos procesos son conocidos como cíclicos biogeoquímicos y son los responsables del movimiento y transformación de los elementos de la naturaleza por medio de reacciones químicas y actividad biológica, interconectándose al ser parte unos de otros. Gracias a los ciclos biogeoquímicos, el equilibrio de la producción de estructuras químicas que componen los insumos básicos para la existencia de la biota se encuentran disponibles para ser usados por la misma sin límite alguno, por lo que la estabilidad de estos ciclos es primordial para la evolución de los organismos existentes en la Tierra y su alteración podrían originar serios problemas. Los ciclos más importantes son los encargados de procesar y reciclar el carbono, nitrógeno, azufre, oxígeno y el agua⁷⁸.

Como resultado del acelerado crecimiento de la actividad industrial y productiva desde el siglo XIX, y la poca consideración del impacto ambiental originado por este crecimiento, no puede negarse el hecho de que los ciclos biogeoquímicos han sido afectados en cierta medida al transportar contaminantes a la atmósfera e incluirlos a su ciclo, alterando el equilibrio existente en torno a ellos y modificando la composición química de la atmósfera.

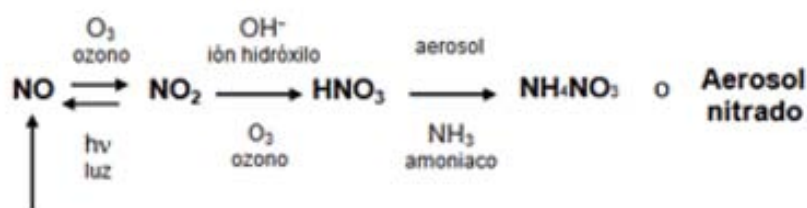
Contribuyendo a este problema, el transporte de contaminantes a la atmósfera conduce a la formación de contaminantes secundarios por la transformación química de los primarios. Un ejemplo es la formación de partículas sulfatadas, la cual inicia con las emisiones primarias de SO_2 que reaccionan con los radicales hidroxilo ($\text{OH}\cdot$) presentes en la atmósfera y, después de varias reacciones en las

⁷⁸ En el Apéndice 3 es expuesta la información sobre los diferentes ciclos biogeoquímicos.

que participan otros radicales libres, se forma ácido sulfúrico (H_2SO_4). Éste, en presencia de amoníaco, se neutraliza y forma partículas de sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$). También puede adherirse a algún aerosol presente en la atmósfera y sulfatarlo. El proceso químico que las emisiones de este contaminante desarrolla en la atmósfera se muestra a continuación.



Otro ejemplo es la formación de partículas de nitrato, que al igual que las partículas sulfatadas, su generación inicia con las emisiones primarias de monóxido de nitrógeno (NO) y después entra rápidamente en un proceso de oxidación por el O_3 presente en la atmósfera para formar dióxido de nitrógeno (NO_2). Una vez formado, el NO_2 puede reaccionar con radicales hidroxilo (OH^-) o con el O_3 , ambos presentes en la atmósfera, para formar ácido nítrico (HNO_3). Este ácido tiene dos vías alternas de reacción: en una puede unirse al amoníaco para formar partículas de nitrato de amonio (NH_4NO_3), y en la otra, combinarse con algún aerosol presente en la atmósfera y nitrarlo.



Si bien la transformación química de los contaminantes es un factor importante para determinar su estado final en la atmósfera, también lo es la remoción física en la superficie de la Tierra de la mayoría de estos contaminantes. En general, tanto gases como partículas pueden depositarse sobre la superficie a través de los procesos de remoción seca y remoción húmeda, dependiendo de la fase en que el contaminante haga contacto con la superficie y sea adsorbido o absorbido por ésta.

Cuando un contaminante es disuelto en el agua contenida en una nube, y precipita con la lluvia, niebla o nieve, o sea, con las gotas que impactan la superficie de la Tierra (incluyendo pasto, árboles, edificios, etc.), se dice que el contaminante fue removido por vía húmeda. Por el contrario, si el contaminante se transporta a nivel del suelo y se absorbe o adsorbe por los materiales sin que antes se haya disuelto en las gotas de agua de la atmósfera, entonces se trata de remoción seca. Esto es, la distinción entre los dos procesos se refiere al mecanismo de transporte a la superficie y no a la naturaleza de la superficie misma (ver Ilustración 26). Otra forma de remoción seca es la sedimentación (atracción gravitacional) de los contaminantes.

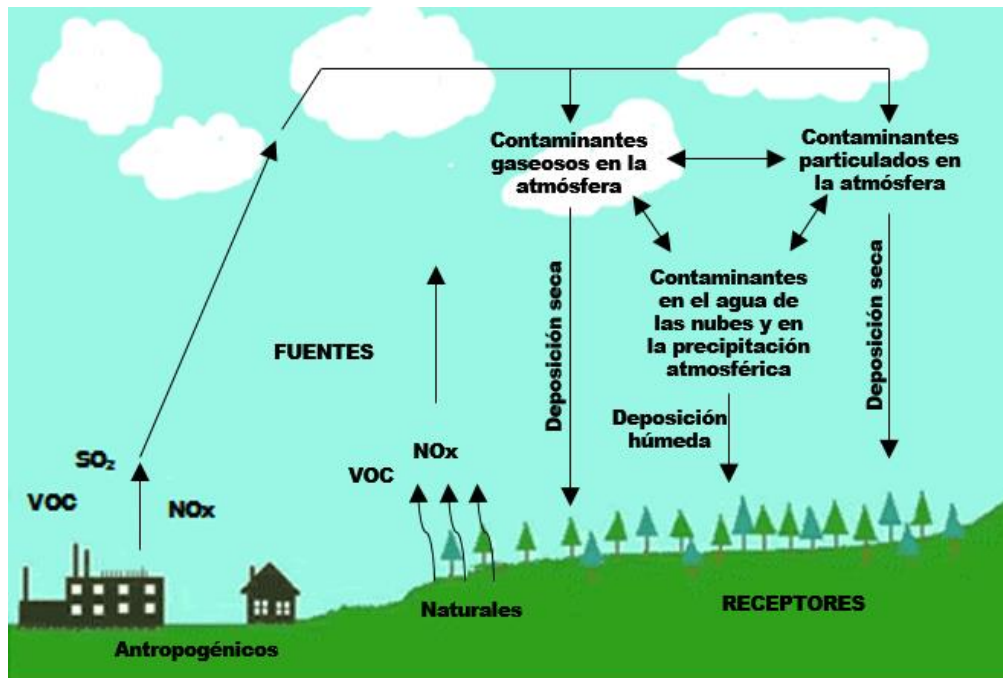


Ilustración 26. Representación esquemática de la remoción húmeda y la remoción seca de contaminantes.

Fuente. Zuk, Garibay, et al., 2006.

De acuerdo con lo anterior, los factores que determinan la importancia relativa del mecanismo mediante el cual se remueven los contaminantes del aire son los siguientes: la naturaleza física del contaminante (gas o partícula), su reactividad

química, su morfología, su solubilidad en el agua, y las características climáticas y fisiográficas de la región⁷⁹.

La remoción de contaminantes atmosféricos por cualquiera de las dos vías conlleva la implicación de un impacto ambiental; por ejemplo, la lluvia ácida es una forma de contaminación ácida, que hace referencia a la deposición de ácidos presentes en la atmósfera a través de la remoción húmeda. Los principales ácidos son el H₂SO₄ y el HNO₃, los cuales son formados en la atmósfera gracias a la emisión de sus precursores: SO_x y NO_x, los cuales son emitidos por centrales termoeléctricas, motores de combustión interna de coches y aviones y algunas otras industrias.

El aumento inmoderado demográfico ha determinado que los humanos exploten de manera desmedida recursos como los mares y el suelo. Un ejemplo del daño implicado a los ciclos biogeoquímicos por esta explotación es el desarrollo de tecnologías para el mejoramiento en la producción agrícola, el cual dentro de sus requerimientos ha llevado a los trabajadores de este sector a usar indiscriminadamente fertilizantes ricos en sustancias nitrogenadas, las cuales alteran la composición del suelo y por ende la fijación del nitrógeno. La contaminación de ríos, lagos y mares con estas sustancias ha llevado a un aumento de la población de organismos acuáticos unicelulares en un proceso conocido como eutroficación de las aguas, las cuales son sobreexplotadas por estos organismos hasta agotar sus nutrientes.

Otro ejemplo es la deforestación de grandes extensiones de bosques con el fin de aumentar los suelos aptos para cultivo y siembra, y también para solucionar el problema de espacio para la construcción de urbes humanas, lo que ha llevado a una disminución progresiva de la tasa fotosintética, es decir, de la cantidad de fotosíntesis realizada a través del tiempo. Con esto se lleva a una disminución del oxígeno liberado a la atmósfera y al aumento del CO₂ en la misma.

⁷⁹ Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2016). *Instituto Nacional de Ecología*. [online] Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/496/cap3.html> [Consultado 10 May 2016].

Aunado al abuso en la utilización de los combustibles fósiles, la deforestación y tala indiscriminada de bosques a nivel mundial, junto con el aumento de liberación de gases de “Efecto Invernadero”, como el dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera, han fomentado la afectación a los ciclos biogeoquímicos, contribuyendo al aumento de temperatura de la Tierra. Esto a su vez ha provocado que el clima a nivel global cambie drásticamente debido al aumento exponencial de la temperatura en el planeta, fenómeno descrito desde los años 1970 y al que se le denomina “Calentamiento Global”.

El Cambio Climático

El clima se define como el estado cambiante de la atmósfera mediante sus interacciones con el mar y los continentes, en diversas escalas de tiempo y espacio. El clima de la Tierra siempre ha cambiado; sin embargo, su estabilidad durante los últimos 10 mil años ha permitido el establecimiento de la civilización y el desarrollo de la humanidad. Algunas variables que lo describen son la temperatura, la humedad, la lluvia, la cobertura de nubes y las trayectorias del viento. Cuando uno de estos parámetros meteorológicos sale de su valor medio, se habla de una anomalía climática ocasionada por forzamientos internos como inestabilidades en la atmósfera y/o el océano, o por forzamientos externos, como puede ser algún cambio en la intensidad de la radiación solar recibida e incluso cambios en las características del planeta (concentración de gases de efecto invernadero, cambios en los ciclos biogeoquímicos, etc.).

Las formas de variabilidad del clima son muchas y, por tanto, pronosticarlas a largo plazo no es fácil. Saber qué parte de la variabilidad del clima es previsible abre la posibilidad de realizar predicciones útiles en diversas actividades socioeconómicas. Sin embargo, en el último siglo el sistema climático terrestre ha experimentado cambios considerables, haciendo aún más difícil la tarea de predecirlo junto con sus parámetros meteorológicos. Al ser notable que los componentes del sistema climático —como la temperatura de la superficie de la tierra y los océanos, y la distribución de la precipitación—, han cambiado aceleradamente, al grado en que se

observan cambios en periodos de décadas; a este fenómeno se le conoce como “cambio climático”.

Las anomalías del clima experimentadas en el último siglo, o por vivirse en las próximas décadas, podrían incluir alteraciones en las formas como actualmente experimentamos la variabilidad interanual o interdecadal del clima. Eventos como “El Niño”⁸⁰ se volverán más frecuentes o intensos, también se experimentarán huracanes de mayor magnitud, ondas cálidas o frías más pronunciadas, etc. Éstas son algunas de las formas como la atmósfera podría manifestar las alteraciones climáticas resultado de la actividad humana⁸¹.

El Sol es nuestra fuente principal de energía; gran parte de la misma llega en forma de luz visible y aproximadamente un tercio de ésta es reflejada de nuevo al espacio por las nubes y las superficies terrestres blancas como la nieve y los desiertos. El resto de esta energía es absorbida por la tierra y los océanos, como consecuencia, la superficie de la Tierra se calienta, pero esta energía no se almacena, sino que se vuelve a emitir en forma de radiación infrarroja. De esta forma, la temperatura promedio del planeta (15°C) es el resultado del balance entre la energía recibida del Sol y la re-emitida. Sin embargo, si esto fuera lo único que determinara la temperatura del planeta, éste seguiría sin ser apto para la continuidad de la vida tal como la conocemos. Es por ello que la evolución de la atmósfera de la Tierra adoptó en la misma ciertos gases en pequeñas cantidades. Las moléculas de los mismos tienen frecuencias moleculares vibratorias en el rango espectral de la radiación emitida por la Tierra; por ello, estos gases pueden dejar pasar la energía en forma de luz visible y retener una fracción del calor en forma de radiación infrarroja, el cual es remitido a la superficie terrestre. Estos gases son los responsables del Efecto

⁸⁰ El fenómeno de El Niño - Oscilación Sur (ENOS) es un patrón climático recurrente que implica cambios en la temperatura de las aguas en la parte central y oriental del Pacífico tropical. Este calentamiento oscilante y el patrón de enfriamiento, es conocido como el ciclo ENOS (o ENSO por sus siglas en Inglés), afectando directamente a la distribución de las precipitaciones en las zonas tropicales y puede tener una fuerte influencia sobre el clima en las otras partes del mundo.

⁸¹ Martínez, J. y Fernández Bremauntz, A. (2004). *Cambio Climático: Una Visión Desde México*. 1st ed. [ebook] México. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/437.pdf> [Consultado 11 May 2016].

Invernadero (ver Ilustración 27) y son llamados Gases de Efecto Invernadero. Se les llama así porque actúan en forma similar a los vidrios de un invernadero.

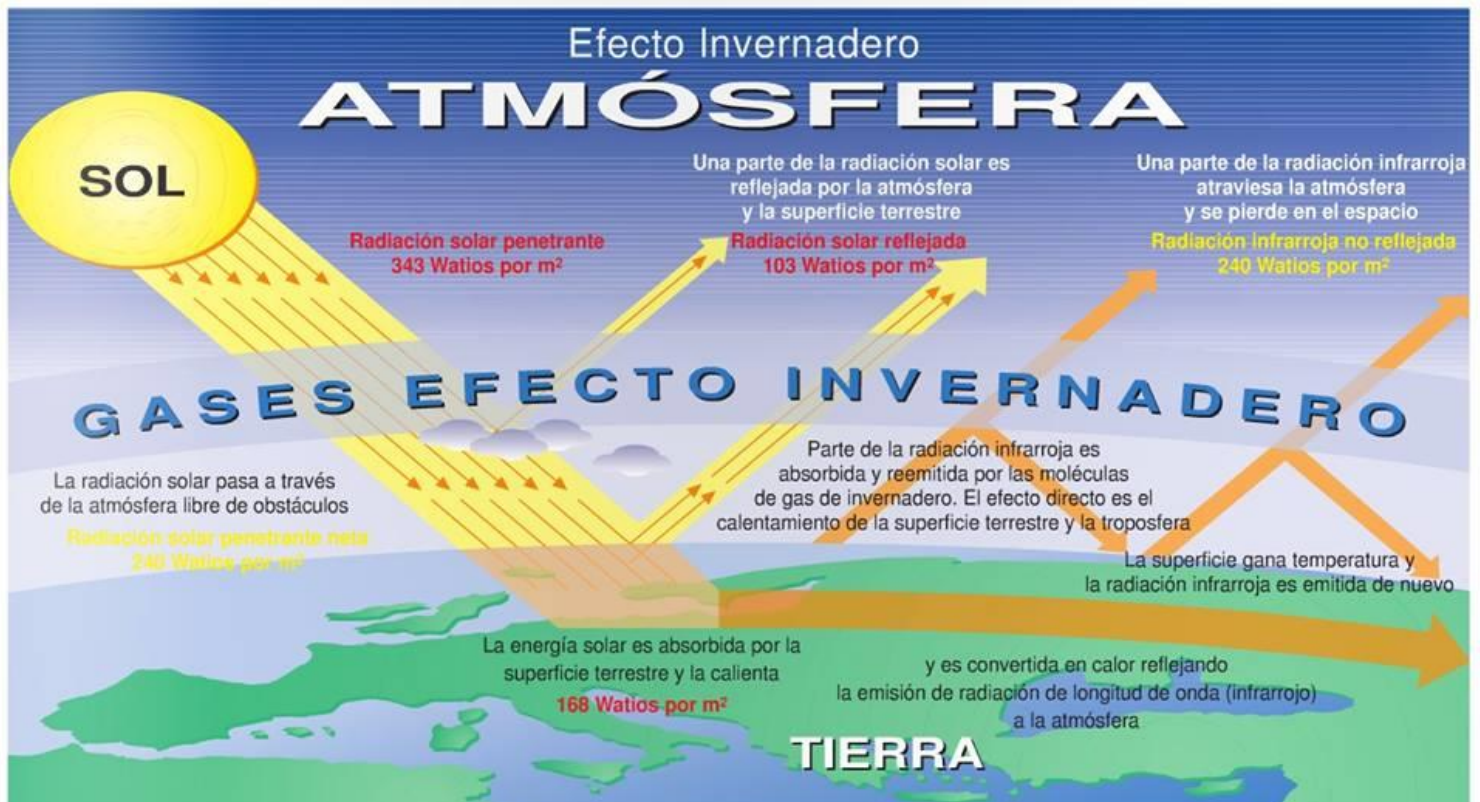


Ilustración 27. Esquema del efecto invernadero
Fuente. UNEP-GRID-Arendal.

Los principales gases que pertenecen a este grupo son⁸²:

- El vapor de agua. Principal y más abundante GEI en la atmósfera, es el responsable de dos tercios del efecto invernadero natural. En la atmósfera las moléculas de agua, en forma de gas, atrapan el calor que emite la Tierra y la irradian a su vez en todas las direcciones, calentando la superficie terrestre.

Al ser parte del ciclo hidrológico, este gas actúa en retroalimentación con el clima, a mayor temperatura en la atmósfera, el aire es más caliente, se retiene más humedad, se produce más vapor, más nubes y más

⁸² Comisión Europea. *Comprender los Gases de Efecto Invernadero*. (n.d.). 1st ed. [ebook] Disponible en: http://ec.europa.eu/clima/sites/campaign/pdf/gases_es.pdf [Consultado 20 May 2016].

precipitaciones, por lo que el aumento de las temperaturas intensifica aún más el cambio climático y el efecto invernadero.

- El dióxido de carbono. Es el elemento que más contribuye al efecto invernadero acentuado⁸³. En general, es responsable de más del 60% del efecto invernadero intensificado.

En los países industrializados, el CO₂ representa más del 80% de las emisiones de gases invernadero. Cada año se intercambian miles de millones de toneladas de carbono de forma natural entre la atmósfera, los océanos y la vegetación terrestre. Los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera variaron menos del 10% durante los 10 mil años anteriores a la Revolución Industrial. Desde 1800 la concentración de este GEI ha aumentado aproximadamente un 30% como resultado de la quema de cantidades masivas de combustibles fósiles para producir energía. En la actualidad, emitimos más de 25 mil millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera cada año en promedio. El CO₂ puede permanecer en la atmósfera entre 50 y 200 años, en función de cómo se recicle en la tierra o en los océanos.

- El metano (CH₄). Es el segundo gas que más contribuye al efecto invernadero acentuado. Desde el principio de la Revolución Industrial las concentraciones de metano en la atmósfera se han duplicado y han contribuido un 20% al incremento del efecto invernadero. En los países industrializados, el metano representa normalmente el 15% de las emisiones de GEI. Una vez en la atmósfera, el metano ayuda en la retención del calor y es 23 veces más efectivo que el CO₂, sin embargo, su estancia en ella es más breve, entre 10 y 15 años.
- El óxido nitroso (N₂O). Al igual que el CO₂ y el CH₄, es un gas invernadero cuyas moléculas absorben el calor al tratar de escapar al espacio. El N₂O es 310 veces más efectivo que el CO₂ absorbiendo el calor. En los países

⁸³ Este término es referido a la potencialización del efecto invernadero por fuentes antropogénicas únicamente y es responsable de que gran parte de los GEI presentes en la atmósfera no sean absorbidos por la naturaleza, formando así una capa de contaminantes en la misma.

industrializados el N₂O representa aproximadamente el 6% de las emisiones de GEI.

Desde el inicio de la Revolución Industrial, las concentraciones de óxido nitroso en la atmósfera han aumentado un 16% aproximadamente y han contribuido entre un 4 y un 6% a acentuar el efecto invernadero.

- Los Gases Fluorados de Efecto Invernadero, son los únicos gases de efecto invernadero que no se producen de forma natural, sino que han sido desarrollados por el hombre con fines industriales. Representan alrededor del 15% de las emisiones de gases invernadero en los países industrializados, pero son extremadamente potentes - pueden atrapar el calor hasta 22 mil veces más eficazmente que el CO₂ y pueden permanecer en la atmósfera durante miles de años. Los gases fluorados de efecto invernadero incluyen los hidrofluorocarbonos (HFC) que se utilizan en la refrigeración, como el aire acondicionado, sulfuro hexafluorido (SF₆), que se usa, por ejemplo, en la industria de la electrónica; y los perfluorocarbonos (PFC), que se emiten durante la fabricación de aluminio y se emplean también en la industria de la electrónica. Posiblemente los gases más conocidos de este grupo sean los clorofluorocarbonos (CFC), que no sólo son gases fluorados de efecto invernadero, sino que además reducen la capa de ozono. Estos gases se están retirando paulatinamente en virtud del Protocolo de Montreal de 1987 relativo a las sustancias que reducen la capa de ozono.

Por lo general, las emisiones de gases de efecto invernadero se registran y expresan como masa equivalente de CO₂, es decir, la cantidad equivalente de CO₂ que se necesitaría para producir un efecto de calentamiento similar en un periodo de cien años. El valor de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq.) de una emisión se calcula, por lo tanto, multiplicando la cantidad de gas emitida por su Potencial de Calentamiento Global asociado. Las emisiones de GEI expresadas en estas unidades nos permiten compararlas entre sí y medir la contribución de cada fuente al total de emisiones.

El Potencial de Calentamiento Global (Tabla 1) define el efecto de calentamiento integrado a lo largo del tiempo que produce hoy una liberación instantánea de 1kg de un gas de efecto invernadero, en comparación con el causado por el CO₂. De esta forma, se pueden tener en cuenta los potenciales de calentamiento de cada gas, así como sus diferentes periodos de permanencia en la atmósfera⁸⁴.

Tabla 1. Potencial de calentamiento global

Gas de efecto invernadero	Potencial de calentamiento
Bióxido de carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	21
Óxido nitroso (N ₂ O)	310
HFC-23	11,700
HFC-125	2,800
HFC-143a	3,800
HFC-236fa	6,300
Perfluorometano (CF ₄)	6,500
Perfluoroetano (C ₂ F ₆)	9,200
Perfluorobutano (C ₄ F ₁₀)	7,000
Perfluorohexano (C ₆ F ₁₄)	7,400
Hexafluoruro de azufre (SF ₆)	23,900

Fuente. Segundo informe de evaluación IPCC.

Cualquier proceso que altere el balance natural de temperatura, ya sea por cambios en la radiación recibida o re-emitada, o en su distribución en la Tierra, se reflejará como cambios en el clima. El problema con el aumento de la concentración de GEI en la atmósfera es la reducción de la eficiencia con la cual la Tierra re-emite la energía recibida al espacio. Así, la temperatura de la superficie terrestre se elevará para emitir más energía, y aunque parte de ella quede “atrapada”, suficiente energía saldrá al espacio para alcanzar el balance de temperaturas que mantiene relativamente estable el clima. Es claro que, si las concentraciones de gases de efecto invernadero continúan aumentando, la temperatura promedio de la superficie del planeta mantendrá una tendencia positiva, aumentando también. Aun si las emisiones de estos gases se estabilizan, los efectos del calentamiento perdurarán

⁸⁴ Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero* (PDF). México DF., 2015. (Consulta: 2015, 06 de Agosto).

por un considerable periodo, pues como se ha dicho anteriormente, los gases de este tipo tienden a permanecer por muchos años en la atmósfera.

Es un hecho que cuando un factor de un sistema tan complejo como el de la atmosfera es alterado, los demás se verán afectados. Incluso un cambio pequeño en alguna variable puede alterar al resto. A causa del efecto invernadero y la emisión masiva de GEI después de la Revolución Industrial, la temperatura promedio del planeta incrementó en promedio 0.7°C durante el Siglo XX, demostrando la estrecha relación entre el acelerado crecimiento en las emisiones, el alcance del creciente Efecto Invernadero y el aumento intensivo del calentamiento global.

Es importante tomar en cuenta que, al decir que la temperatura ha incrementado 0.7°C , se está hablando de un incremento promedio en la temperatura global, pero que este promedio viene dado por cambios que son mucho mayores en distintas zonas del planeta. Se observa cómo en algunas zonas frías, principalmente en el hemisferio norte, el cambio de temperatura llega a ser de hasta $+3^{\circ}\text{C}$, lo cual provoca el derretimiento de glaciares y masas de hielo. Por otro lado, en algunas partes de los océanos se detectan de entre $+3$ y $+4^{\circ}\text{C}$, lo cual incrementa la posibilidad de que se formen huracanes más intensos⁸⁵.

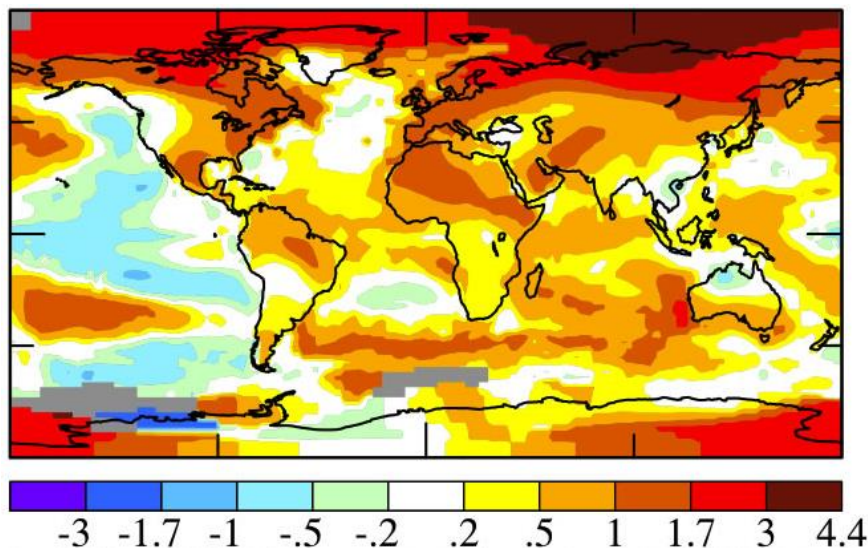


Ilustración 28. Cambios de temperatura en el 2011 comparado con promedios 1950-1980.
Fuente. *cambioclimaticoglobal.com*, 2015.

⁸⁵ Cambio Climático Global. (2013) *¿Qué es el Calentamiento Global?* [online] Disponible en: <http://cambioclimaticoglobal.com/que-es-el-calentamiento-global> [Consultado 18 May 2016].

Resultado de algunos grados de calentamiento, la cantidad de vapor de agua en el aire aumenta. Por ejemplo, un aumento de 3°C en la temperatura promedio de la tierra incrementaría el vapor de agua en un 25%. Este vapor asciende hacia las nubes y posteriormente se condensa en forma de lluvia, por lo que podemos esperar que la cantidad de lluvia aumente en la misma proporción. De la misma manera que llueve más fuerte en lugares que ya son húmedos, al mismo tiempo se incrementa la intensidad, duración y extensión geográfica de las sequías. De esta manera, los eventos extremos de inundación y sequía aumentan considerablemente en un mundo más caliente⁸⁶.

Las alteraciones climáticas globales, deshielos y cambio de la composición química atmosférica ineludiblemente alteran la dinámica natural de los ciclos biogeoquímicos, al estar éstos interrelacionados con la atmósfera, hidrósfera y suelos, y por lo mismo con los ecosistemas⁸⁷.

El cambio climático es un problema con características únicas, ya que es de naturaleza global, sus impactos mayores serán en el largo plazo e involucra interacciones complejas entre procesos naturales (fenómenos ecológicos y climáticos) y sociales, económicos y políticos a escala mundial⁸⁸.

En la Ilustración 29 se muestra la relación entre el Efecto Invernadero y el Calentamiento Global, el cual explica visualmente cómo estos fenómenos se interrelacionan.

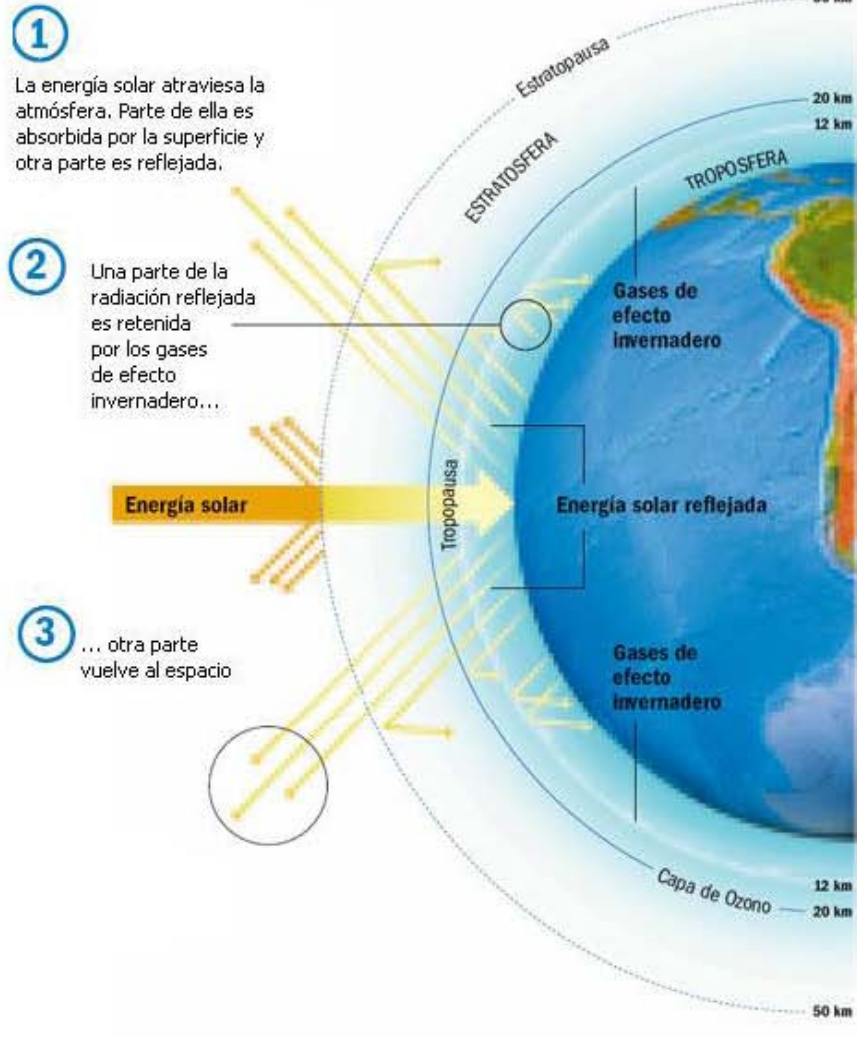
⁸⁶ Centro Mario Molina (2016). *¿Qué es el cambio climático?* [online] Disponible en: <http://centromariomolina.org/cambio-climatico/temas/educacion-en-cambio-climatico/> [Consultado 22 May 2016].

⁸⁷ Escolares.net. (2016). *Alteraciones en los ciclos biogeoquímicos*. [online] Disponible en: <http://www.escolares.net/biologia/alteraciones-en-los-ciclos-biogeoquimicos/> [Consultado 14 May 2016].

⁸⁸ Martínez, J. and Fernández Bremauntz, A. (2004). *Cambio Climático: Una Visión Desde México*. 1st ed. [ebook] México. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/437.pdf> [Consultado 11 May 2016].

EL EFECTO INVERNADERO

Es el calentamiento natural de la Tierra. Los gases de efecto invernadero, presentes en la atmósfera, retienen parte del calor del Sol y mantienen una temperatura apta para la vida.



EL CALENTAMIENTO GLOBAL

Es el incremento a largo plazo en la temperatura promedio de la atmósfera. Se debe a la emisión de gases de efecto invernadero que se desprenden por actividades del hombre.

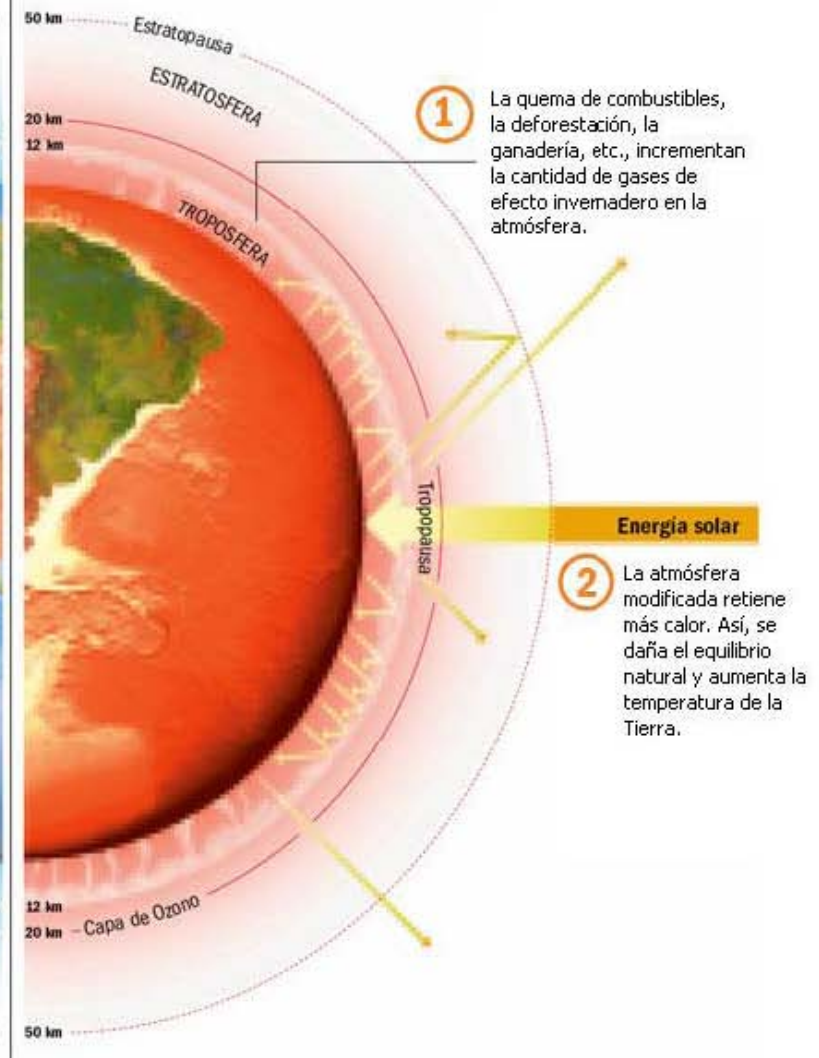


Ilustración 29. Relación entre el calentamiento global y el efecto invernadero
Fuente. cuadrocomparativo.org. 2016.

2.4 La Contaminación Atmosférica Emitida por Centrales Eléctricas

La comparación de los costos y las consecuencias ambientales que las distintas tecnologías de producción de energía conllevan, son elementos medulares en el debate para alcanzar el desarrollo sustentable. Para ello es fundamental entender la naturaleza y los efectos de la generación de electricidad a partir del uso de cualquier combustible o recurso natural, para tomar decisiones informadas en la búsqueda de opciones más limpias y energéticamente eficientes.

La producción mundial de energía primaria en el 2013 totalizó en 158 billones de kWh⁸⁹, donde el porcentaje de participación de las principales fuentes de energía explotadas se muestra en el Gráfico 2. Como es notable, el sector de generación eléctrica a partir de combustibles fósiles es el componente principal de la economía mundial (81.5%) en la provisión de este insumo básico. Es

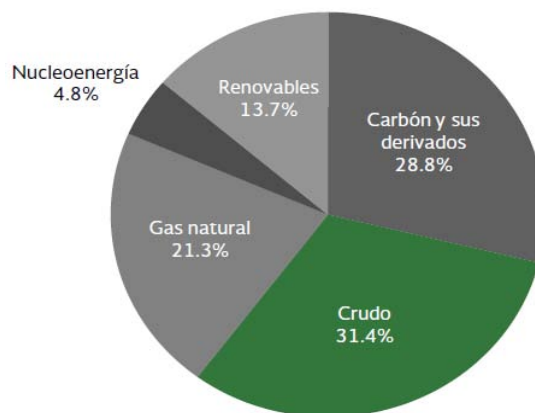


Gráfico 2. Producción mundial de energía primaria, 2013

Fuente. World Energy Balances, IEA, 2015.

por ello que este sector es también uno de los principales emisores de sustancias contaminantes a la atmósfera, entre los que figuran contaminantes atmosféricos criterio como el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno, partículas suspendidas; gases de efecto invernadero como el metano, el óxido nítrico y el dióxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles y metales en niveles traza como el mercurio.

La mayor parte de los contaminantes atmosféricos se generan durante la combustión, independientemente del tipo de combustible quemado. Sin embargo, la cantidad y las características de cada contaminante dependen en gran medida del combustible. Por ejemplo, las partículas suspendidas que genera la combustión de carbón son de mayor tamaño y contienen mayores cantidades de carbono

⁸⁹ World Energy Balances, IEA, 2015.

orgánico y elemental que las partículas suspendidas generadas por el combustóleo. Algunos elementos metálicos que son contaminantes tóxicos, como el plomo y el mercurio, se emiten a raíz de la combustión de carbón, mientras que la quema de combustóleo genera emisiones de vanadio y plomo, pero en menor medida mercurio. El gas natural es el más limpio de todos los combustibles fósiles: produce sobre todo emisiones de NOx, CO2, partículas suspendidas y cantidades muy pequeñas de otros contaminantes.

El tipo y la cantidad de las emisiones contaminantes derivadas de la generación de energía eléctrica dependen del energético empleado y de la tecnología de conversión. En la Tabla 2 se enlistan los tipos de contaminantes emitidos por los diferentes combustibles fósiles.

Tabla 2. Principales contaminantes emitidos por el uso de distintos combustibles fósiles.

<i>Combustible</i>	<i>Contaminantes Emitidos</i>	
<i>Carbón</i>	-Monóxido de Carbono -Plomo -Óxidos de Nitrógeno -Partículas Suspendidas Primarias -Óxidos de Azufre -Antimonio y sus compuestos -Berilio y sus compuestos	-Metales pesados (Cadmio, Cromo, Cobalto, Mercurio, Níquel) y sus compuestos. -Dioxinas y Furanos -Etilbenceno -Formaldehído -Ácido Clorhídrico y Ácido Fluorhídrico -Aromáticos (Benceno, Tolueno y Xileno)
<i>Gas Natural</i>	-Monóxido de Carbono -Plomo -Óxidos de Nitrógeno -Partículas Suspendidas -Óxidos de Azufre	-Metales pesados (Cadmio, Cromo, Cobalto, Mercurio, Níquel) y sus compuestos -Formaldehído -Aromáticos (Tolueno y Benceno)
<i>Combustibles pesados (Combustóleo)</i>	-Nitronitro de Carbono -Plomo -Óxidos de Nitrógeno -Partículas Suspendidas Primarias -Óxidos de Azufre -Benceno -Berilio y sus compuestos	-Metales Pesados (Cadmio, Cromo, Cobalto, Mercurio) y sus compuestos -Dioxinas y Furanos -Etilbenceno -Formaldehído -Manganeso y sus compuestos

Fuente. EIIP, 2001.

La preocupación, cada vez mayor, por los efectos de las emisiones de contaminantes atmosféricos ha dado pie a reglamentaciones más estrictas en esta

materia y a la instalación de equipo para el control y prevención de la contaminación a fin de reducir la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera.

De todos los combustibles fósiles usados para generar energía eléctrica, el carbón es el que requiere la mayor infraestructura en las operaciones de procesamiento, manejo, almacenamiento, carga y descarga (todas las cuales tienen importantes efectos ambientales). La combustión de carbón requiere el uso de trituradoras, pulverizadoras, equipo de manejo de cenizas, sopladores de hollín y equipo para el control de polvo y emisiones. Los sistemas de control de partículas más comúnmente utilizados en las instalaciones que funcionan a base de combustión de carbón son los ciclones múltiples, los precipitadores electrostáticos, los filtros de tela y los depuradores o lavadores Venturi. Diversas técnicas se suelen aplicar a fin de reducir las emisiones de SO₂ de las centrales carboeléctricas: limpieza física y química del carbón, cambio a carbones con bajo contenido de azufre y desulfuración de gases de chimenea. Entre los métodos para controlar los óxidos de nitrógeno figuran la disminución de las temperaturas pico en la zona de combustión o del tiempo de residencia del gas en la zona de alta temperatura, la instalación de quemadores de baja emisión de NO_x, la reducción catalítica selectiva y la reducción no catalítica selectiva.

En las centrales eléctricas que funcionan con combustóleo se usan dispositivos de control similares a los de las carboeléctricas. Los recolectores mecánicos, los precipitadores electrostáticos y los filtros de tela permiten reducir las emisiones de partículas suspendidas. La depuración húmeda o el secado por atomización son técnicas comunes para reducir las emisiones de SO₂. Debido al bajo contenido de nitrógeno de los aceites combustibles, las técnicas para reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno consisten sobre todo en controles de la combustión, aunque también se aplican técnicas de reducción de NO_x en la fase posterior a la combustión, como la reducción catalítica selectiva y la reducción no catalítica selectiva.

En su mayoría, las técnicas de control ambiental usadas en las calderas de gas natural tienen por objeto controlar o mitigar las emisiones de NO_x y son similares a

las descritas para las centrales carboeléctricas. Incluyen recirculación de los gases de chimenea, combustión por etapas, quemadores de bajas emisiones de NOx, reducción catalítica selectiva y reducción no catalítica selectiva⁹⁰.

Hablando únicamente sobre los GEI, actualmente la relación del consumo eléctrico con el crecimiento de la población y de las emisiones de estos junto el creciente comportamiento del PIB van ligados. A continuación se muestra las tendencias mundiales tomando el consumo de energía como base de comparación.

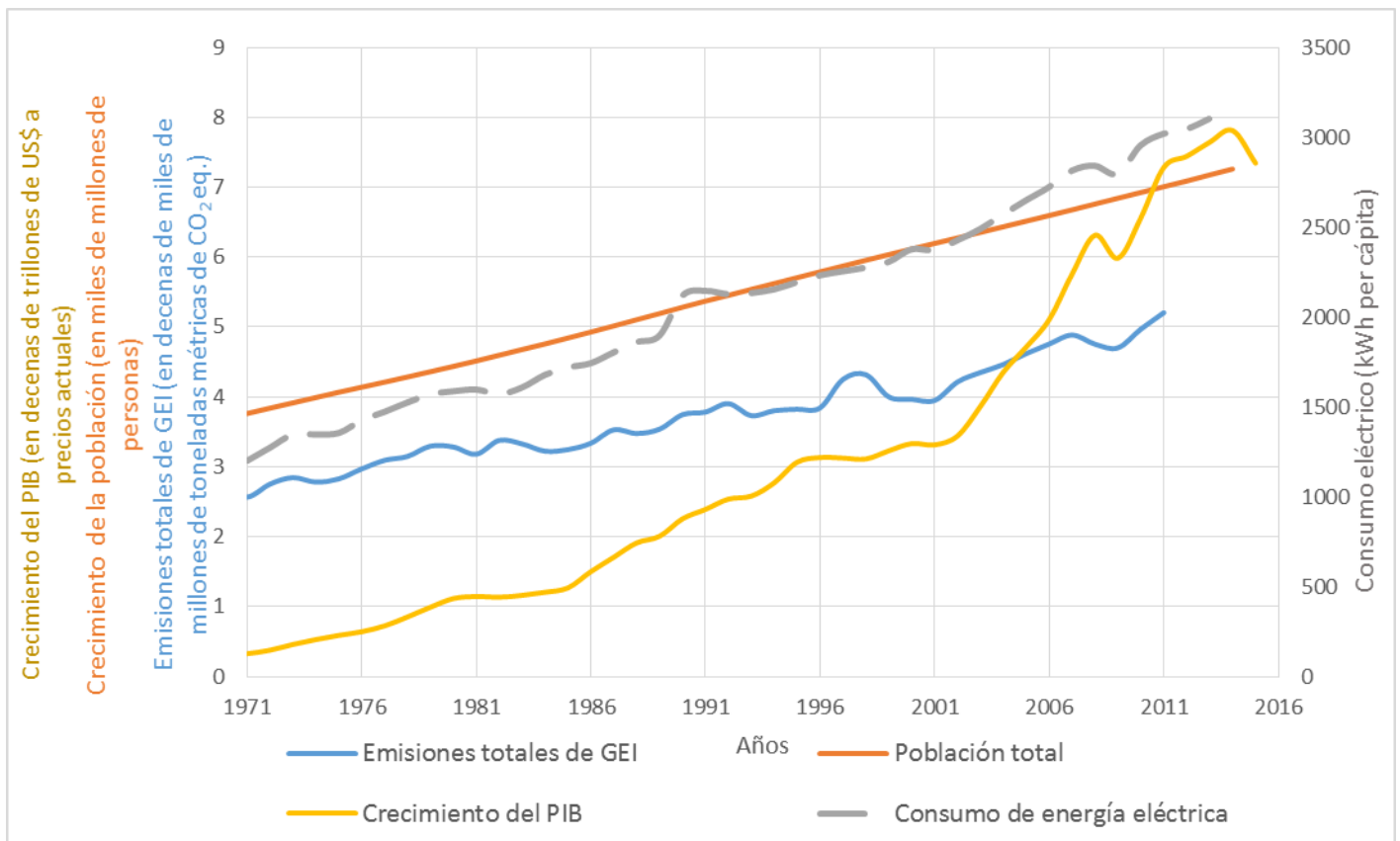


Gráfico 3. Comparación de indicadores mundiales en materia socioeconómica, energética y ambiental.
Fuente. Elaboración propia con datos de El Banco Mundial, 2016.

El crecimiento de la población lleva consigo el consumo de bienes, entre ellos el de la electricidad. Como es mostrado en el Gráfico 3, la necesidad del uso de energía eléctrica en nuestro día a día presenta el mayor aumento, lo cual se refleja en un

⁹⁰ Comisión para la Cooperación Ambiental (2005). *Emisiones atmosféricas de las centrales eléctricas en América del Norte*. [ebook] Montreal, Canadá. Disponible en: <http://www3.cec.org/islandora/es/item/10236-north-american-power-plant-air-emissions-es.pdf> [Consultado 2 Jun. 2016].

impacto en la calidad de la atmosfera, impacto que en el periodo de tiempo que comprende este estudio no muestra ninguna baja, sino que, continúa creciendo. En el Gráfico 4 puede visualizarse de mejor manera la estrecha relación entre el consumo eléctrico y la emisión total de GEI.

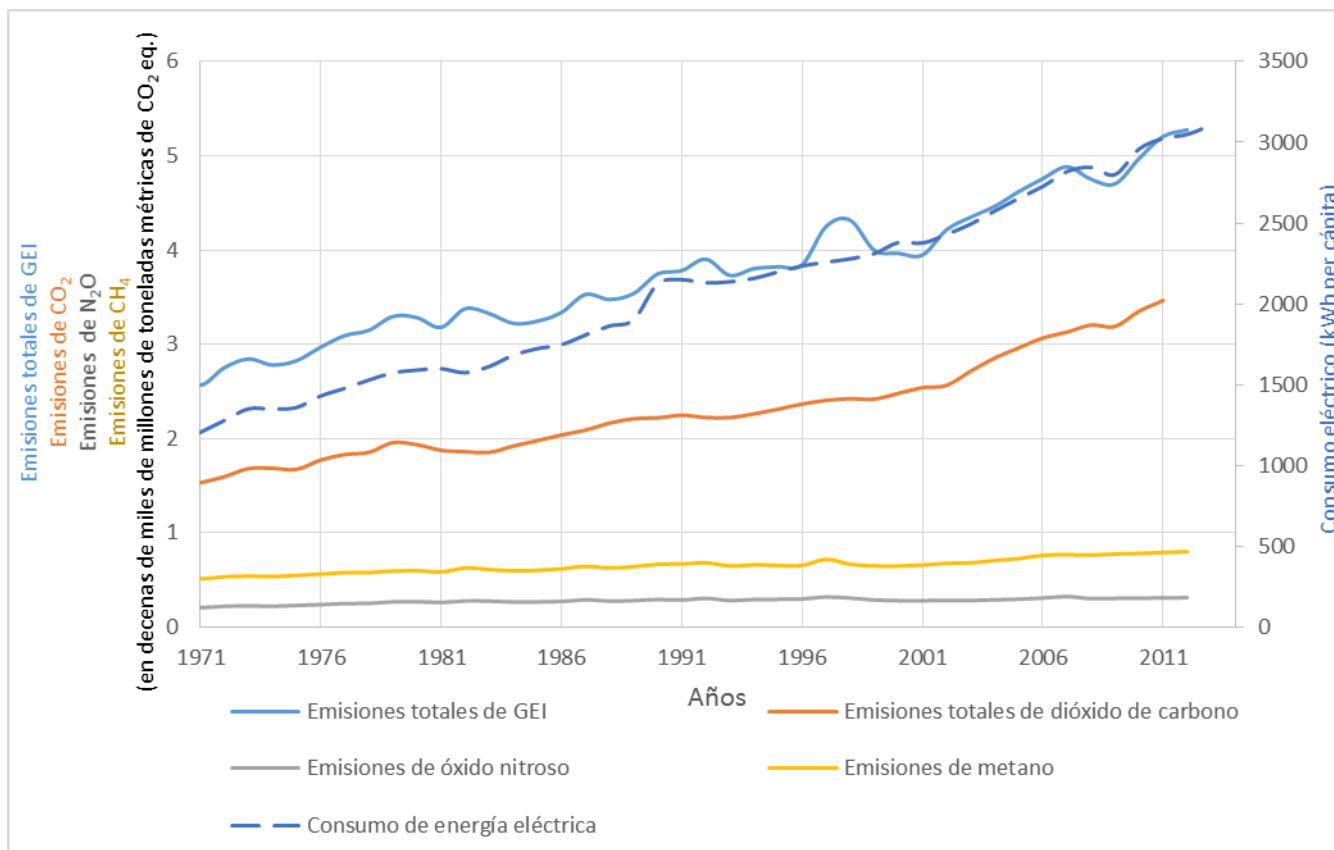


Gráfico 4. Emisiones mundiales de los diferentes GEI.
Fuente. Elaboración propia con datos de El Banco Mundial, 2016.

Por otra parte, en el Gráfico 4 también puede visualizarse la emisión de los principales GEI a través del tiempo, siendo el mayor contribuidor las del CO₂, el cual, al ser comparado con los demás, denota que las emisiones de N₂O y CH₄ se han mantenido prácticamente constantes.

Ante el constante impacto ambiental que la explotación de las distintas fuentes de energía genera durante la operación de las diversas centrales de aprovechamiento, es importante llevar un registro del uso de tecnologías convencionales o alternativas para evaluar la cantidad de contaminación ambiental emitida, lo que nos llevará a conocer el impacto a la atmosfera que se evita. De esta forma, en el Gráfico 5, se

compara el porcentaje del uso de estas tecnologías anualmente y como se puede observar, el porcentaje del consumo de energía nuclear y alternativas ha seguido aumentando durante el periodo de estudio, aumento que para finales del 2013 alcanzó el 18.5% del consumo total energético en el mundo, por consiguiente, la apertura a de este tipo de tecnologías ha logrado disminuir el uso de las convencionales. Aunque el aprovechamiento de energías limpias ha ido en aumento, su participación en los insumos de la creciente sociedad no ha alcanzado aún el nivel óptimo para modificar la tendencia de emisiones totales de GEI, siendo importante remarcar que la modificación de esta tendencia reflejará sus resultados a mediano plazo.

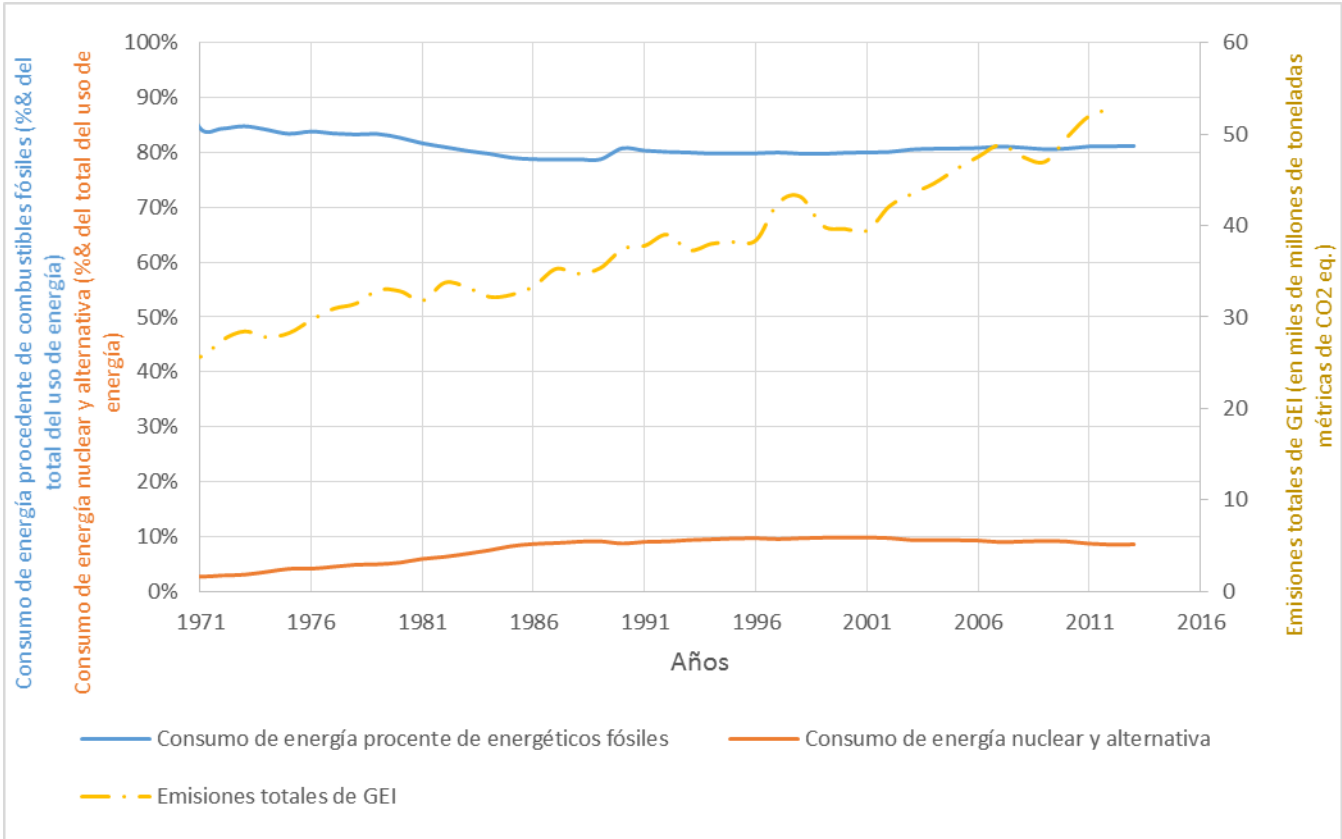


Gráfico 5. Porcentaje del consumo anual por grupo de combustible en el mundo.
Fuente. Elaboración propia con datos de El Banco Mundial, 2016.

2.5 La Contaminación Atmosférica en México

Como se ha mencionado anteriormente, la disminución de la calidad del aire debido a la contaminación atmosférica en zonas urbanas es producto de un conjunto

de factores como la cantidad y calidad de los combustibles utilizados por los distintos procesos industriales, las actividades productivas y por las condiciones meteorológicas —locales y globales— y fisiográficas que modifican la química atmosférica.

La importancia del control de la contaminación atmosférica tiene que ver no sólo con los daños directos que causa a la salud del ser humano (enfermedades, hipersensibilidad), a la flora y la fauna (alteraciones foliares, reducción del crecimiento, pérdida de especies) o las alteraciones al medio ambiente (cambios de la radiación solar, aumento de emisiones calóricas, cambios en la precipitación), sino también con los impactos negativos sobre la economía como resultado de las pérdidas derivadas de los efectos directos e indirectos, así como por los gastos relacionados con la aplicación de medidas para controlar dicha polución.

En México, hasta hace pocos años se consideraba que este deterioro era exclusivo de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Si bien es cierto que la gravedad del problema de la contaminación varía entre ciudades, también lo es que a la fecha la lista de urbes con problemas de calidad del aire incluyen a la Zona Metropolitana de Monterrey, a la Zona Metropolitana de Guadalajara, a las ciudades de Minatitlán, Coatzacoalcos, Puebla, Saltillo, Monclova, Lázaro Cárdenas, Ciudad Juárez, Tijuana y la Zona Lerma- Toluca, debido al crecimiento poblacional e industrial acelerado en los últimos años⁹¹.

Es por ello que en materia de normatividad de aire, nuestro país cuenta con varios instrumentos jurídicos que permiten prevenir y controlar la contaminación atmosférica, la cual tiene como base la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, seguido por tratados y convenios internacionales, así como por leyes generales y reglamentos, las cuales dan pie a las normas que dictaminan los límites de contaminación en nuestro país.

⁹¹ Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2016). *Instituto Nacional de Ecología*. [online] Disponible: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/396/introd.html> [Consultado 14 May 2016].

En 1997 la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático⁹² (CMNUCC) aprobó el Protocolo de Kioto (PK), acuerdo internacional que tiene por objetivo promover el desarrollo sostenible al señalar los compromisos que deben ser cumplidos por todas las economías industrializadas que están a favor de dicho documento (enlistadas en el Anexo 1 del mismo). Los compromisos aceptados encaminan a estos países a reducir sus emisiones de gases provocadores del calentamiento global mediante el establecimiento de un punto de referencia y metas de emisiones en un periodo limitado. El PK es uno de los instrumentos jurídicos internacionales más importantes destinado a luchar contra el cambio climático y que actualmente ha llevado a los gobiernos a establecer leyes y políticas para cumplir sus compromisos, a las empresas a tener el medio ambiente en cuenta a la hora de tomar decisiones sobre sus inversiones, y que además ha propiciado la creación del mercado del carbono⁹³ (UNFCCC, 2014).

En mayo de 1994, México se integró a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, donde se le reconoció como un país en desarrollo y se le otorgó la no inclusión en el Anexo I de la CMNUCC, aunque debido a la gran presión internacional de poner en acción lo firmado en dicho protocolo, México asumió compromisos “voluntarios” de índole cuantitativo y a partir de 1997 se unificó en una sola instancia la Comisión Intersecretarial para el Cambio Climático, espacio para la concertación intersectorial con vistas a las negociaciones internacionales sobre el tema, la coordinación de la acción climática por parte del sector público, la interlocución con el Poder Legislativo y la promoción de un diálogo nacional⁹⁴.

⁹² Es uno de los tres tratados internacionales introducidos en 1992 en la “Cumbre de la Tierra de Río”, el cual tiene como objetivo fundamental el impedir la interferencia «peligrosa» del ser humano en el sistema climático, al fijar el objetivo de estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero «a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático». Se declara asimismo que «ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible».

⁹³ Los mercados de carbono son ámbitos donde se intercambian contratos de compra y venta donde una parte paga a otra por una cantidad determinada de reducción de emisiones de GEI.

⁹⁴ Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. La OCDE en México (Consulta: 2016, 03 de Junio), 2009.

URL: <http://www.oecd.org/centrodemexico/laocde/laocdeenmexico.htm>

En 1997 la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático⁹⁵ (CMNUCC) aprobó el Protocolo de Kioto (PK), acuerdo internacional que tiene por objetivo promover el desarrollo sostenible al señalar los compromisos que deben ser cumplidos por todas las economías industrializadas que están a favor de dicho documento (enlistadas en el Anexo I de la CMNUCC). Los compromisos aceptados encaminan a estos países a reducir sus emisiones de gases provocadores del calentamiento global mediante el establecimiento de un punto de referencia y metas de emisiones en un periodo limitado. El PK es uno de los instrumentos jurídicos internacionales más importantes destinado a luchar contra el cambio climático y que actualmente ha llevado a los gobiernos a establecer leyes y políticas para cumplir sus compromisos, a las empresas a tener el medio ambiente en cuenta a la hora de tomar decisiones sobre sus inversiones, y que además ha propiciado la creación del mercado del carbono⁹⁶ (UNFCCC, 2014).

En cuanto a la generación de energía eléctrica, estos documentos fundamentan la comunicación entre las naciones pertenecientes al Anexo I para informar acerca de los nuevos desarrollos tecnológicos de aprovechamiento energético, así como, fomentar la asistencia de las diferentes partes en cuanto alguna requiera mejorar sus procesos de explotación de recursos con el fin de hacerlos más sustentables. También argumentan a favor de la transición energética, al concretar la necesidad de detener la explotación de fuentes de energía convencionales de alto impacto a la atmósfera y favorecer la generación de electricidad por recursos renovables o de baja emisión de GEI.

En mayo de 1994, México se integró a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, donde se le reconoció como un país en desarrollo y se le

⁹⁵ Es uno de los tres tratados internacionales introducidos en 1992 en la “Cumbre de la Tierra de Río”, el cual tiene como objetivo fundamental el impedir la interferencia «peligrosa» del ser humano en el sistema climático, al fijar el objetivo de estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero «a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático». Se declara asimismo que «ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible».

⁹⁶ Los mercados de carbono son ámbitos donde se intercambian contratos de compra y venta donde una parte paga a otra por una cantidad determinada de reducción de emisiones de GEI.

otorgó la no inclusión en el Anexo I de la CMNUCC, aunque debido a la gran presión internacional de poner en acción lo firmado en dicho protocolo, México asumió compromisos “voluntarios” de índole cuantitativo y a partir de 1997 se unificó en una sola instancia la Comisión Intersecretarial para el Cambio Climático, espacio para la concertación intersectorial con vistas a las negociaciones internacionales sobre el tema, la coordinación de la acción climática por parte del sector público, la interlocución con el Poder Legislativo y la promoción de un diálogo nacional⁹⁷.

A partir de compromisos del PK asumidos y ante la necesidad de ponerlos en marcha, el gobierno mexicano expidió leyes generales en materia de medio ambiente, las cuales son herramientas primordiales en la legislación ambiental que buscan atenuar eficientemente los impactos que cualquiera de las actividades socioeconómicas puedan producir. Las leyes generales que aplican en la evaluación de la contaminación atmosférica emitida por centrales eléctricas son la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), la Ley General de Cambio Climático y la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental.

La LGEEPA es de aplicación nacional y establece las obligaciones de las autoridades del orden federal y local. La Ley en su título IV “Protección al Ambiente”, capítulos I y II, establece los artículos sobre prevención y control de la contaminación de la atmósfera. En ellos se hace referencia específica a los instrumentos de política, mecanismos y procedimientos necesarios para controlar, reducir o evitar la contaminación de la atmósfera.

En cuanto a la industria eléctrica, esta ley categoriza a la misma como fuente fija de emisiones, por lo mismo, obliga a todo proyecto de generación a llevar a cabo evaluaciones de impacto ambiental, así como, fomentar el aprovechamiento sustentable de energéticos al compensar con estímulos fiscales la investigación e

⁹⁷ Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. La OCDE en México (Consulta: 2016, 03 de Junio), 2009.
URL: <http://www.oecd.org/centrodemexico/laocde/laocdeenmexico.htm>

incorporación de sistemas de ahorro de energía y de utilización de fuentes de energía menos contaminantes.

La Ley General de Cambio Climático también es de orden público, interés general y de observancia en todo el territorio nacional, establece las disposiciones para enfrentar los efectos adversos del cambio climático y es reglamentaria en materia de protección al ambiente, desarrollo sustentable, preservación y restauración del equilibrio ecológico. Es sustentada por el Protocolo de Kioto y tiene por objeto garantizar el derecho a un medio ambiente sano al regular las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, con lo que se busca lograr la estabilización de sus concentraciones en la atmósfera a través de la administración de acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático, promoviendo la transición hacia una economía competitiva, sustentable y de bajas emisiones de carbono.

Para el sector eléctrico en nuestro país esta ley responde a favor de la realización de inventarios de emisiones de contaminantes con la finalidad de desarrollar mejores estrategias, programas y proyectos integrales de mitigación y adaptación al cambio climático, maximizando así el uso eficiente y sustentable de los recursos energéticos fósiles y renovables del país, esto promueve la sustitución y consumo gradual de los combustibles fósiles por fuentes renovables de energía para la producción de electricidad.

La Ley Federal de Responsabilidad Ambiental es de orden público y de interés social, la cual regula la responsabilidad ambiental que nace de los daños ocasionados al ambiente, la reparación del daño y la compensación de dichos daños. Tiene por objeto la protección, la preservación y restauración del ambiente y el equilibrio ecológico, para garantizar los derechos humanos a un medio ambiente sano para el desarrollo y bienestar de toda persona, y a la responsabilidad generada por el daño y el deterioro ambiental. Al tener alcance en el régimen de responsabilidad ambiental reconoce que el daño ocasionado al ambiente es independiente del daño patrimonial sufrido por los propietarios de los elementos y Reconociendo que el desarrollo nacional sustentable debe considerar los valores económicos, sociales y ambientales recursos naturales.

Para asegurar lo definido en las leyes generales se creó el Reglamento en materia de prevención y control de la contaminación atmosférica, el cual rige en todo el territorio nacional. Este reglamento tiene por objeto regular la LGEEPA en lo que se refiere a la prevención y control de la contaminación atmosférica. El reglamento define los procedimientos técnico-administrativos a que están sujetas las fuentes emisoras de contaminantes de jurisdicción federal, como son las licencias de funcionamiento y operación.

Por último, la SEMARNAT emite una serie de Normas Oficiales Mexicanas (NOM) las cuales regulan las emisiones de contaminantes provenientes de las fuentes fijas y móviles. Estas normas están dirigidas a restringir a ciertos niveles las emisiones de contaminantes de los diferentes tipos de fuentes, así como por el tipo de contaminante. La norma oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011, que regula la contaminación atmosférica e identifica los niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición, es la que principal aplicación tiene en el sector eléctrico, esta norma establece los límites de emisión de CO, PM, NOx y SO₂ por la capacidad térmica de los equipos de las centrales eléctricas y las zonas definidas en la misma. Esta NOM vincula las metodologías para la realización de la medición por contaminante, así como, las especificaciones de los combustibles a usar⁹⁸.

Hablando de las emisiones a la atmósfera provenientes de centrales eléctricas actualmente reportadas, es importante señalar que la economía mexicana sigue presentando una alta dependencia en el uso de combustibles fósiles. Para el 2013, según el Balance Nacional de Energía, el consumo energético procedente de este tipo de combustibles representó el 91.3% del total, distribuidos de la siguiente forma:

⁹⁸ Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2016). *Normatividad*. [online] Disponible en: <http://www.inecc.gob.mx/calair-informacion-basica/564-calair-normatividad#reglamento> [Consultado 1 Jun. 2016].

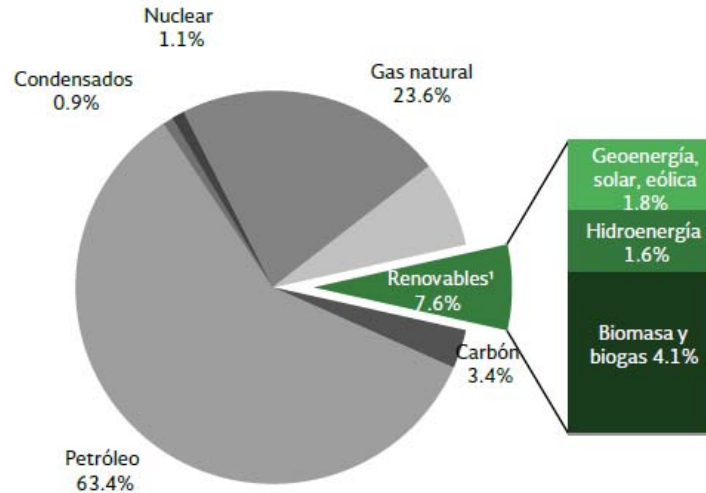


Gráfico 6. Producción de energía primaria nacional, 2014
Fuente. Sistema de Información Energética, SENER.

Las emisiones de las plantas termoeléctricas que utilizan combustóleo o diésel representan el 79% y el 35%, respectivamente, de las emisiones de SO₂ y NO_x del sector eléctrico nacional. Para dar contexto a estas cifras, es necesario decir que en México, de acuerdo con la Secretaría de Energía, el sector eléctrico aporta aproximadamente el 68% de las emisiones totales nacionales de SO₂, el 20% de las emisiones de NO_x, y aproximadamente el 24% de las emisiones de partículas primarias⁹⁹. En el siguiente gráfico se muestra la evolución de las emisiones de GEI en nuestro país, siendo comparado con el crecimiento de la población, el comportamiento del PIB y el consumo eléctrico per cápita.

⁹⁹ Instituto Nacional de Ecología, *Emisiones Derivadas de la Producción de Energía en Centrales Termoeléctricas*. (Consulta: 2015, 02 de Septiembre), México DF., 2007.

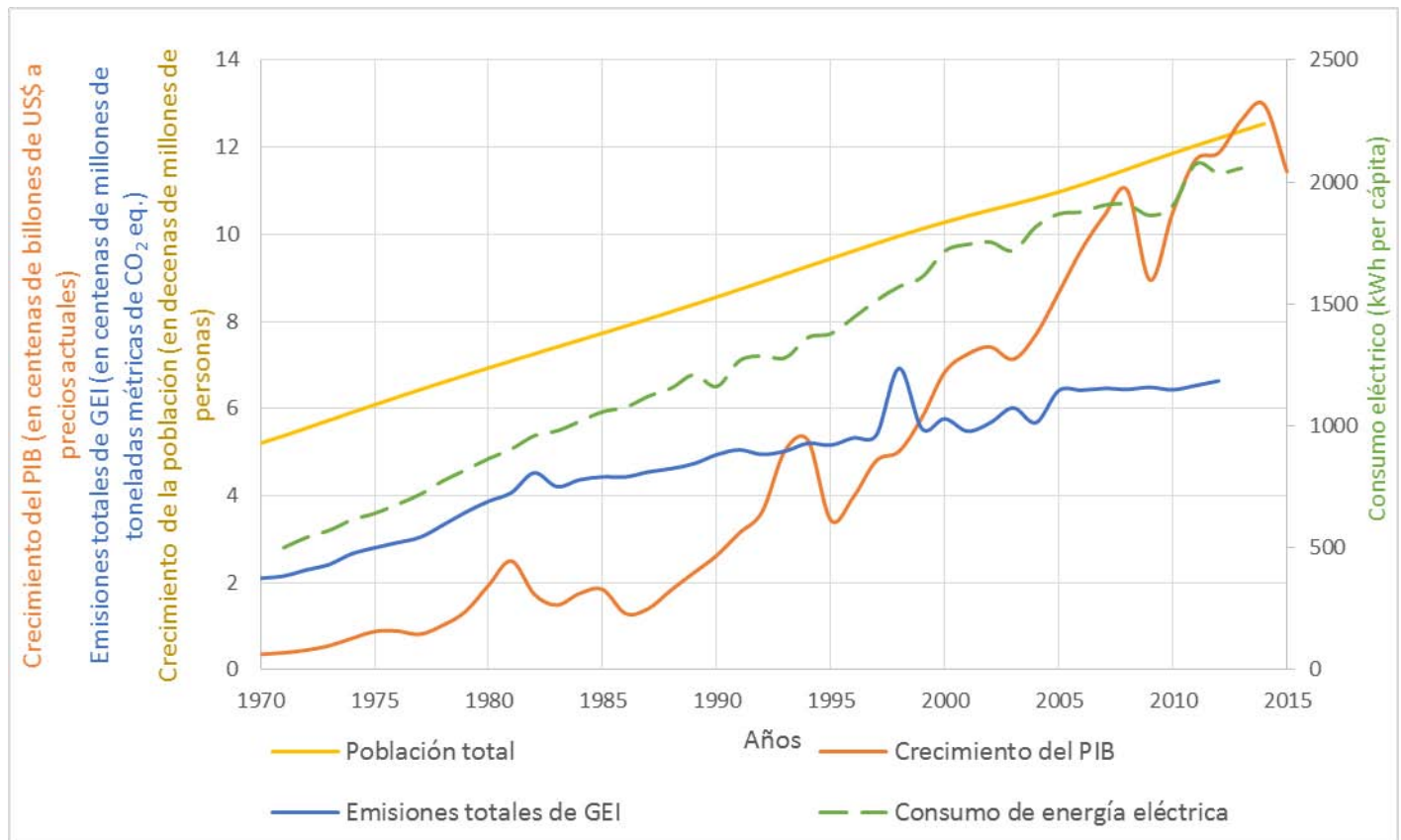


Gráfico 7. Comparación de indicadores mexicanos en materia socioeconómica, energética y ambiental
Fuente. Elaboración propia con datos de El Banco Mundial, 2016.

El progreso económico del país, al igual que las tendencias mundiales, ha llevado a que su consumo eléctrico año con año vaya en aumento, reflejándose en la alza de sus emisiones de contaminantes a la atmosfera, en particular en 1998, año donde presentó su valor máximo. El comportamiento del aumento de las actividades productivas en México con implicación en el impacto atmosférico, a finales del año 2010, hizo que ocupara el lugar número 13 dentro del ranking de países con mayores emisiones de CO₂, superando así las emisiones que Francia, Brasil y los demás países en Latinoamérica tuvieron para ese año¹⁰⁰.

México, al ser una de las economías más ricas en petróleo, durante la historia de su planeación energética dio mayor prioridad a la explotación de este combustible, dando pie a su dependencia al mismo. Por otra parte, como se ha mencionado

¹⁰⁰ Índex Mundi(2016). *Ranking de países por Emisiones de CO2 (kt)*. [online] Disponible en: <http://www.indexmundi.com/es/datos/indicadores/EN.ATM.CO2E.KT/rankings> [Consultado 7 Jun. 2016].

anteriormente, esta tecnología ha sido mejorada para poder funcionar utilizando otros combustibles también fósiles, haciéndola más versátil y asegurando su uso por más años. En el Gráfico 8 se puede visualizar el uso de medios convencionales para asegurar el abasto eléctrico de la población, comparándose nuevamente con las emisiones de GEI y el consumo de este bien.

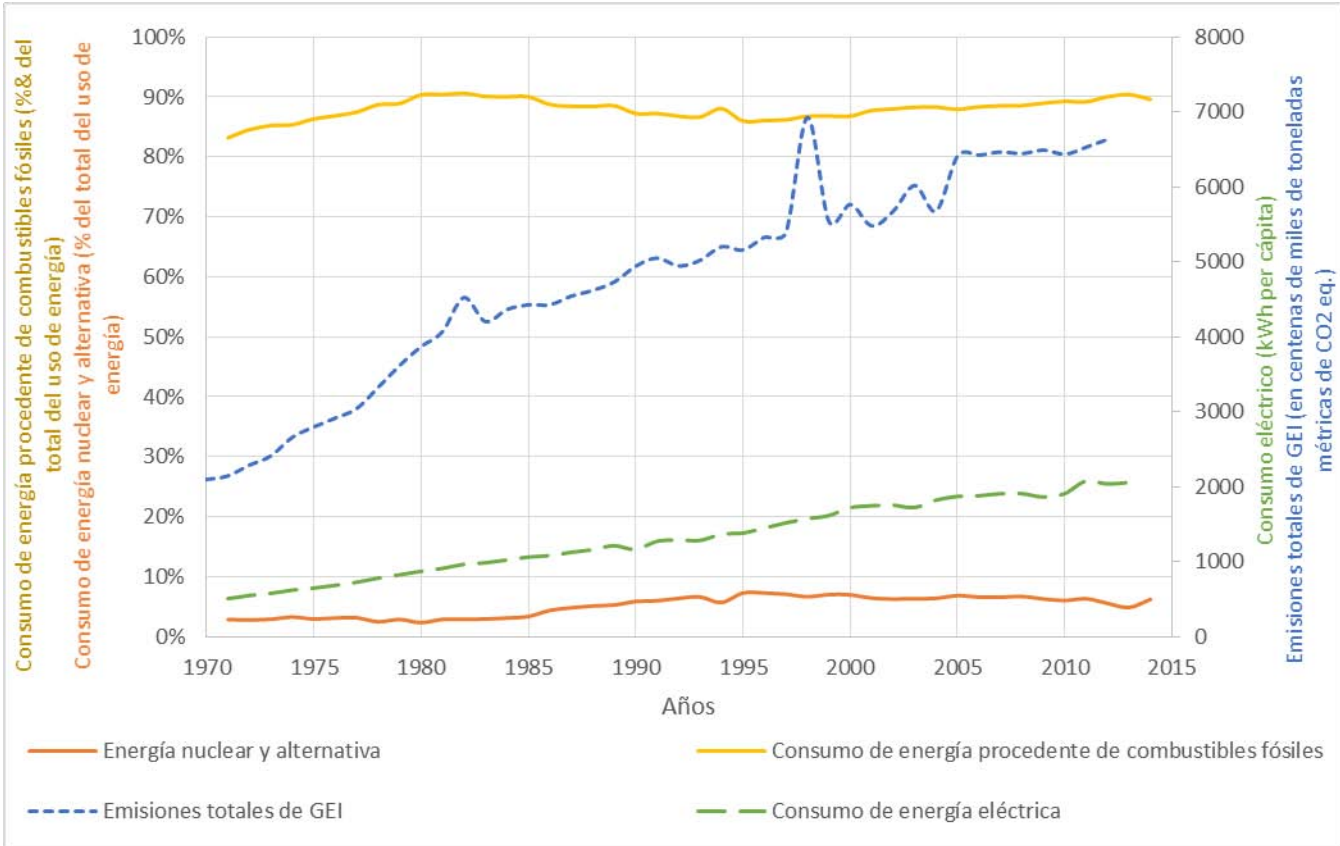


Gráfico 8. Porcentaje del consumo anual por grupo de combustible en México
Fuente. Elaboración propia con datos de El Banco Mundial, 2016.

Capítulo 3. Evaluación de Emisiones Atmosféricas del Sector Eléctrico Mexicano

Una de las principales preocupaciones de la humanidad es legar a las futuras generaciones un medio ambiente que asegure un progreso socioeconómico digno y saludable. Ante los retos que han sido impuestos por la afectación que actualmente conllevan los diferentes fenómenos vinculados con el deterioro de nuestro hábitat, en el marco de la globalización de las economías, es ahora imposible subestimar las consecuencias de los mismos. La preocupación por el medio ambiente, por parte de los consumidores conscientes, es tan importante como la calidad de los productos y servicios que exige. Por tal motivo, la industria moderna enfrenta el reto de producir con la más alta calidad y al mismo tiempo satisfacer las expectativas de los consumidores y, en general, de la sociedad en el tema de la protección del medio ambiente¹⁰¹.

Esta preocupación ha aumentado el interés en el desarrollo de métodos para comprender mejor y reducir los impactos ambientales en las cadenas productivas. Los consumidores, funcionarios administrativos y empresas pueden utilizar estos métodos como guía para adquirir productos y, a la vez, mejorar el desempeño ambiental de sus actividades optimizando sus procesos de producción.

El impacto ambiental de un producto o servicio inicia con la extracción de las materias primas y termina cuando la vida útil de éste finaliza, siendo gestionado adecuadamente como un residuo. Durante la fabricación, las empresas deben evaluar el impacto ambiental que tienen sus procesos, además, de tener la responsabilidad sobre el impacto que ocasionan las partes involucradas en tanto el uso o utilización del producto o servicio por el cliente consumidor, su tratamiento final, reciclado; hasta su disposición final. “Desde el nacimiento hasta la tumba” es lo que se denomina ciclo de vida de un producto.

¹⁰¹ Romero Rodríguez, B. (2003). *El Análisis del Ciclo de Vida y la Gestión Ambiental*. 1st ed. [ebook] México. Disponible en: <http://www.iiie.org.mx/boletin032003/tend.pdf> [Consultado 11 Jun. 2016].

3.1 El Análisis del Ciclo de Vida

Los impactos asociados con los productos, en la etapa de manufactura y consumo, son de gran relevancia porque contribuyen al cambio climático, a la contaminación de ecosistemas, a la sobre-explotación de recursos renovables y no renovables, y al mal uso de los recursos disponibles¹⁰².

La sostenibilidad de los recursos naturales y un desarrollo económico ajustado a la realidad de nuestro país, el cual enfrenta escasez de recursos, contaminación excesiva y baja eficiencia productiva, dependen de las acciones que se tomen para disminuir el impacto de los procesos productivos y de la optimización de los mismos.

El análisis del ciclo de vida (ACV) de un producto es una de las principales metodologías utilizadas actualmente que identifica, cuantifica y caracteriza los diferentes impactos ambientales potenciales asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto, la extracción y adquisición de la materia prima, el proceso, utilización, reciclado y, por último, la disposición final (ver Ilustración 30). Básicamente, se enfoca al rediseño de productos bajo el criterio de que los recursos energéticos y materias

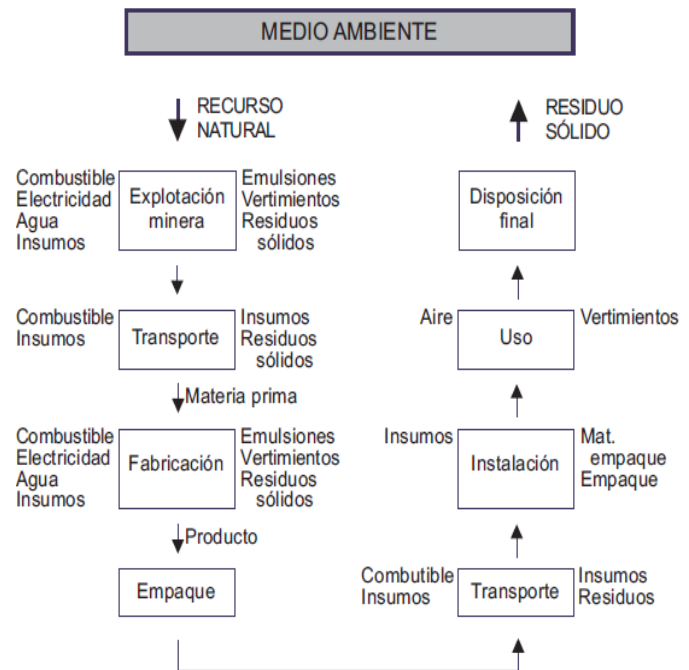


Ilustración 30. Etapas del análisis del ciclo de vida
Fuente. CNPLM, 2001.

primas no son ilimitados y que, normalmente, se utilizan más rápido en comparación a como se reemplazan o surgen nuevas alternativas. Por tal motivo, la conservación de recursos privilegia la reducción de la cantidad de residuos generados (a través

¹⁰² Conservación & Carbono S.A.S (2016). *Análisis del Ciclo de Vida – ISO 14040 « Conservación y Carbono | Por un desarrollo sostenible.* [online] Disponible en: <http://www.conservacionycarbono.com/analisis-del-ciclo-de-vida-iso-14040> [Consultado 11 Jun. 2016].

del producto o servicio), pero ya que éstos se seguirán produciendo. El ACV plantea manejar los residuos en una forma sustentable –desde el punto de vista ambiental–, minimizando todos los impactos asociados con el sistema de manejo y resaltando las etapas de mayor impacto.

La Organización Internacional para la Estandarización (ISO) es el organismo que ha desarrollado una serie de estándares enfocados a la Administración o Gestión Ambiental. Estos estándares incluyen las series ISO-14040 sobre el ACV, que son de carácter voluntario.

El ACV evalúa los aspectos ambientales y los impactos potenciales asociados con un producto, mediante:

- La recopilación de un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema del producto.
- La evaluación de los impactos potenciales ambientales asociados con estas entradas y salidas.
- La interpretación de los resultados de las fases de análisis de inventario y evaluación de impacto de acuerdo con los objetivos del estudio.

El alcance, límite y nivel de detalle del estudio del ACV dependen del caso y la aplicación prevista del estudio. La profundidad y la amplitud de los estudios del ACV pueden diferir considerablemente dependiendo del objetivo del estudio particular. Sin embargo, en todos los casos, deberían seguirse los principios y estructura establecidos en la ISO. La metodología del ACV considera una serie de fases de trabajo las cuales son explicadas en el Apéndice 4.

3.2 El Análisis del Ciclo de Vida aplicado a centrales eléctricas

La emisión de gases de efecto invernadero y su implicación en el cambio climático ha provocado en las últimas décadas un intenso interés mundial en la comprensión de la contribución a este problema correspondiente a la industria de la generación eléctrica. La producción de energía eléctrica, comprendiendo los procesos de extracción, producción, transporte y disposición de residuos,

representa una de las fuentes más importantes de gases de efecto invernadero a nivel mundial. El Análisis de Ciclo de Vida es uno de los estudios más adecuados para evaluar y comparar las cargas ambientales globales para la gama de tecnologías que este sector propone en sus diferentes planes, a fin de impulsar la utilización de tecnologías de baja emisión de carbono equivalente. La Ilustración 31 muestra un ejemplo de las etapas que el ACV puede evaluar en una planta nucleoelectrica.

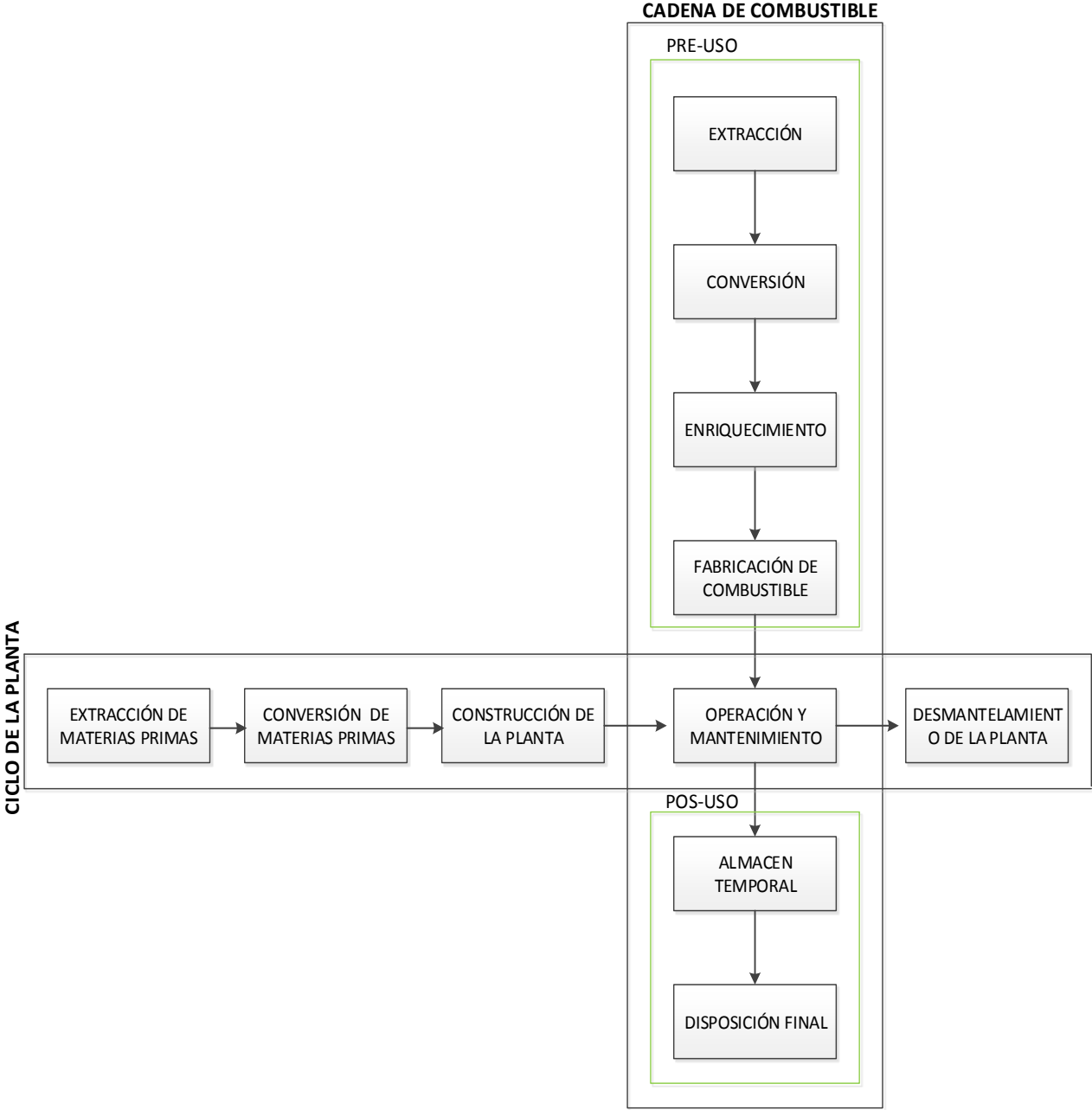


Ilustración 31. Etapas del ciclo de vida de una planta nucleoelectrica.
Fuente. Hernández del Moral, 2015.

La anterior Ilustración representa una de las tecnologías que incluyen más etapas en el ACV, debido a la complejidad del tratamiento del combustible y su disposición, siendo importante aclarar que la etapa de Operación y Mantenimiento es la etapa de Generación de Electricidad y que la flecha señalada entre cada etapa indica el transporte del combustible en sus diferentes estados de acondicionamiento o evolución de la planta. Para el caso de las tecnologías fósiles, las etapas del ciclo de combustible deben ser reemplazadas por las llamadas cadenas energéticas de combustible, las cuales son específicas para cada tecnología y se representan a continuación.

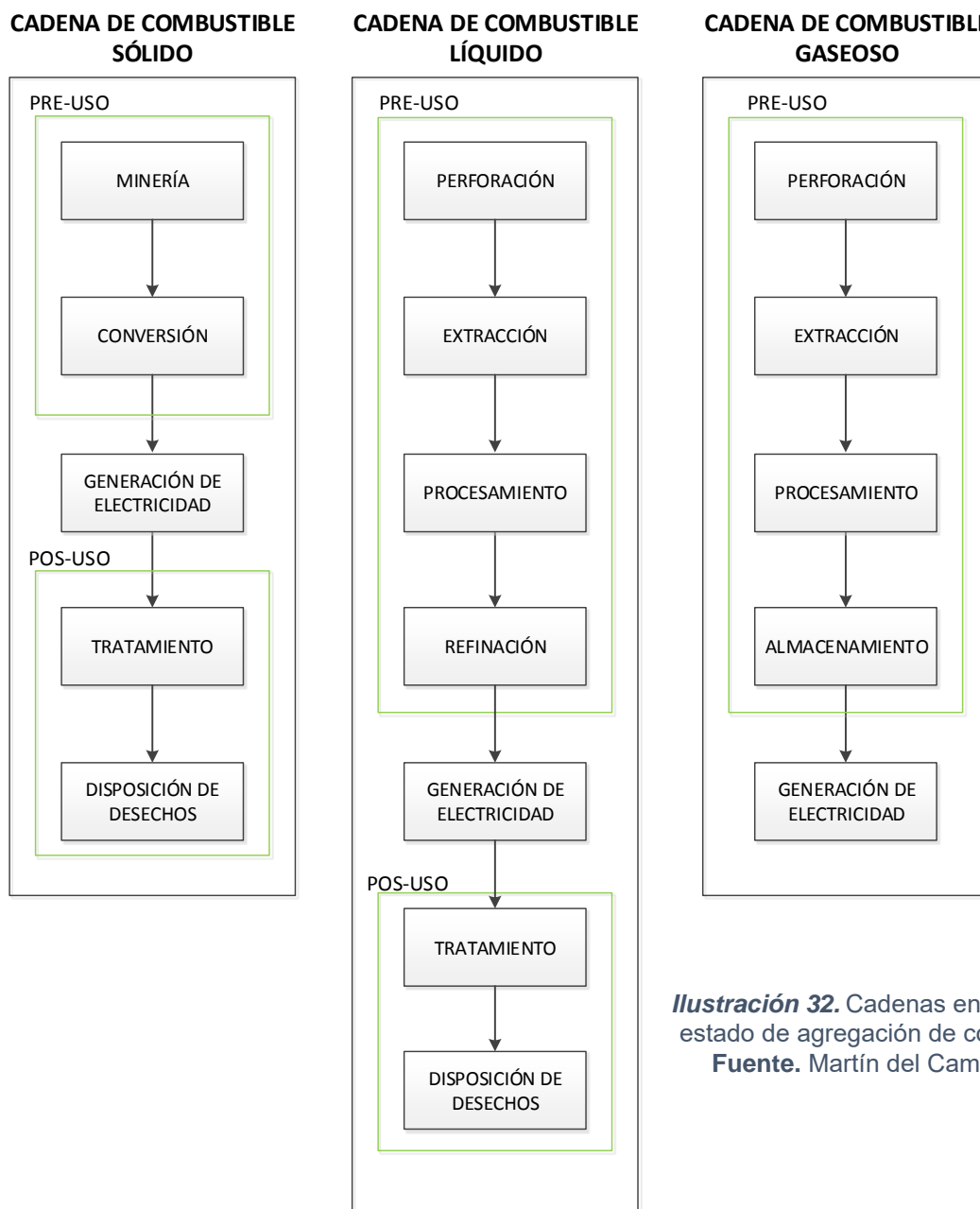


Ilustración 32. Cadenas energéticas por estado de agregación de combustibles.
Fuente. Martín del Campo, 2007.

El mercado eléctrico actualmente representa, en sus precios finales, sólo los costos asociados a su construcción, operación y mantenimiento. El costo de operación incluye el costo del combustible, pero no involucra los costos asociados a los daños ambientales, a pesar de que éstos son externalizados a la sociedad en general.

Como se ha mencionado anteriormente, actualmente existen muchos y diferentes métodos de producción de energía eléctrica. Cada uno tiene ventajas y desventajas con respecto al costo de operación, impacto ambiental, entre otros. En relación con la emisión de GEI, cada método de generación emite estos gases en distintos niveles, dependiendo la etapa del ciclo de vida de la planta, ya sea la construcción, operación (incluyendo las cadenas energéticas del combustible) y el desmantelamiento de la planta. Algunas tecnologías de generación, tales como las que usan combustibles fósiles, tienen una tasa de emisiones comúnmente alta y es generada principalmente durante la etapa de operación. Otras tecnologías como los parques eólicos o las centrales nucleares, no tienen emisiones significantes durante su operación, por lo que su impacto ambiental es bajo y sus emisiones son generadas principalmente en las etapas de construcción y desmantelamiento. La contabilización de la generación de gases emitidos a la atmósfera durante todas las fases mencionadas se conoce como las emisiones de ciclo de vida de una central eléctrica. La normalización de estas emisiones permite comparar equitativamente los diferentes modelos de generación eléctrica con base en la cantidad de energía producida, es decir, la cantidad de contaminante por unidad de watt hora generado. Cuanto menor sea este valor, menor serán las emisiones de GEI generados en el tiempo de vida total de la planta.

A nivel internacional, los estudios de ciclo de vida son referentes obligados en la toma de decisiones para nuevos proyectos de energía, particularmente en la Unión Europea y Japón. En Estados Unidos, son insumos fundamentales cuando se trata de obras o iniciativas polémicas. En México, estos estudios son muy escasos y excepcionales, y por lo general son sustituidos por cálculos lineales de emisiones

contaminantes sin llegar a evaluar sus implicaciones a los ecosistemas regionales y globales¹⁰³.

El Instituto Central de Investigación de la Industria Eléctrica (CRIEPI) en Tokio, Japón, ha aplicado este estudio en todos sus sistemas de generación eléctrica (Apéndice 4) y mostrado sus resultados en su informe “Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case”. A continuación (Tabla 3) se muestran los valores totales de emisiones de ciclo de vida en toneladas de CO₂ equivalente por miles de millones de watt-hora generados (GWh).

Tabla 3. Intensidad de emisiones de ciclo de vida por tecnología

TECNOLOGÍA	Toneladas de CO₂ eq./GWh
Carbón	975.2
Petróleo	742.1
Gas Natural	607.6
Ciclo Combinado	518.8
Nuclear	24.2
Hidroeléctrica	11.3
Geotermia	15
Eólica	29.5
Fotovoltaica	53.4
Biomasa	57

Fuente. Hondo, H. 2005.

Siguiendo lo anteriormente dicho, se puede hacer una comparación de emisiones totales de ciclo de vida por tecnología de generación eléctrica (Gráfico 9), al usar la información encontrada en el reporte “Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources” del World Nuclear Association se pueden expresar los máximos y mínimos valores de este factor, los cuales coinciden con el valor promedio para cada tecnología de este reporte con el publicado por el CRIEPI, y son los valores usados para proponerla.

¹⁰³ Centro Mario Molina (2013). *Análisis de ciclo de vida de casos de estudio de futuras centrales eléctricas en México*. 1st ed. [ebook] México. Disponible en: <http://centromariomolina.org/wp-content/uploads/2014/01/3.-ACV-CentralesElectricasM%C3%A9xico.pdf> [Consultado 18 Jun. 2016].

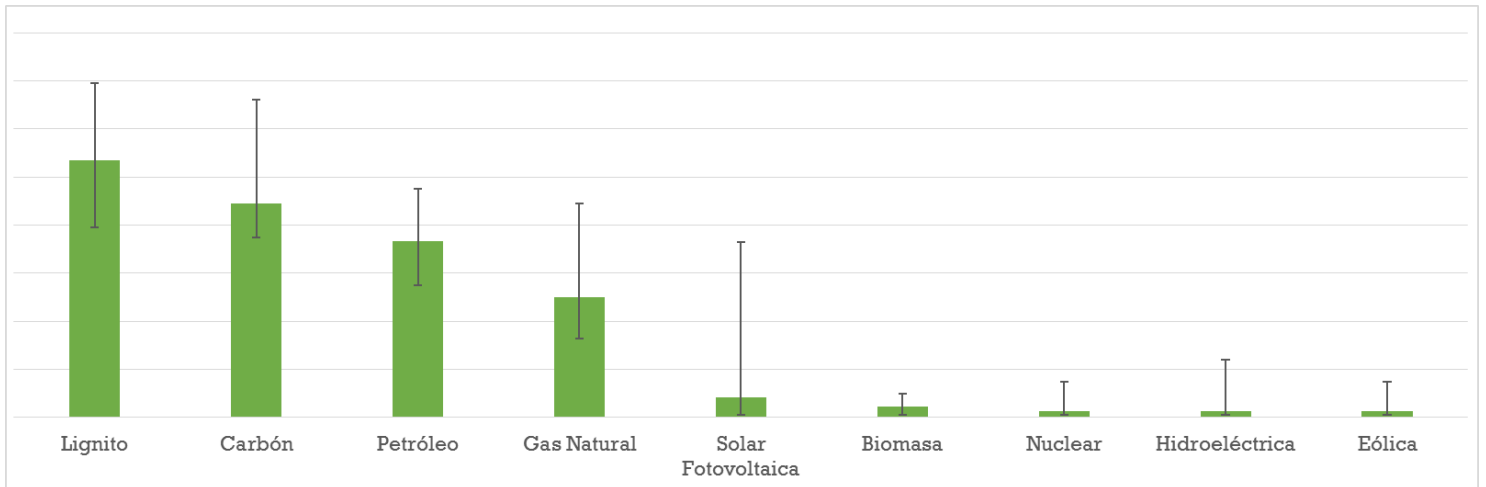


Gráfico 9. Comparación de emisiones totales por ciclo de vida de diferentes fuentes de energía y tecnologías.
Fuente. World Nuclear Association, 2011.

Como puede esperarse, las tecnologías que tienen una mayor tasa de emisiones en el transcurso de su ciclo de vida son aquellas cuya producción eléctrica depende de fuentes fósiles tales como el carbón y petróleo. En contraposición se encuentran las centrales que producen electricidad a partir de la explotación de fuentes nucleares, eólicas, hidroeléctricas y de biomasa.

De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, en el mundo se emiten aproximadamente 54 giga-toneladas de CO₂ eq. anualmente a partir de múltiples fuentes, de las cuales la producción eléctrica es responsable de 20 giga-toneladas, lo cual constituye el 37% de las emisiones globales totales¹⁰⁴. Contrastando con lo anterior, se espera que en los siguientes 20 años la demanda eléctrica aumente en 43%¹⁰⁵. Este crecimiento substancial requerirá de la construcción de muchas nuevas centrales de generación eléctrica y será necesario que la construcción de estas centrales, así como su operación y desmantelamiento, limiten sus emisiones de GEI.

¹⁰⁴ International Energy Agency. Energy Technology Perspectives [Online]. 2008 [Consultado Jul 1, 2016]; Disponible en; <http://www.iea.org/w/bookshop/add.aspx?id=330>

¹⁰⁵ International Atomic Energy Agency, World Energy Outlook 2009 – GLOBAL ENERGY TRENDS TO 2030 [Online], 2009 [Consultado Jul 1, 2016]; Disponible en <http://www.iea.org/W/bookshop/add.aspx?id=388>

Siguiendo lo anteriormente mencionado. En el 2010, México ocupó el lugar número 12 dentro de las economías con mayores emisiones de GEI y el cual contribuye actualmente con el 1.37% de las emisiones totales de estos gases globalmente.

Dada la dependencia a la quema de combustibles fósiles del sector eléctrico mexicano, a finales del 2014 el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero¹⁰⁶ reportó que en México se emitió un total de 436,085.809 de miles de toneladas de CO₂ eq. para ese año, de los cuales 115,819.376 fueron generadas por este sector, siendo aproximadamente el 27% de las emisiones totales. Esto se debió a la alta participación de tecnologías convencionales, las cuales llegaron a cubrir el 80% de la generación total, siendo el ciclo combinado el mayor representante de este grupo y la tecnología que mayor emisión de GEI tuvo para este año.

Es una realidad que en México siempre ha predominado el uso de tecnologías convencionales y esto se debe en gran medida a la alta riqueza de combustibles fósiles que en el pasado nuestro país llegó a tener, la predominación de estas tecnologías han sido el sustento de este sector y tal es el ejemplo que tenemos para el periodo 1990-2015 en el Gráfico 10, donde se puede observar que el aumento de la generación eléctrica nacional va de la mano con el aumento de la generación de tecnologías convencionales y es en este periodo donde se observa que las energías limpias se mantienen en el mismo nivel.

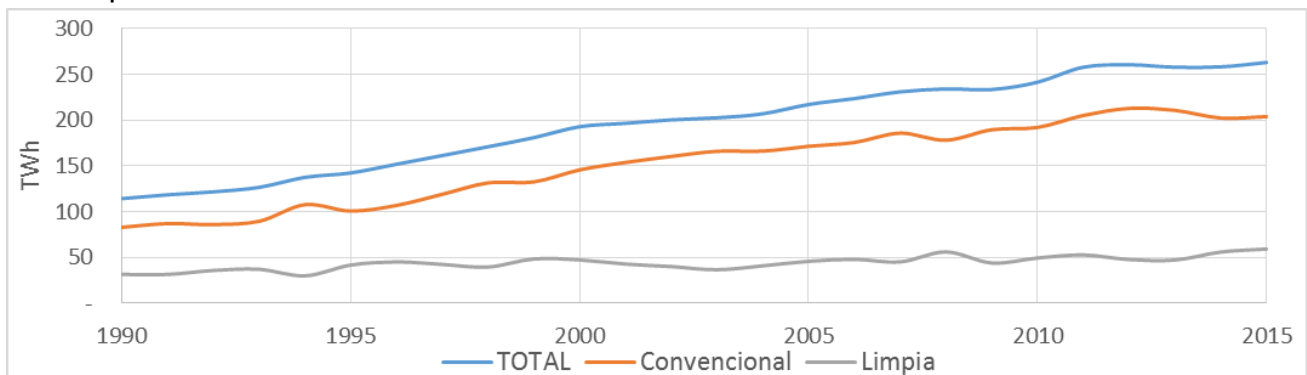


Gráfico 10. Historial de generación por agrupación de tecnologías.
Fuente. Elaboración propia con datos de la SENER.

¹⁰⁶ Inventario de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 2014. (2015). 1st ed. [ebook] México. Disponible en: http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/INEGEI_2014_EMISIONES_QUEMA_COMBUSTIBLES_FOSILES_1.pdf [Consultado 21 Jun. 2016].

Para el 2014, los resultados de la evaluación del sector eléctrico nacional de la Secretaría de Energía indicados en la Prospectiva del Sector Eléctrico¹⁰⁷ señalan que para satisfacer la demanda de energía eléctrica nacional para ese año fueron necesitados 65,452 MW, lo que en generación consumida bruta fueron 301,462 GWh. En el Gráfico 11 se muestra el parque de generación del año 2014, donde se puede observar la participación de cada tecnología.

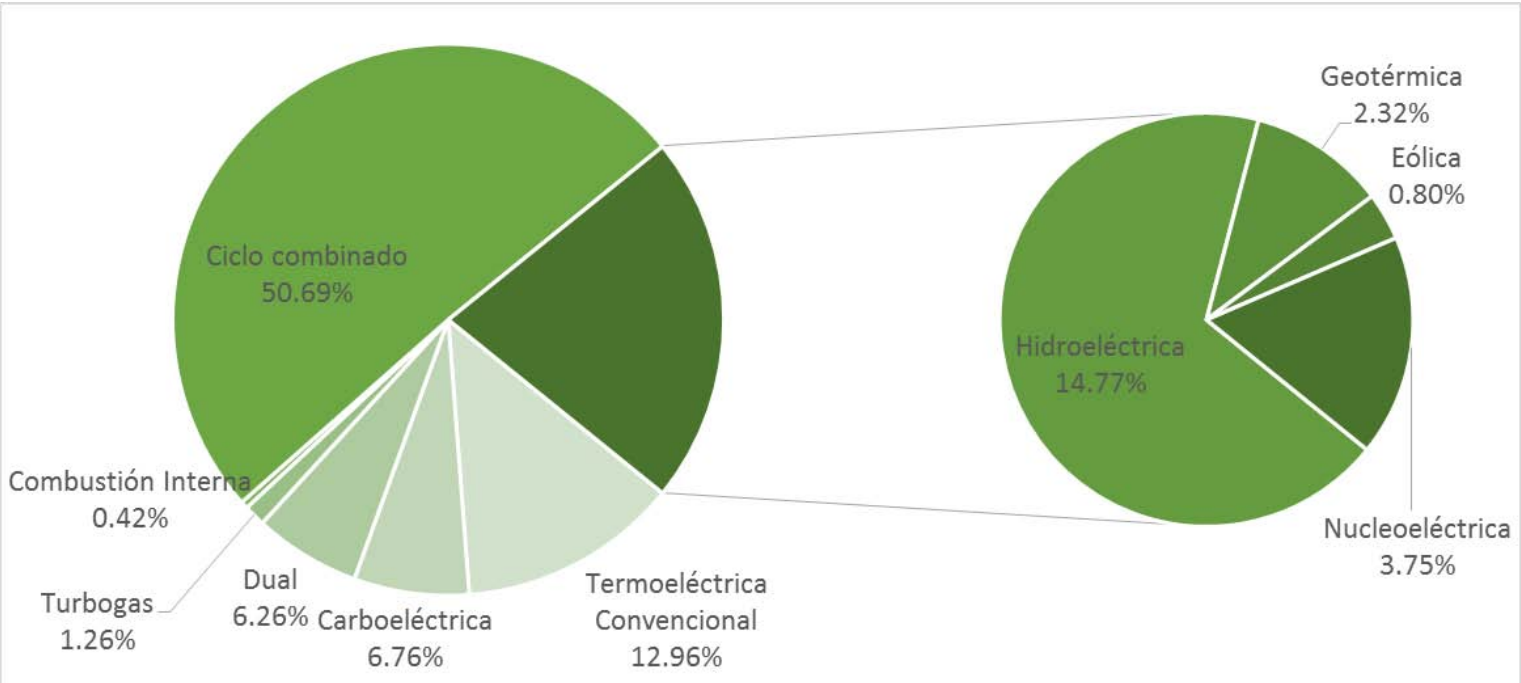


Gráfico 11. Participación de tecnologías en el total de energía eléctrica generada para el 2014.
Fuente. Información de PRODESEN 2015-2029, SENER.

Usando los factores de ciclo de vida para las tecnologías señaladas en la Tabla 3, pueden ser calculadas las emisiones generadas por la operación de cada una, mostradas en los Gráficos 12a y 12b.

¹⁰⁷ Secretaría de Energía (SENER), (2015). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2015-2029*. México.

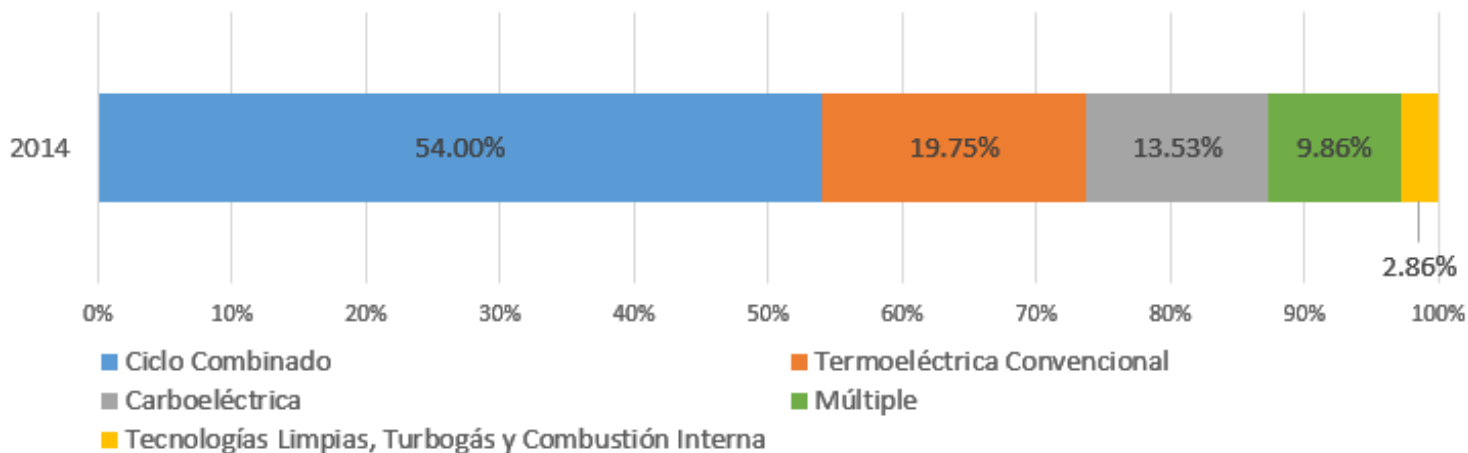


Gráfico 12a. Emisiones por tipo de tecnología para el 2014.
Fuente. Elaboración propia con datos de la SENER y Hondo, H.

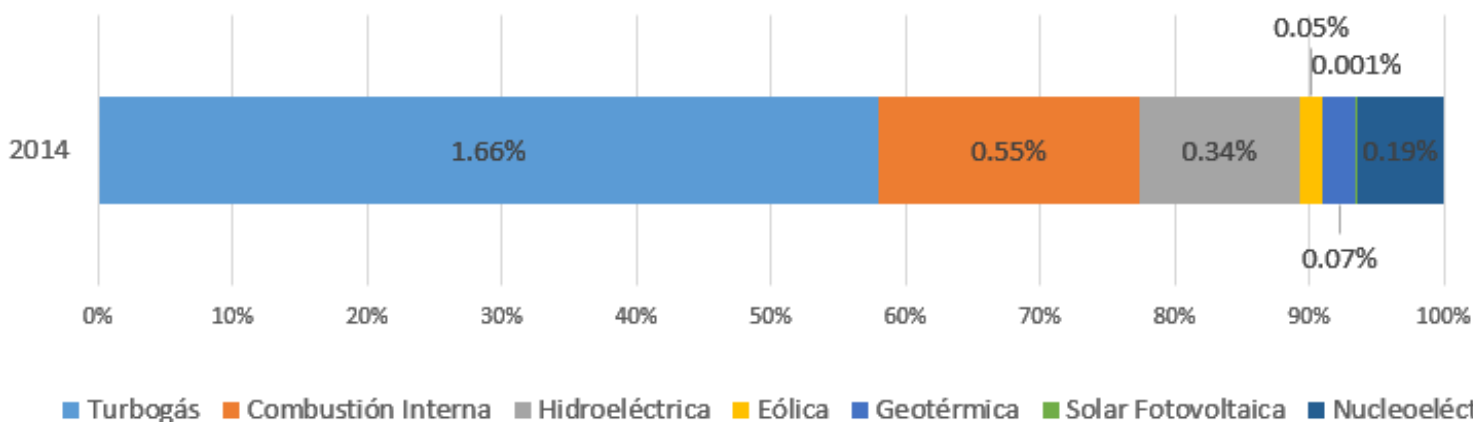


Gráfico 12b. Emisiones por tipo de tecnología dentro del grupo de tecnologías limpias para el 2014-
Fuente. Elaboración propia con datos de la SENER y Hondo, H.

Dada la alta participación de las centrales de ciclo combinado en este año, es razonable el que esta tecnología convencional sea la que más emisiones generó de entre todas. La segunda mayor tecnología en la participación de generación eléctrica es la hidroeléctrica, la cual, a diferencia del ciclo combinado, generó sólo el 0.19% de las emisiones totales, seguida por las centrales termoeléctricas convencionales y carboeléctricas, las cuales le siguen a las de ciclo combinado en la emisión GEI. Es importante señalar que, para este año, el 99.35% del total de las emisiones generadas por este sector fueron originadas por tecnologías convencionales, mientras el 0.65% restante por tecnologías limpias.

Las centrales múltiples son aquellas que cuentan con más de una tecnología de generación; es decir, se agrupan los generadores con turbinas de gas y combustión interna, gas y vapor en pequeña escala, hidroeléctrica y vapor, hidroeléctrica y

combustión interna, así como vapor y combustión interna. Aunque la participación de las centrales múltiples fueron muy bajas en la generación eléctrica, esta tecnología se posicionó en el cuarto lugar de las tecnologías con mayor tasa de emisiones.

Dentro de los ejercicios de planeación eléctrica de la Secretaría de Energía reportados en el PRODESEN está el calcular la capacidad de generación eléctrica que se debe de adicionar al término del periodo 2015-2029 para satisfacer el requerimiento eléctrico de nuestra sociedad. El resultado de este ejercicio señaló que la capacidad que se debe de adicionar es de 59,986 MW, cuando en el 2014 se contaban con 65,452 MW, lo que en generación bruta sería aumentar la misma en 149,646 GWh, mientras que el 2014 fueron consumidos 258,256 GWh. Sin embargo, este documento solamente menciona a detalle la evolución de las adiciones de capacidad por tecnología, así como el programa indicativo de retiro de centrales eléctricas, con lo cual puede calcularse la evolución de capacidad instalada por tecnología para el mismo periodo y con ello se puede predecir las proyecciones de explotación de fuentes de energía año con año. Los gráficos 5a y 5b muestra el comportamiento de esta evolución.

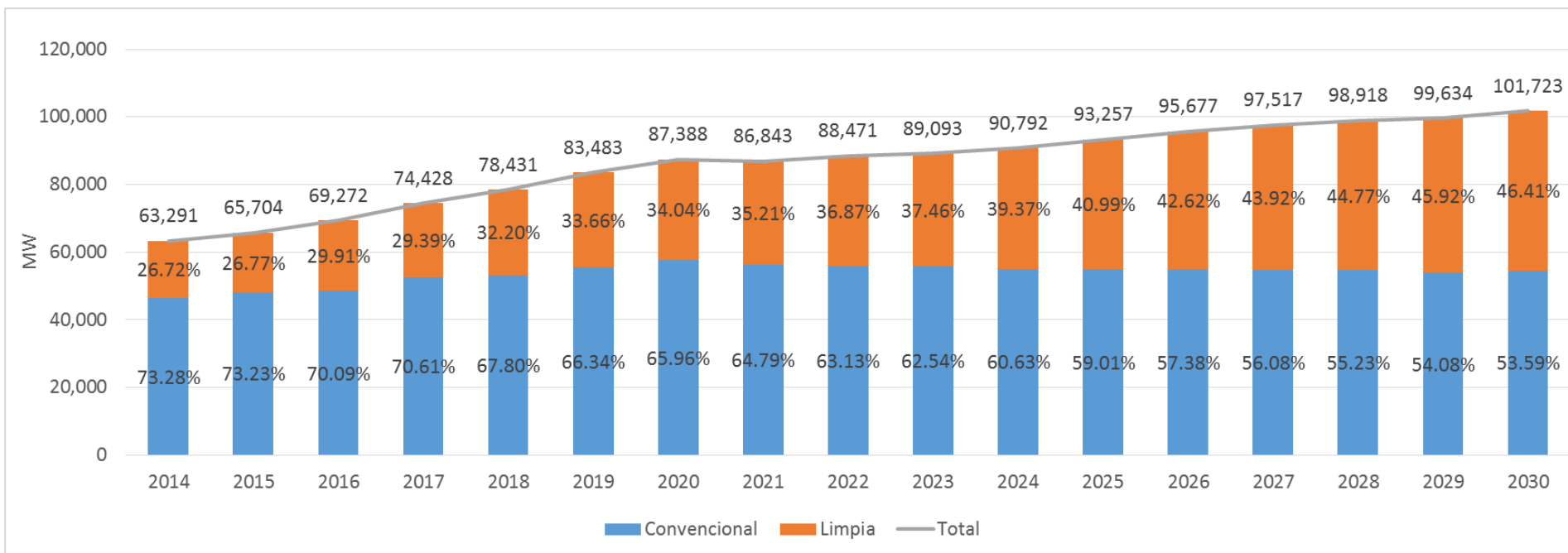


Gráfico 13a. Evolución de adición de capacidad por grupo de tecnología.
Fuente. Información de PRODESEN 2016-2030, SENER.

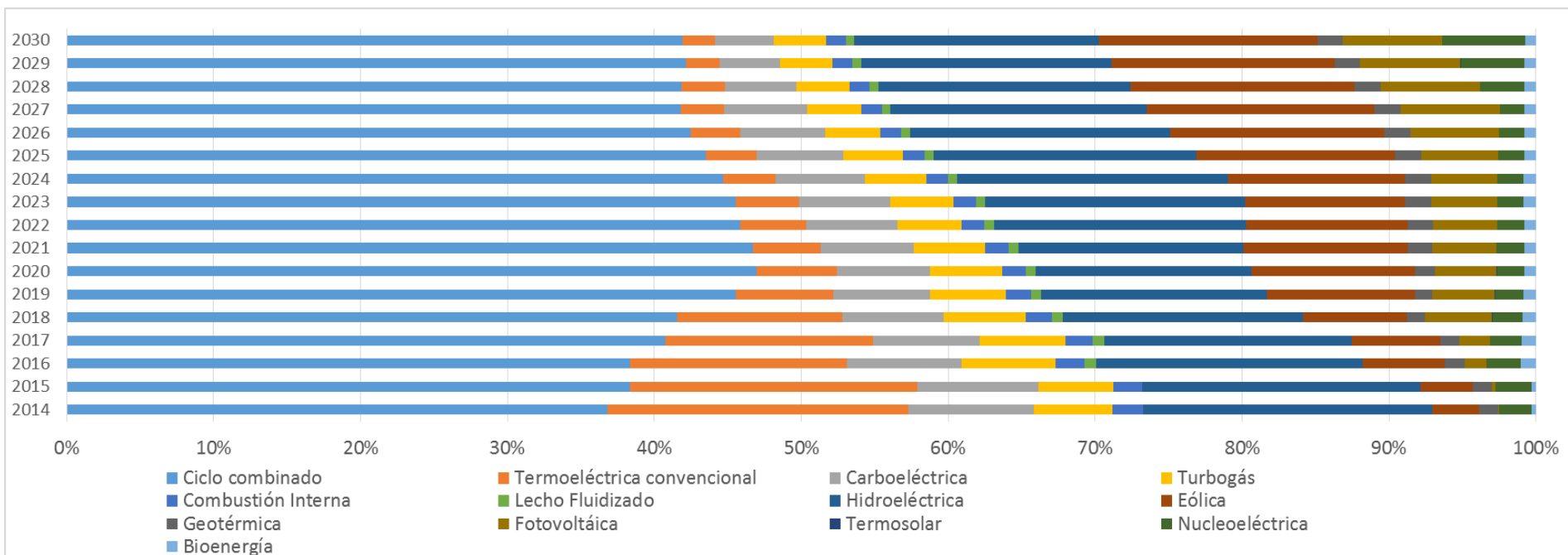


Gráfico 13b. Evolución de adición de capacidad por tipo de tecnología.
Fuente. Información de PRODESEN 2016-2030, SENER.

En los Gráfico 13a puede observarse el aumento de la capacidad de las tecnologías convencionales y limpias a través de los años del periodo en estudio, donde la evolución de la capacidad de fuentes limpias de energía eléctrica muestra un crecimiento promedio hasta el año 2020, cuando la tasa de crecimiento de este tipo de tecnologías empieza a tener una mayor pendiente. Para mayor análisis, el Gráfico 13b desarrolla la evolución de la capacidad instalada por tipo de tecnología, donde la tecnología que tiene mayor visualización de explotación es la de ciclo combinado para las tecnologías convencionales, y la eólica para las tecnologías limpias. Para el año 2016, la capacidad de parques eólicos empezará a mostrar un mayor crecimiento y en el 2018, el ciclo combinado. El alto crecimiento de capacidad de estas tecnologías se debe al reemplazo de centrales termoeléctricas y carboeléctricas, ya que en el 2018 empezará a ser cada vez más rápido su retiro.

Para poner en marcha el aumento de capacidad en el sector eléctrico mexicano, el gobierno ha calculado la cantidad monetaria de inversión por año de las principales centrales que formarán parte del mismo, en el Gráfico 14 pueden observarse la distribución anual del monto total de 654 miles de millones de pesos.

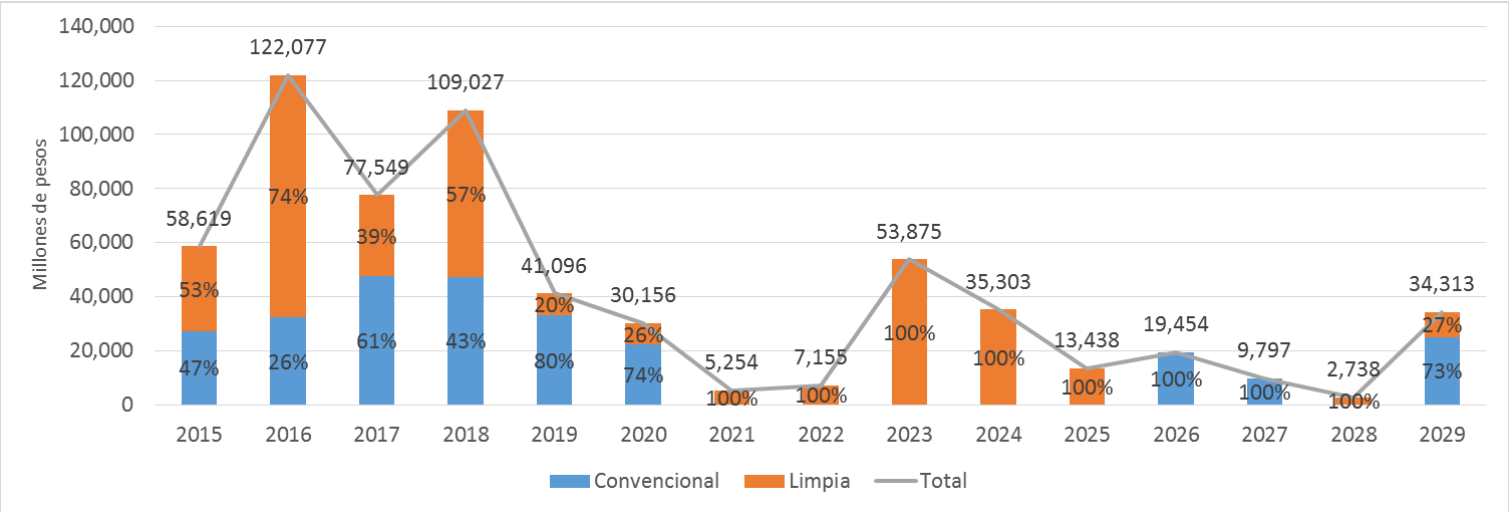


Gráfico 14. Evolución de inversión por grupo de tecnología.
Fuente. Información de PRODESEN 2015-2029, SENER.

El año con mayor inversión es el 2016, seguido por el 2018 y después por el 2017. Para los dos mayores años se puede observar que la prospectiva de planeación apuesta con más del 50% a las tecnologías limpias. Estos años fomentarán las

bases de una mayor participación de generación de fuentes limpias, las cuales en el periodo del 2020 al 2025 serán las únicas tecnologías en las que se invertirá, concluyendo este periodo al mantenerse por arriba del 40% de la capacidad total de generación. Durante el periodo 2015-2029 la inversión energética total recaerá principalmente en las tecnologías limpias al recibir más del 57% del monto invertido total, dentro de las cuales la energía eólica, la hidroeléctrica y la energía solar (en ese orden) serán las fuentes de energía que se buscarán explotar en mayor medida. El aproximadamente 43% restante del mismo monto será invertido en centrales convencionales, el cual será prioritariamente invertido en centrales de ciclo combinado, dejando sólo 3.6 puntos porcentuales a las restantes tecnologías de este grupo. A continuación (Gráfico 15) se muestra la inversión total por tecnología en el periodo 2015-2029.

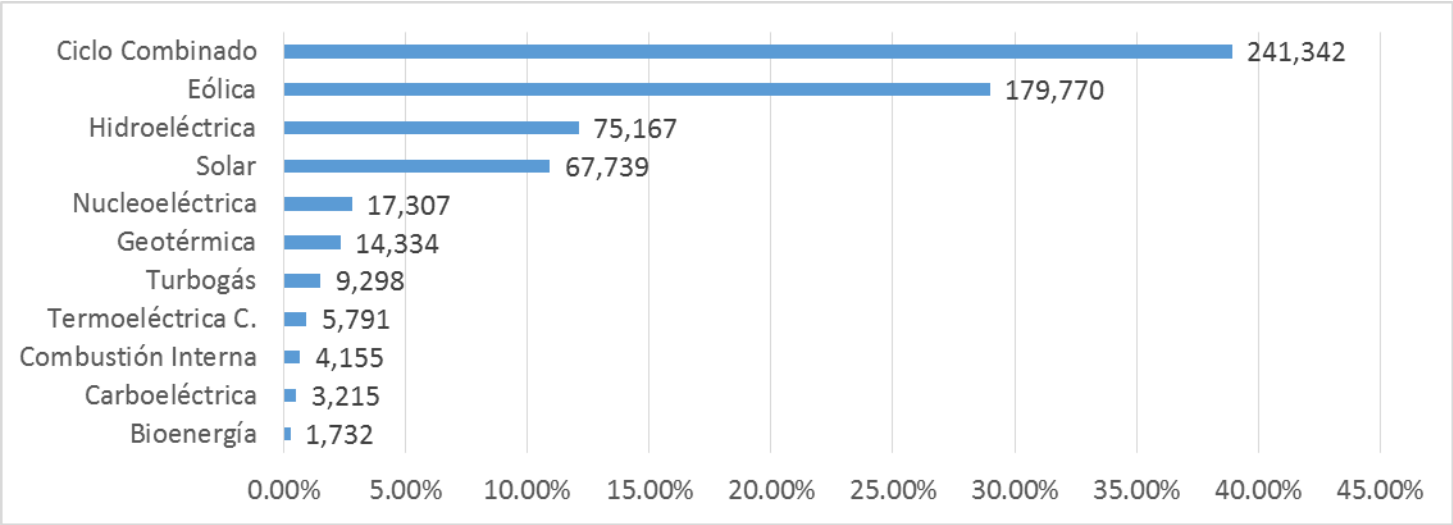


Gráfico 15. Inversión total por tipo de tecnología
Fuente. Información de PRODESEN 2015-2029, SENER.

Aunque la inversión total apoya a las fuentes energéticas limpias, la tecnología que recibirá mayor inversión será la de ciclo combinado y esto se debe a que ésta reemplazará la generación de la mayoría de las tecnologías convencionales, posicionándose como la más importante de ese grupo. Es importante señalar que la evaluación de la inversión de las diferentes centrales de generación dentro de la cartera energética mexicana junto con la evolución de adiciones de capacidad de las mismas, puede conducir al cálculo el costo de instalación de capacidad y con ello constatar que la tecnología que mayor inversión requiere por instalación en este

periodo es la hidroeléctrica, seguida por las centrales de combustión interna y después por centrales geotérmicas. En el Gráfico 16 se muestra la relación de la capacidad que se planea instalar por millones de pesos de las diversas tecnologías en el periodo del 2015-2029.

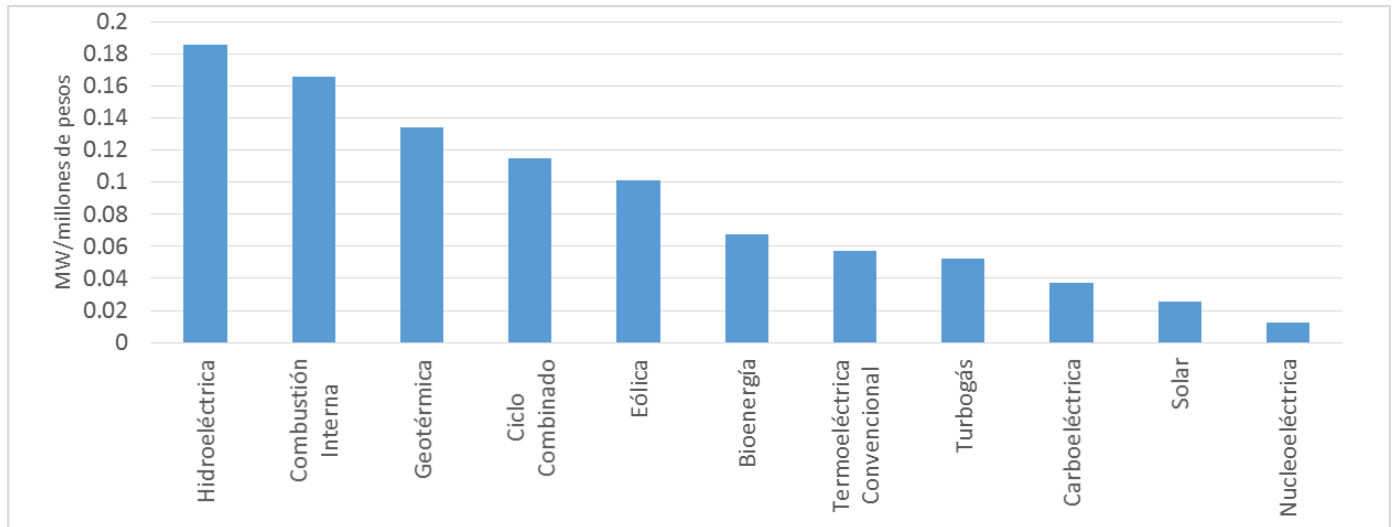


Gráfico 16. Inversión por instalación de capacidad para cada tipo de tecnología.

Fuente. Información de PRODESEN 2015-2029, SENER.

Dados los altos costos de la implementación de capacidad de las centrales hidroeléctricas, se puede observar en la evolución de la capacidad instalada que esta tecnología se mantiene en el mismo rango, por lo que podría concluirse que la inversión planeada para esta tecnología tiene la finalidad de mantener la participación de la misma aproximadamente en el mismo nivel. Por otra parte, también puede observarse que el mediano costo de implementación de capacidad de parques eólicos hace económicamente viable su expansión.

Para entender mejor la razón de dichas inversiones es importante mencionar los diferentes costos que involucran las tecnologías de generación. En el Gráfico 17 son mostrados los costos de construcción, de combustible y de mantenimiento y operación fijo y variable para el escenario medio.

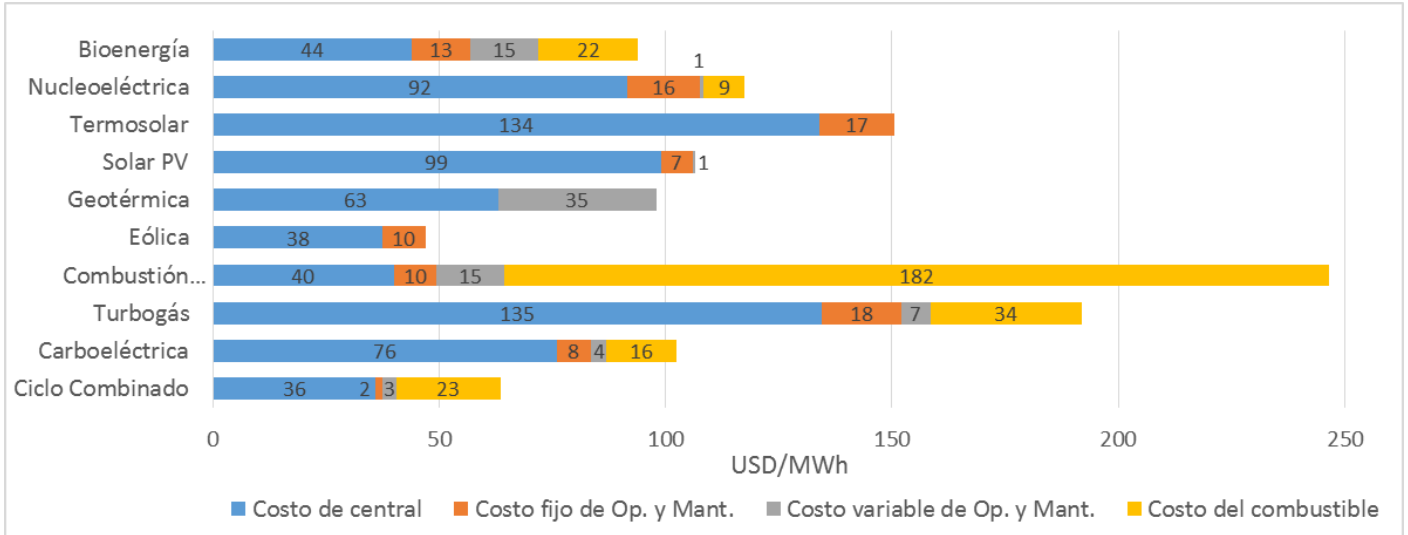


Gráfico 17. Despliegue de costos por tecnología de generación eléctrica.

Fuente. Lazard, 2016.

Como puede observarse en el anterior gráfico, la tecnología que implica menores costos por generación es la eólica y esto se debe principalmente a la fuente de energía que aprovecha y también a su costo de operación y mantenimiento, el cual es nulo para esta tecnología. Otra de las tecnologías que se da a notar es la de ciclo combinado, al tener los menores costos involucrados dentro del grupo de centrales convencionales. Por otra parte, las dos tecnologías que requieren mayor capital para su construcción y funcionamiento son la de combustión interna y turbogás, lo cual es la razón por la cual sólo son usadas en la demanda pico de energía eléctrica.

Con el objetivo de profundizar en el análisis de este trabajo y estudiar más a fondo la participación en la generación total por tecnología planeada para el año 2029, fue consultada la edición 2016-2030 del PRODESEN, en la cual se encuentra indicada la evolución anual proyectada para este periodo de generación de energía eléctrica por tecnología. Para poder dar más contexto a estas cifras y tener una perspectiva más amplia sobre la producción eléctrica en México también fueron consultados los documentos “Prospectiva del Sector Eléctrico 2015-2029” de la SENER y “El Sector Eléctrico en México, 1980-2006” del Centro de Estudios de las Finanzas Públicas (CEFP). Gracias a estos documentos fue posible recolectar información del periodo 1990 -2030. Para un primer acercamiento fueron desarrollados los Gráficos 18a y

18b, en los cuales puede observarse la generación total anual en GWh por grupo de tecnología.

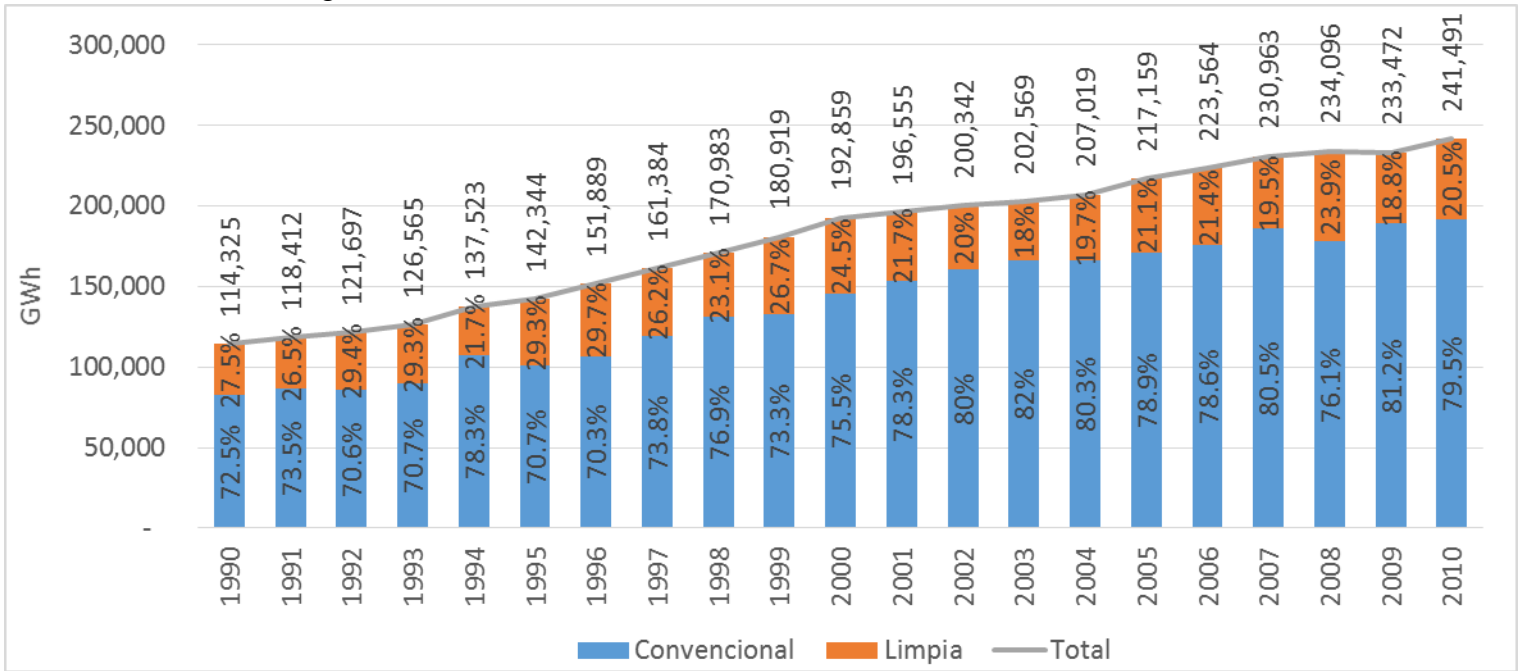


Gráfico 18a. Historial de la evolución de generación eléctrica por grupo de tecnología.

Fuente. Elaboración propia con información de la SENER y del CEFP.

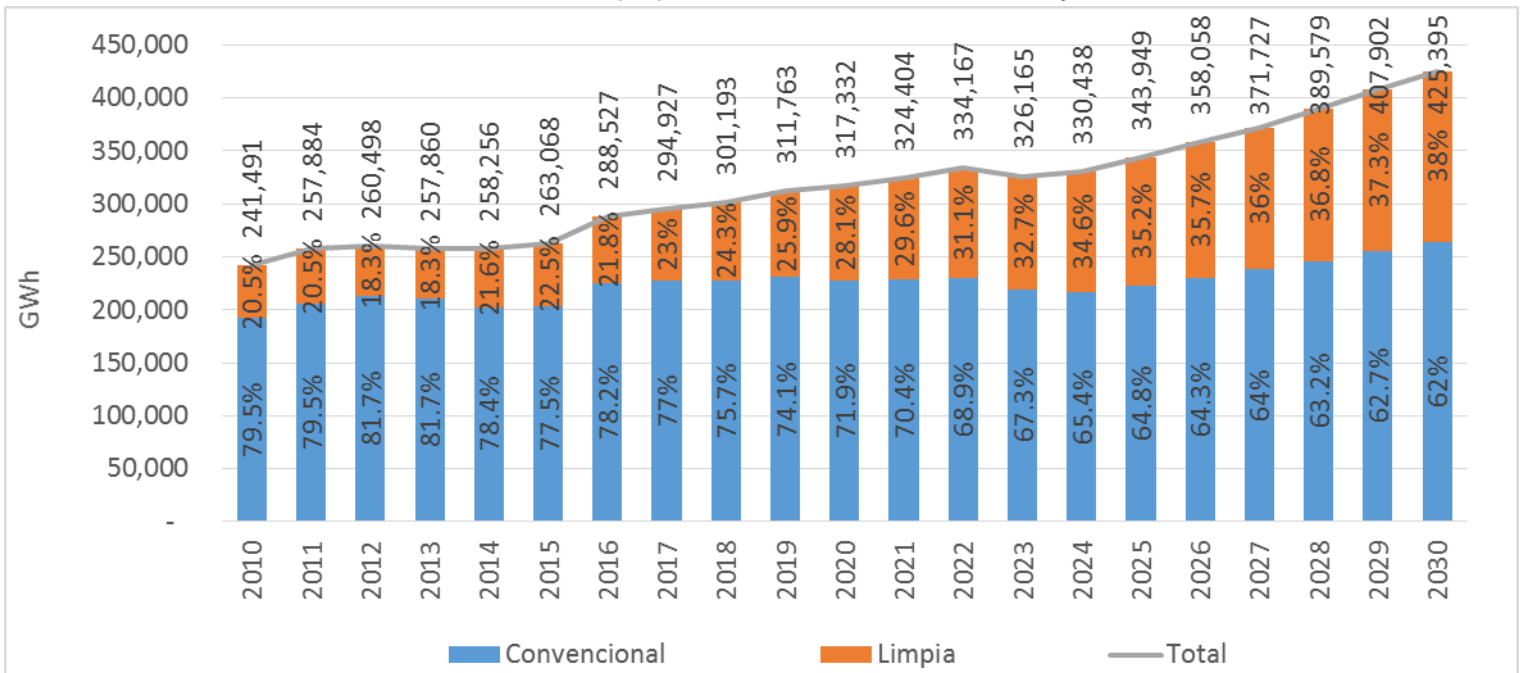


Gráfico 18b. Proyección de generación eléctrica por grupo de tecnología.

Fuente. Elaboración propia con información de la SENER y del CEFP.

Como se ha mencionado en el primer capítulo de este trabajo, la primera planta eléctrica instalada en México inició su operación en 1879, desde ese año la

dependencia eléctrica mexicana empezó y fue creciendo de forma exponencial a través de los años, como prueba de ello para el inicio de la década de los años 1990s (en el que se generaban más de 114,325 GWh), se puede observar que el crecimiento de generación del SEN fue muy rápido, con una tasa de crecimiento promedio de 5%, la cual a inicios del nuevo milenio disminuyó medianamente a 2.6%, manteniéndose así hasta el año 2011, donde el periodo 2011- 2015 puede considerarse el peor con menor generación de energía eléctrica en la historia de producción eléctrica mexicana al tener una tasa de crecimiento del 1.7% y por lo cual puede observarse una meseta en el Gráfico 18b. Para finales de este periodo, de acuerdo con el PRODESEN 2016-2030, se empezó a generar más energía eléctrica, siendo el año 2016 el que se planea tendrá mayor producción eléctrica, al producir 8.8% más de lo que se produjo en el 2015. Este año dará pie a la alza de generación que siguiendo lo planeado en el documento de la SENER en el periodo 2016-2022 tendrá una tasa de crecimiento promedio de 3.3%, esperándose tener una baja de 2.5% en el año 2023, año en el que las tecnologías limpias se les empezarán a dar mayor participación. Por último, para el periodo 2024 al 2030 se retomará la tasa anterior al 2023 y se aumentará ligeramente en al alcanzar 3.7%.

Hablando particularmente de la generación de eléctrica por fuentes limpias y contrastando con el análisis de la evolución de capacidad, a finales del 2019 se planea tener una mayor participación de este tipo de tecnologías y a partir del 2023 se espera que la generación por este tipo de fuentes tenga un mayor alcance, aunque este año represente una baja en la tasa de generación, impulsará a los siguientes a tener una mayor dependencia a los mismos, reservando en la generación eléctrica por este tipo de tecnologías a finales del 2030 el 38% del total planeado.

A continuación, es desplegada la evolución de las tecnologías de conversión energética en la cartera de centrales eléctricas mexicanas en el Gráfico 19, en el cual es detallada la participación por tecnología anual en el periodo 1990-2030.

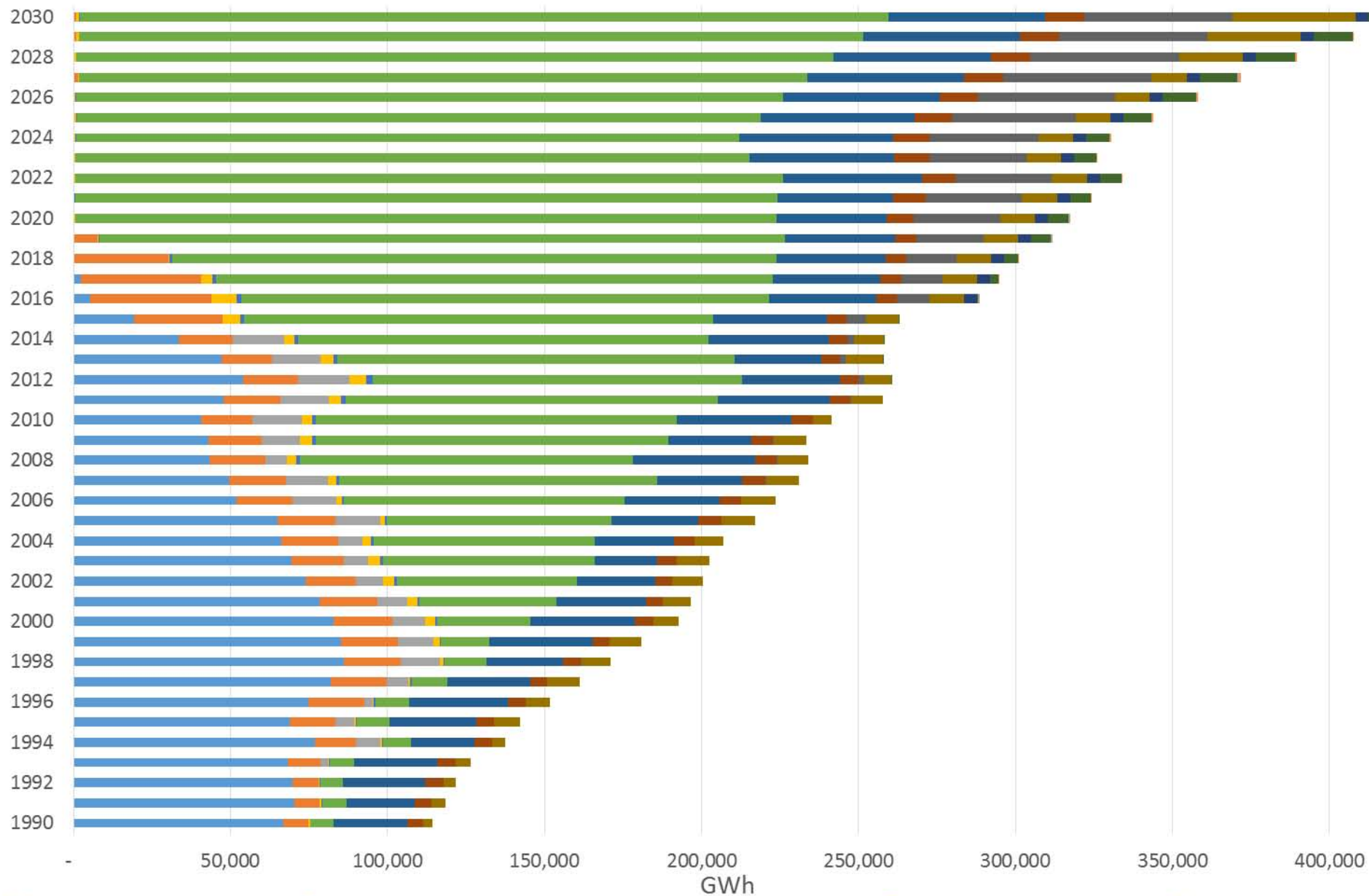


Gráfico 19. Evolución de generación eléctrica por tipo de tecnología.
Fuente. Elaboración propia con información de la SENER y del CEFP.

Para los inicios de la década de los noventa, el registro del Centro de Estudios de las Finanzas Públicas constata la gran dependencia al petróleo en la generación de energía eléctrica en centrales termoeléctricas convencionales en nuestro país, al representar la fuente energética que proveyó más del 50% de la energía eléctrica consumida. Por otra parte, estos años sirvieron de sustento para los inicios de la operación de centrales de ciclo combinado, geotérmica y nuclear. Hablando sobre generación por tecnologías limpias, puede observarse que la hidroenergía es la principal representante de este grupo, al ser la segunda más empleada para estos años. Aunque la generación de esta década es mucho menor a la que actualmente se tiene y en la que un futuro se espera tener, puede observarse que dada la dependencia de combustibles fósiles y el protagonismo del petróleo, segundo energético con mayor tasa de emisiones dentro de las fuentes energéticas explotadas en México, estos años representan las mayores emisiones de contaminantes por generación de watts-hora.

Para inicios del nuevo milenio la generación en GWh aumento en 40.72% en comparación a la que se tenía en 1990, siendo la tecnología con mayor participación la termoeléctrica convencional al proveer más de un tercio de la energía eléctrica total. Otro de los factores más notorios en la generación eléctrica dentro de estas fechas fue el crecimiento de la tecnología de ciclo combinado, la cual desplazó la participación de las centrales hidroeléctricas al tercer lugar, en este año también es notorio el aumento de la explotación de otros energéticos, incluido el carbón.

Catorce años después se observó un aumento en la generación eléctrica de 25.32%, aumento que le dio un cambio radical a la participación de las tecnologías de conversión energética, ante las promesas hechas para combatir el cambio climático. A partir del 2000, la participación de centrales de ciclo combinado dentro del SEN empezaron a ganar gran terreno, tanto así que para el 2004 éstas ya producían la misma cantidad de energía que generaban las centrales termoeléctricas convencionales. A medida que aumentaba la generación de estas centrales, fue disminuyendo la de las centrales que sólo explotaban energéticamente el petróleo, y para el 2014 este tipo de tecnología no sólo fue la

que más participación tuvo, sino, la que mayor crecimiento había tenido. Por otra parte, la tecnología hidroeléctrica ocupó el segundo puesto dentro de las tecnologías con mayor participación. Es importante remarcar que, a partir del 2013, la magnitud de la generación de energía eléctrica usando aerogeneradores empezó a ser considerada como una fuente de energía invertible.

Para el año 2029 se pretende aumentar la generación eléctrica 36.69% en comparación a la que se tuvo en el 2014, lo que es el 52.72% en comparación a la que se tuvo en el 2000. A partir del año 2020, la planeación energética nacional señala el inicio de una nueva etapa en una generación eléctrica más sustentable al proveer esta energía a la sociedad por medios convencionales-fósiles únicamente al hacer uso de centrales de ciclo combinado. De esta forma, la tecnología de ciclo combinado es la que contará con mayor representación en el año 2029, la cual dentro del grupo de tecnologías convencionales es la que menor tasa de emisiones representa. Dentro de la categoría de energías limpias, las tecnologías que mayor participación tendrán son la hidroeléctrica y la eólica, esperando que la generación de parques eólicos iguale a la de las centrales hidroeléctricas, también se planea aumentar la generación por medios nucleares y darle mayor importancia a la energía solar.

En relación a la planeación energética referente al periodo 2015-2029, la meta es, en generación, producir 4,963.2 TWh en la totalidad a partir de todos los energéticos explotables en México. La Tabla 4 enlista las principales tecnologías con mayor participación en el periodo de estudio, mostrando la generación total de cada una en billones de watt-hora.

Tabla 4. Tecnologías con mayor participación en la generación eléctrica en el periodo 2015-2029

<i>Tecnología</i>	<i>TWh</i>
<i>Ciclo combinado</i>	3,170.08
<i>Hidroeléctrica</i>	634.38
<i>Eólica</i>	447.48
<i>Nucleoeléctrica</i>	192.70
<i>Carboeléctrica</i>	146.94

Fuente. PRODESEN 2016-2030, SENER.

Este periodo se ve envuelto en la era del ciclo combinado. Como se ha mencionado anteriormente, desde el fin de la década de los noventa la promoción del ciclo combinado empezó a ser cada vez más grande, por lo que no es sorpresa el que sea la tecnología con mayor energía eléctrica planeada a producir y que en la generación total de este periodo aporte el 63.87%. Las fuertes plataformas que mantienen al ciclo combinado lo hacen la tecnología ideal a usar como base en las futuras expansiones de generación y que en los límites de este periodo se tiene planeado incrementar su participación en 40.17%.

En segunda posición se tiene la tecnología hidroeléctrica, la cual en la mayoría de los años posteriores al periodo estudiado, precedía en participación a la principal tecnología generadora y que a partir del 2015 a los fines del 2029 se planea siga encabezando la producción eléctrica de las tecnologías limpias y que su participación aumente en 27.56% y que produzca el 12.78% de la energía eléctrica dispuesta a consumir.

Aunque a principios de la primera década después del nuevo milenio no era una fuente de energía relevante en México, la energía eólica comenzó como forma novedosa de generación eléctrica y a partir del 2012 empezó a tener presencia en la provisión eléctrica nacional, la cual hasta este año ha comprobado ser una fuente de energía digna de explotarse a mayor escala en varias regiones del país. En el periodo de estudio, es la tecnología que se planea tenga mayor crecimiento en participación, al ser aumentada en 86.7% y con ello se espera produzca el 9.02% de la energía eléctrica total en dicho periodo.

Los retos debidos a los diferentes accidentes que han marcado la historia de la generación eléctrica por medios nucleares y los diferentes rumores que la empresa petrolera a suplantado en la sociedad para hacerla ver como un riesgo prominente, le han contribuido a esta tecnología un concepto generalmente negativo, el cual va ligado a varias afecciones a la población, aunque estas han sido corroboradas falsas por varias investigaciones. En contraparte a la mala promoción que hoy en día ha empezado a disminuir, la tecnología nuclear, con todo el progreso que ha hecho en cuestiones de seguridad, ha demostrado ser competente para proporcionar en

buena medida el abasto energético necesario para disminuir el consumo de energéticos fósiles y, sobre todo, ser una de las tecnologías más limpias, ya que no presenta ningún tipo de emisión durante su operación y que hoy en día es capaz de reciclar sus residuos. En México, se empezó a explotar el uso de la nucleenergía al iniciar la operación de su única central nucleoelectrica en 1990, la cual integró en 1995 su segundo reactor al sistema eléctrico nacional y que a la fecha sigue produciendo energía al cumplir con los reglamentos y requerimientos exigidos por las diferentes comisiones internacionales. Por otra parte, México juega un papel importante en la investigación y progreso de sistemas nucleares; es por ello que en el periodo de estudio se ha provisto aumentar la participación de esta tecnología en 65.59% al adicionar nuevas unidades y con ello producirá el 3.88% de la electricidad total en este periodo.

En la quinta posición se encuentra la tecnología carboeléctrica, la cual, cabe mencionar, usa el combustible que mayor contaminación tiene asociado durante su conversión y que dada la rápida disminución de la participación de las centrales termoeléctricas se tiene planeado en los años del 2015 al 2018 aumentar la producción de éstas en apoyo a la entrada en operación de las nuevas centrales de ciclo combinado. En el 2029, se pretende disminuir su producción hasta hacerla despreciable en la generación total planeada para el año 2020. En el periodo en estudio, esta tecnología contribuirá con el 2.96% de la energía total planeada y tendrá un decremento del 96.98%.

Ciertamente México está virando a una generación eléctrica más interesada en preservar y proteger el medio ambiente. Ante los problemas que actualmente afectan al medio ambiente, de los cuales nuestra sociedad es testigo al vivir diariamente los efectos del cambio climático y el calentamiento global, la planeación energética en el periodo 2015-2029 es muestra de una de las acciones planeadas más importantes en la implicación de la minimización de estos fenómenos en el mediano plazo. Como parte de esta acción, la planeación energética ha reconocido y degradado el grupo de tecnologías con mayores emisiones, logrando año con año

ir disminuyendo y sustituyendo su participación al promover la explotación de fuentes con mucho menos impactos ambientales.

Esto se puede asegurar al evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero de las tecnologías estudiadas. Para ello, es necesario conocer la tasa de emisión de cada gas para cada tecnología. Para el presente trabajo sólo se consideraron las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O, pues éstos son los principales gases de efecto invernadero emitidos por las centrales eléctricas que queman combustibles fósiles, siendo las emisiones de estas centrales las que determinan el comportamiento de la evolución del impacto atmosférico asociado a la generación eléctrica¹⁰⁸, de modo que cuando se hace referencia al total de emisiones de GEI debe entenderse que únicamente se incluyen esos tres gases.

La Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) en el año 2005 se dio a la tarea de investigar las emisiones GEI de centrales eléctricas convencionales, detallando los resultados de este proyecto en el informe titulado “Emisiones Atmosféricas de las Centrales eléctricas en América del Norte”. En este reporte, fueron cuantificadas las emisiones por cada mega watt hora generado, contando no sólo las emisiones de GEI por planta para cada país, sino también las emisiones de otros contaminantes generados. Usando la información encontrada en este informe, fueron calculadas y mostradas en la Tabla 3 las tasas de emisiones de los diferentes GEI para los sistemas eléctricos en cuestión.

Tabla 5. Tasas de emisiones de GEI de las diferentes tecnologías de generación eléctrica

	CO₂ (kg CO₂eq./MWh)	CH₄ (kg CO₂eq./MWh)	N₂O (kg CO₂eq./MWh)
<i>Termoeléctrica Convencional</i>	735.67	0.94	5.49
<i>Carboeléctrica</i>	967.53	0.33	7.34
<i>Dual</i>	761.58	0.22	4.95
<i>Turbogas</i>	601.72	0.71	5.18
<i>Combustión Interna</i>	662.64	9.63	2.57
<i>Ciclo combinado</i>	515.23	0.36	3.21

Fuente. CCA, 2005.

¹⁰⁸ Comisión para la Cooperación Ambiental (2005). *Gases de efecto invernadero | Power Plant Emissions of North America*. [online] Disponible en: <http://www2.cec.org/site/PPE/es/emisiones-de-contaminantes/gases-de-efecto-invernadero-0> [Consultado 10 Jul. 2016].

Es importante mencionar que la suma de estos valores muestra una emisión de gases certeramente similares a los valores sustentados por el CRIEPI en su estudio de análisis de ciclo de vida para las tecnologías mencionadas.

En relación a lo que se ha dicho anteriormente con respecto a la afectación ambiental causada por el metano, es importante mencionar que las emisiones de este hidrocarburo proceden de la descomposición de la materia orgánica y estas emisiones provienen de varias fuentes naturales y antropogénicas. Las principales fuentes naturales son los humedales, las termitas, los océanos y los incendios forestales. Se estima que las fuentes naturales contribuyen con aproximadamente 37% del total de metano emitido a la atmósfera cada año, por consiguiente, las fuentes antropogénicas representan las principales fuentes de su emisión a la atmósfera.

Las fuentes antropogénicas con mayor contribución son la quema de combustibles fósiles, la fermentación entérica (o intestinal), los rellenos sanitarios, los sistemas de gas natural, la producción de combustibles fósiles, el cultivo de arroz y el manejo de residuos (CCA, 2005). En México, el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero para el 2014 afirma que los sectores que forman parte de la emisión de este gas son el de petróleo y gas, generación eléctrica, residencial y comercial, industria, fuentes móviles y agropecuario. En el Gráfico 20 se hace mención de sus emisiones, así como, de la comparación de los mismos.

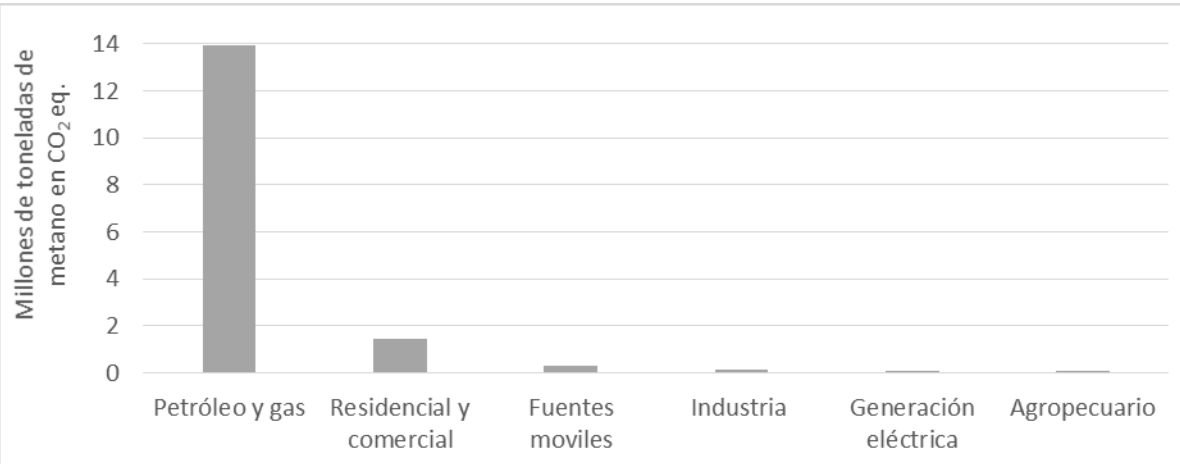


Gráfico 20. Tasa de emisiones de metano por sector.
Fuente. Elaboración propia con datos del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero y la CCA.

Comparando las emisiones de los diferentes sectores es observable que la emisión por la operación del sistema eléctrico mexicano ocupa el quinto lugar dentro de los sectores señalados y que su emisión es despreciable ante la emitida por la empresa de petróleo y gas. Dentro del sector eléctrico, la participación de las tecnologías de generación puede observarse de la siguiente forma.

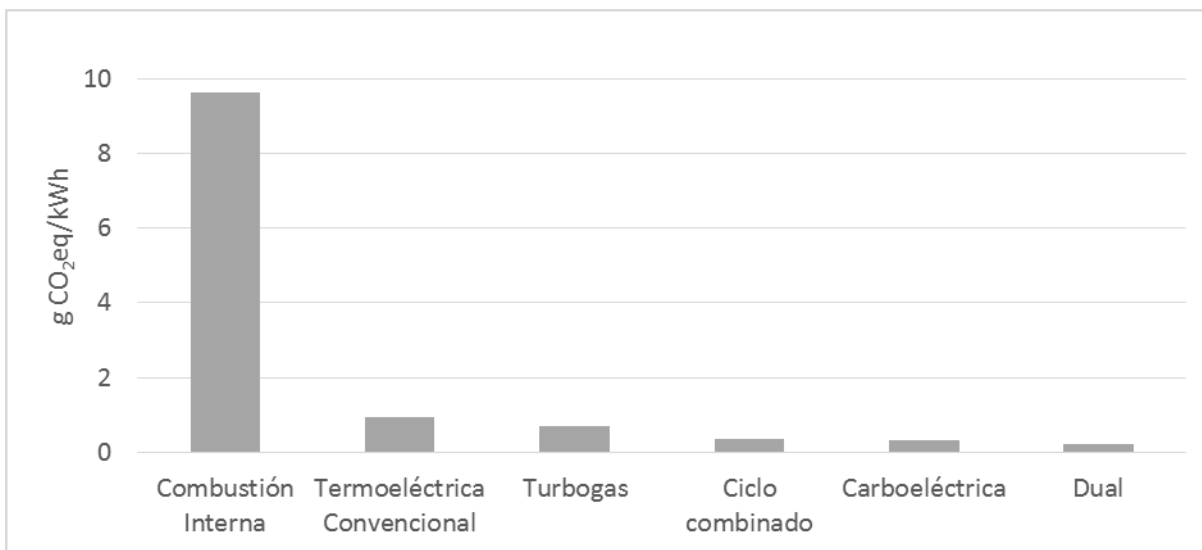


Gráfico 21. Tasa de emisión de metano por tipo de tecnología de generación eléctrica.
Fuente. Elaboración propia con datos de la SENER y la CCA.

El metano se produce en pequeñas cantidades en la quema de combustibles debido a la combustión incompleta de los hidrocarburos del mismo. Las emisiones de metano indican en general una ineficiencia en el proceso de combustión y la producción de este gas depende de la temperatura en el proceso de conversión energética en el que es sometido el combustible. La emisión de este gas también es resultado del mal estado en el que se encuentran los motores del proceso, produciendo una emisión de CH₄ particularmente alta¹⁰⁹.

Debido a que el diésel es el principal combustible en los generadores eléctricos de combustión interna y el funcionamiento de los mismos, esta tecnología es a la que se le adjudican las mayores emisiones de este GEI.

¹⁰⁹ Grupo consultivo de expertos (GCE) sobre las comunicaciones nacionales de las partes no incluidas en el Anexo I de la convención. *Manual del Sector de la Energía-Quema de Combustibles*, 2006.

Conociendo las emisiones de metano relacionadas a la operación de las diferentes tecnologías de generación, es posible proponer un historial y proyección de las emisiones de metano del sector eléctrico para el periodo 1990-2030.

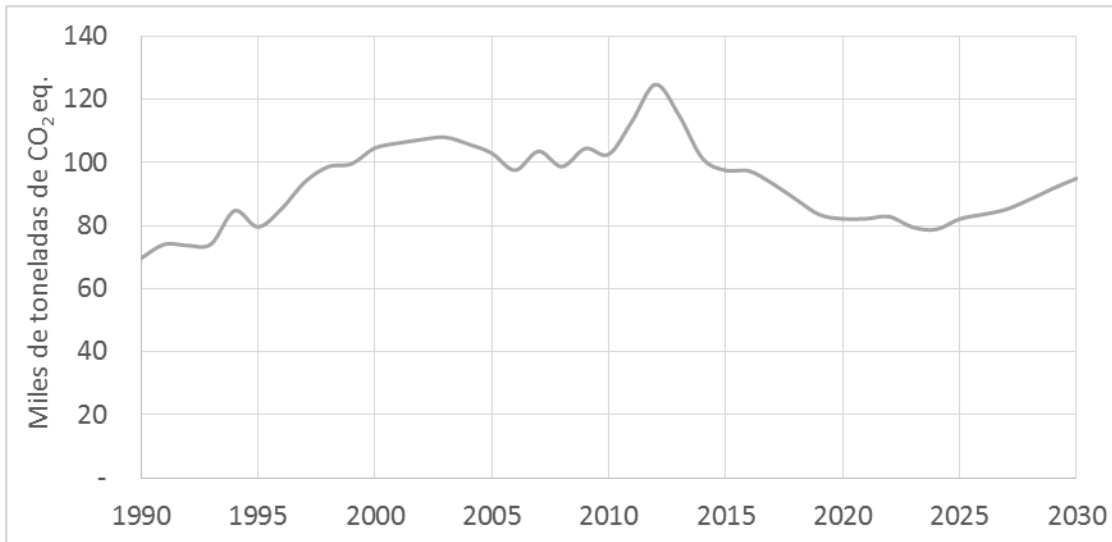


Gráfico 22. Historial y proyección de la emisión de metano del sector de generación eléctrica.

Fuente. Elaboración propia con información de la SENER, del CEFP y la CCA.

Para el año 2012 se registró la mayor emisión de este GEI. Dado que este fue uno de los principales años que sustentaron la transición de una generación más verde, el apoyo de generación por combustión interna fue por poco más usado, resultando en una alta emisión de este gas. Se espera que en total en el periodo de estudio las emisiones de este gas disminuyan 5.86%, siendo el año 2024 el que menores emisiones de metano se espera tenga.

El óxido nitroso es el único óxido de nitrógeno que actúa como gas de efecto invernadero. Al igual que el metano, es emitido por fuentes naturales y antropogénicas, pero a diferencia de éste, las fuentes naturales de este gas generan aproximadamente 64% de las emisiones totales a la atmósfera (CCA, 2005). El óxido nitroso es emitido por las bacterias del suelo como parte del ciclo del nitrógeno. La agricultura y el uso de fertilizantes con base de nitrógeno, junto con el tratamiento de los residuos animales, aumentan la producción de este gas. Algunas industrias, como la del nailon, y la quema de combustible, emplean el uso de motores de combustión interna, los cuales también liberan óxido nitroso a la atmósfera. Se ha determinado que, en general, las temperaturas de combustión

más bajas producen mayores emisiones de N₂O. Si bien se conocen con relativa exactitud los mecanismos químicos del N₂O, los datos experimentales disponibles son limitados (Cambio Climático Global, 2004).

En el siguiente gráfico (Gráfico 23) se muestra la contribución de los diferentes sectores en la emisión total de óxido nítrico en México.

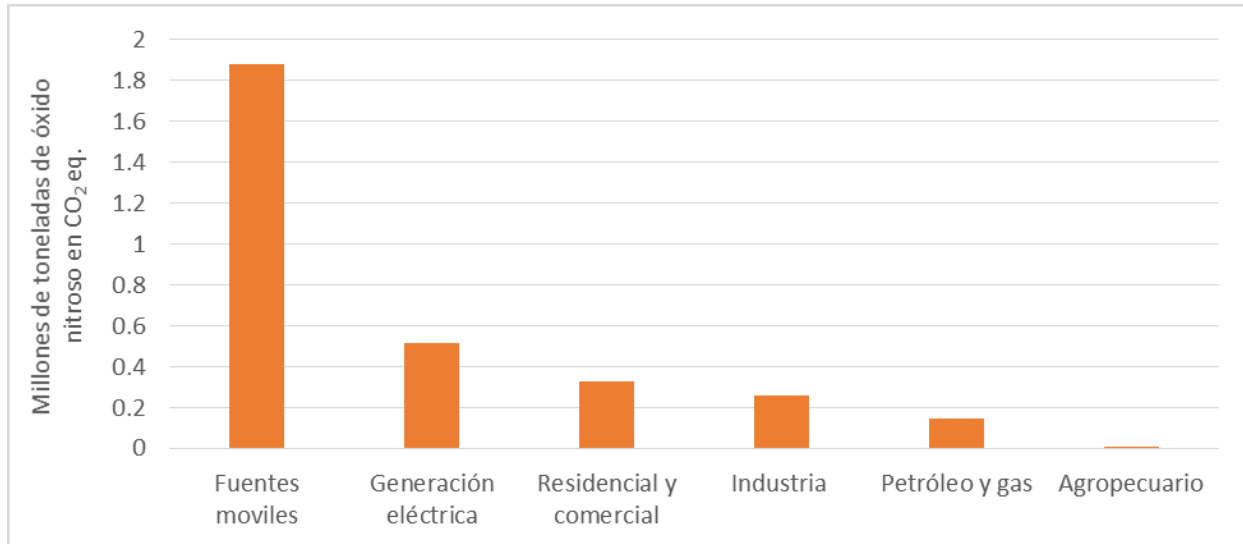


Gráfico 23. Tasa de emisiones de óxido nítrico por sector.

Fuente. Elaboración propia con datos del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero y la CCA.

Comparando las emisiones de metano, las emisiones de óxido nítrico sólo representan una quinta parte, siendo el GEI de menor emisión dentro del grupo de estos gases. El sector de generación eléctrica ocupa el segundo puesto en las emisiones totales de este tipo de NO_x, siendo cuatro veces menor en comparación al sector de fuentes móviles. La comparación de emisiones de tecnologías que componen el sector eléctricas se muestran a continuación.

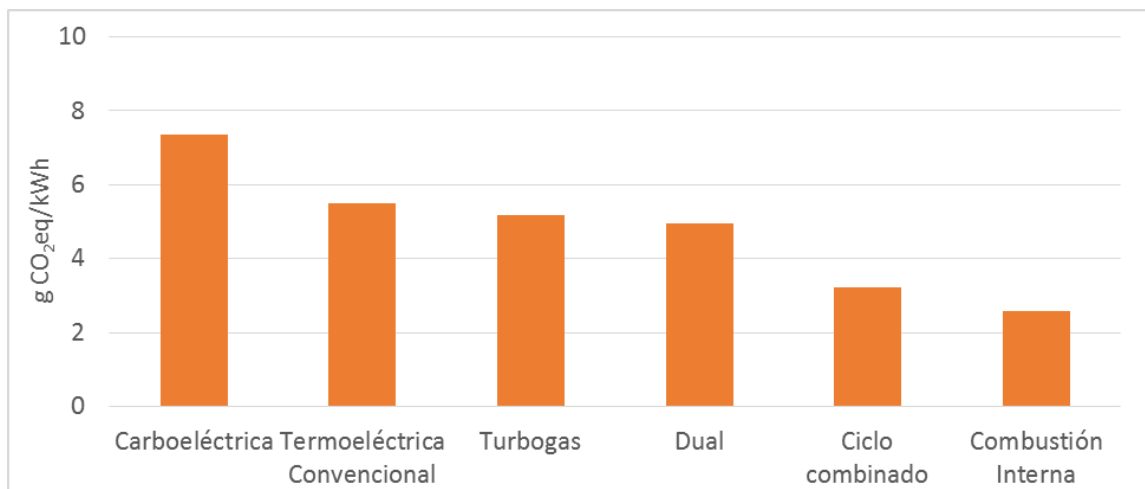


Gráfico 24. Tasa de emisión de óxido nítrico por tipo de tecnología de generación eléctrica.

Fuente. Elaboración propia con datos de la SENER y la CCA.

A diferencia de las emisiones de metano, todas las tecnologías estudiadas muestran una tasa de emisión de óxido nítrico similar, siendo las centrales de tipo carboeléctrico las que más sobresalen.

Como se ha dicho anteriormente, las centrales térmicas de carbón constituyeron una de las principales fuentes nacionales de energía eléctrica y se planea que para el 2020 éstas salgan completamente de operación. Dentro del proceso de combustión del carbón, la formación de grandes cantidades de óxido nítrico se debe a la liberación del nitrógeno contenido en este combustible y el cual reacciona con el oxígeno del aire, formando óxidos de nitrógeno y entre ellos el nítrico.

Conociendo la información sobre las emisiones de este gas y la generación de las diferentes tecnologías eléctricas, al igual que con las emisiones de metano, proponer un comportamiento de emisiones a lo largo de los años es posible y es mostrado, a continuación, en el Gráfico 25.

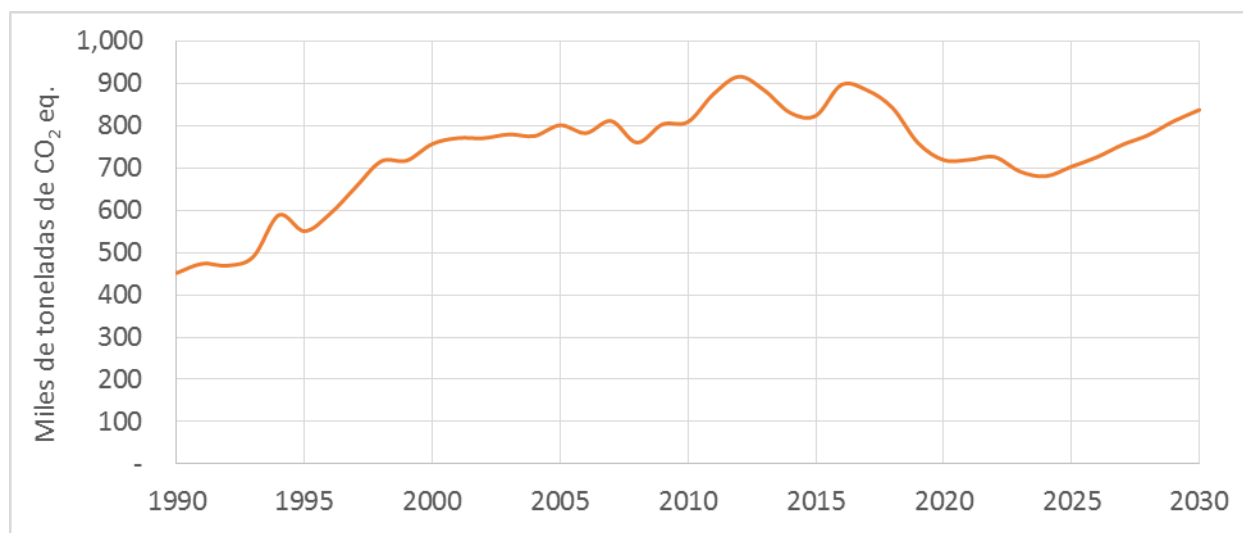


Gráfico 25. Historial y proyección de la emisión de óxido nítrico del sector de generación eléctrica.
Fuente. Elaboración propia con información de la SENER, del CEFY y la CCA.

Dada la alta dependencia a la tecnología termoeléctrica, las emisiones de este gas a partir de la década de los noventa fueron aumentado rápidamente. En los años posteriores al nuevo milenio y gracias a la operación de las centrales de ciclo combinado, la rapidez de estas emisiones disminuyó. Al igual que el metano, el registro de las emisiones de óxido nítrico por la operación de centrales eléctricas muestra su máximo punto en el año 2012. Como se puede ver en el Gráfico 25, la

emisión de este gas conservaba la misma tendencia del 2000 al 2010 y fue en el año posterior cuando debido a un pequeño aumento en la operación de las centrales turbogas y dual, contribuyó en el registro más alto de este gas, sin mencionar que para este año el mix energético también favoreció la producción de centrales termoeléctricas y cabroeléctricas. Algo similar se espera en el 2016 y esto se debe a la mayor operación de centrales carboeléctricas y turbogas dada la baja de producción de la tecnología termoeléctrica. Rumbo al año 2030 se puede observar que estas emisiones vuelven a crecer. A partir del año 2027 el PRODESEN señala una mínima participación de centrales carboeléctricas. Dentro del periodo de estudio se espera disminuir la emisión de este gas en un 1.54%, siendo el año 2024 el que se espera tenga el menor inventario de este gas.

Dentro del grupo de gases de efecto invernadero, las emisiones de CO₂ son las más comunes y la liberación del mismo es común en la mayoría de los procesos de producción de bienes que el ser humano ha desarrollado. Las fuentes naturales que liberan CO₂ incluyen fenómenos tectónicos, vulcanismo, a través de la respiración de los animales, procesos de suelos, combustión de compuestos con carbono y la evaporación oceánica. Las principales emisiones antropogénicas proceden de la quema de combustibles fósiles (la generación de energía eléctrica aporta entre 17 y 40 por ciento de las emisiones totales de CO₂) y de la deforestación. Después de la revolución industrial, se atribuye la mayor parte de la concentración de CO₂ a estas fuentes procedentes de la acción humana (CCA, 2005). A continuación (Gráfico 26) se muestran los sectores con mayores emisiones.

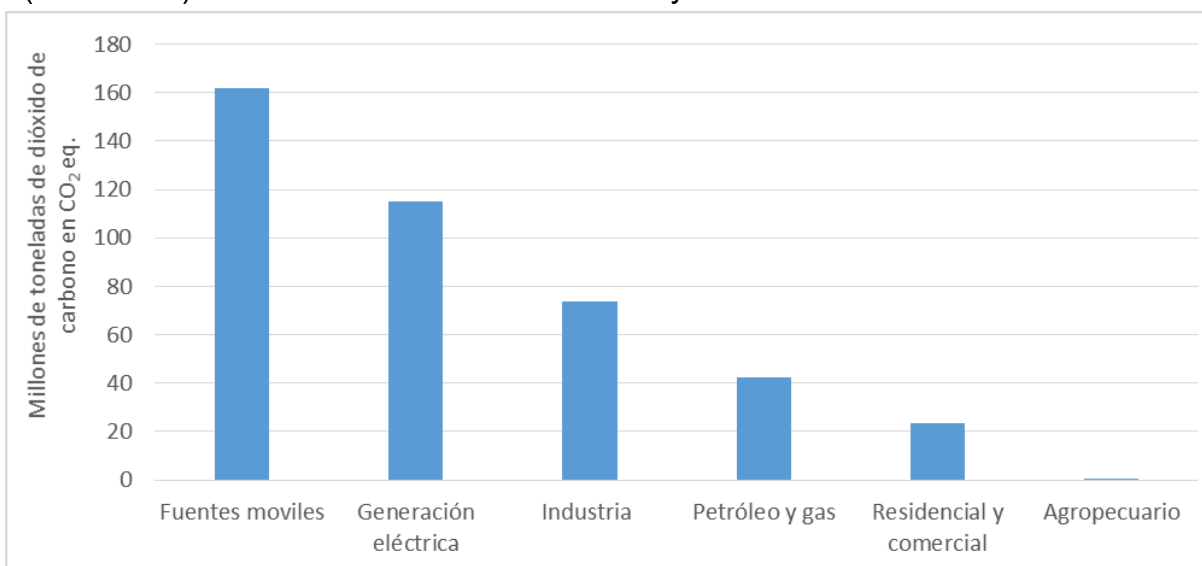


Gráfico 26. Tasa de emisiones de dióxido de carbono por sector.

Fuente. Elaboración propia con datos del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero y la CCA.

Las emisiones de dióxido de carbono proceden de la oxidación del carbono de los combustibles durante la combustión. En condiciones de combustión ideales, el contenido total de carbono de los combustibles debería producir CO₂. Sin embargo, los procesos de combustión reales están lejos de la idealidad y la consecuencia de ello es que se producen pequeñas cantidades de carbono parcialmente oxidado y no oxidado.

La mayor parte del carbono emitido por procesos que utilizan combustibles fósiles es liberada de forma inmediata como CO₂, y la pequeña fracción del carbono parcialmente oxidado se emite en forma de gases distintos del CO₂ tales como el metano, el monóxido de carbono y los compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano. Sin embargo, se tiene la teoría de que el carbono en estos gases finalmente se oxida en la atmósfera y forma CO₂ (GCE, 2006). Conociendo esto, la emisión de estos gases se puede incorporar al cálculo total de emisiones de CO₂ al valorar el contenido de carbono incluido en ellos usando el factor de “potencial de calentamiento global”. El resto del carbono que permanece sin quemar (no oxidado) forma hollín y ceniza, es decir, no se emite en forma gaseosa.

La tasa de emisión de las tecnologías que conforman el sector de generación eléctrica es mostrada a continuación en el Gráfico 27, en el cual también fueron incluidas las emisiones de metano y óxido nitroso con la finalidad de mostrar la predominación entre emisiones.

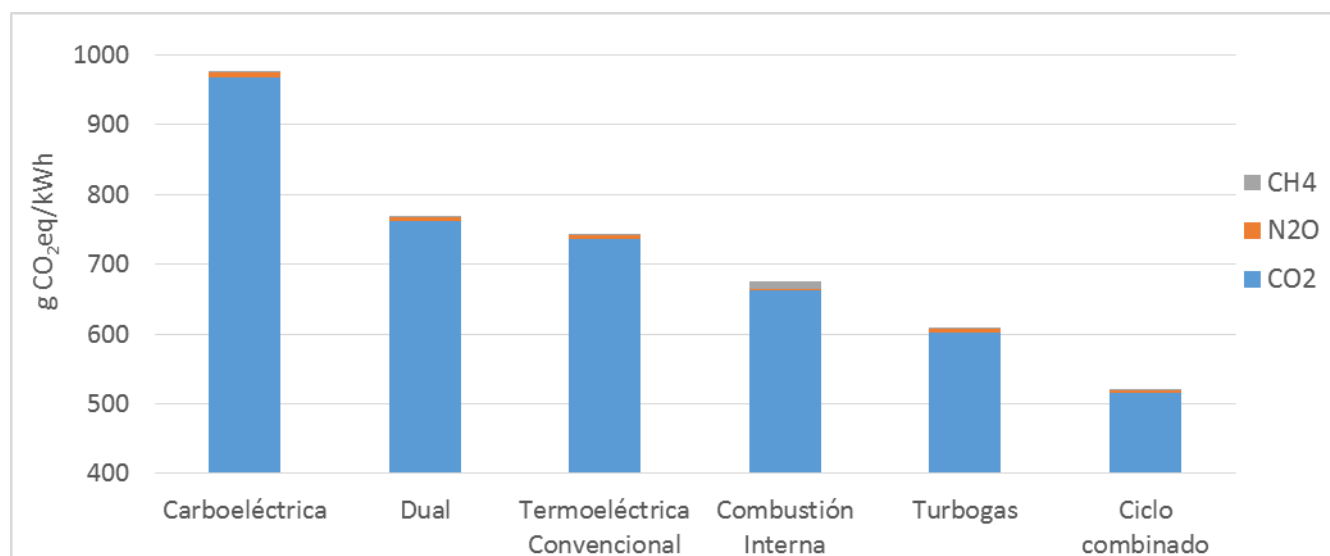


Gráfico 27. Comparación de las tasa de emisión de los diferentes GEI emitidos por tipo de tecnología de generación eléctrica.

Fuente. Elaboración propia con datos de la SENER y la CCA.

Comprobando lo dicho anteriormente, las emisiones de las diferentes tecnologías de generación indican que más del 99% de las mismas están constituidas por CO₂. También, es comprobado que la operación de la tecnología carboeléctrica es a la que más emisiones se le atribuyen, seguida por la tecnología dual y, en tercera posición, la tecnología termoeléctrica. Con esta información también podemos prever qué combustibles y procesos son los que tienen mayor tasa de emisiones. En el Gráfico 28, mostrado a continuación, es observable la emisión de este gas a través de la operación de este sector.

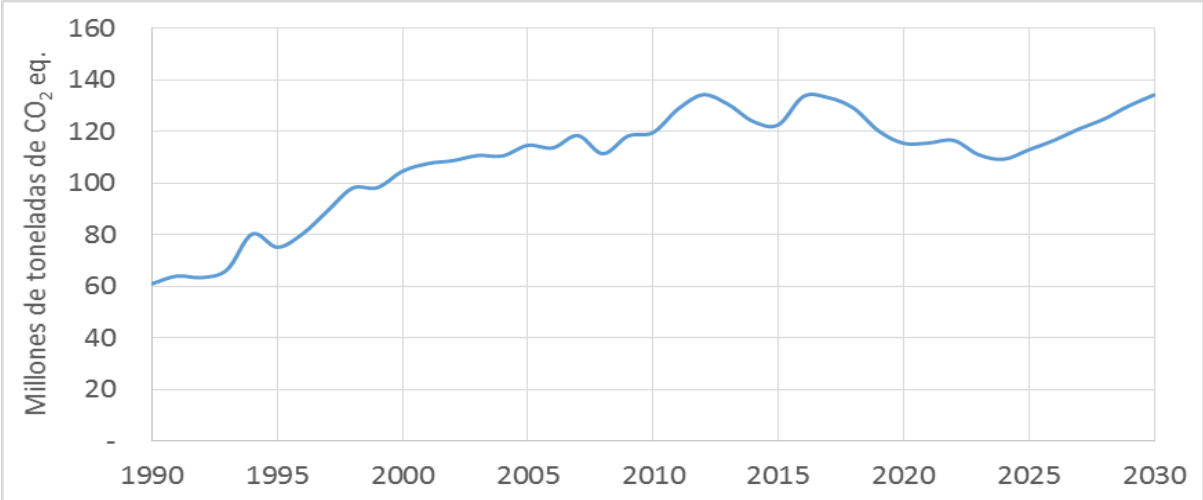


Gráfico 28. Historial y proyección de la emisión de dióxido de carbono del sector de generación eléctrica.

Fuente. Elaboración propia con información de la SENER, del CEFP y la CCA.

Se puede observar que, a diferencia de los otros gases, la emisión del CO₂ mantiene una tendencia a seguir creciendo por largos periodos. Ejemplo de esto es el periodo 1993-2005, donde las emisiones de este GEI crecieron 42%. El responsable de este crecimiento fue el incremento en la generación y participación de centrales termoeléctricas y carboeléctricas. Concordando con ello, en el periodo 2005-2016 la tasa de emisión del dióxido de carbono disminuyó a 14.18%, siendo posible gracias a la preferencia del uso de la tecnología de ciclo combinado. Se espera que, a partir del 2016, por primera vez en el historial de impacto atmosférico mexicano se logre una emisión de CO₂ con pendiente negativa, en comparación a lo emitido en este año, al darle mayor participación a las tecnologías limpias y solamente usar energéticos fósiles en centrales de ciclo combinado. Se tiene previsto que esta tendencia perdure hasta el año 2024, donde la planeación energética marca una

súbita alza de este tipo de emisión. A continuación (Gráfico 29) se muestra la comparación de las distintas emisiones.

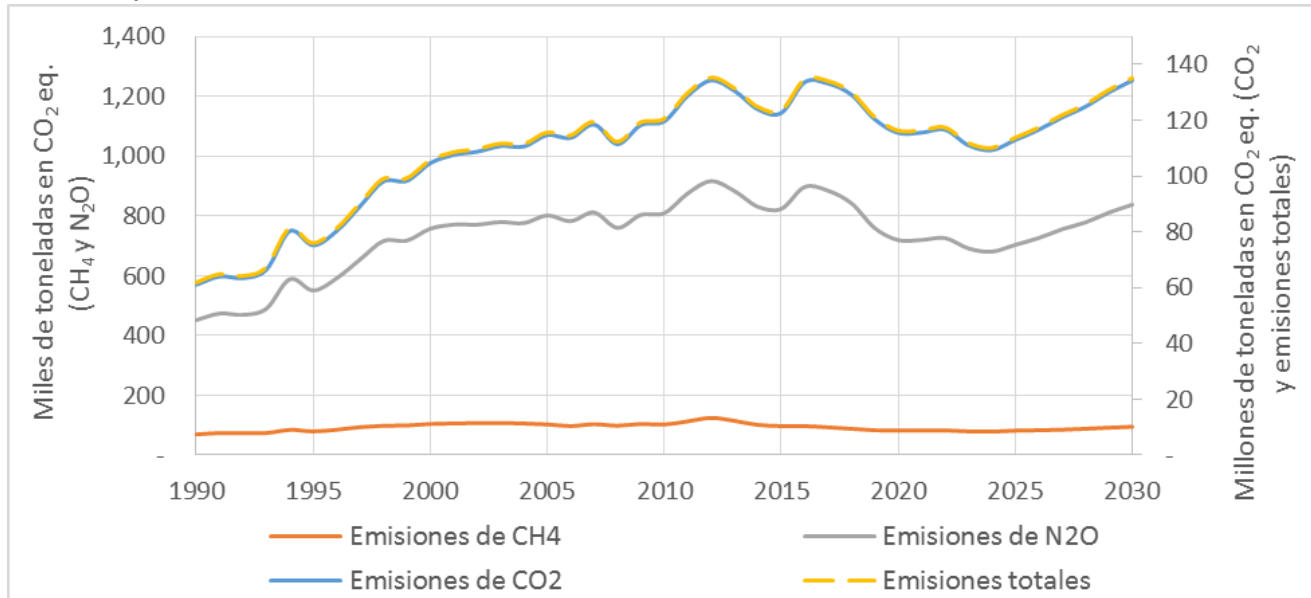


Gráfico 29. Comparación del historial y proyección de las emisiones de gases estudiados pertenecientes al sector de generación eléctrica.

Fuente. Elaboración propia con información de la SENER, del CEFP y la CCA.

En este gráfico podemos constatar, inicialmente, la predominación del CO₂ dentro de la emisión de los gases estudiados. También es visualizable la similitud del comportamiento de la emisión de dióxido de carbono con la de metano, pero, a diferencia del metano, el año 2030 muestra un gran acercamiento al máximo registrado en el 2012, siendo el año 2024 el que se espera tenga menores emisiones dentro del periodo en cuestión. Por otra parte, es notorio que las emisiones de N₂O no guardan ninguna relación con las de CH₄ y CO₂.

En el Gráfico 30 es señalada la aportación de las emisiones de GEI por la operación de la industria eléctrica en las emisiones totales de estos gases en México, al mencionar también en qué medida son parte de las mismas.

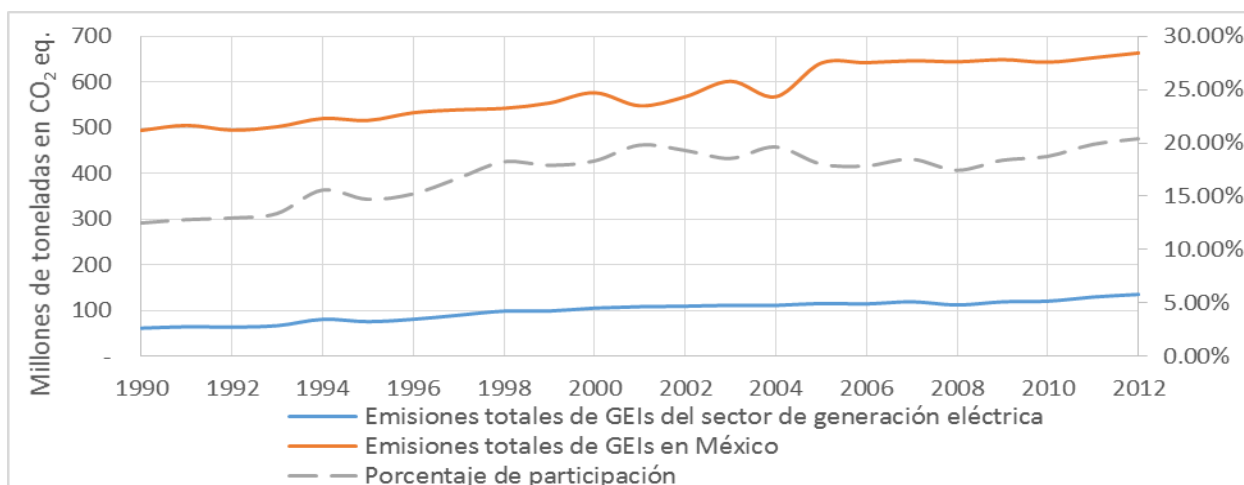


Gráfico 30. Participación en el total de emisiones de GEI del sector de generación eléctrica en México.
Fuente. Elaboración propia con información de la SENER, del CEFP, Hondo H. y El Banco Mundial.

En este contexto, es observable cómo a partir del 2005 las emisiones pertenecientes a este sector empezaron a tener mayor participación en consideración a los demás, llegando a su punto crítico en el 2012 al contribuir con más del 20% en las emisiones totales. Según lo reportado en el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero para el 2014, este sector fue el responsable de más del 26% de estas emisiones, ocupando el segundo lugar detrás del sector de Fuentes Móviles.

Una vez conocidas las tasas de emisión de cada tecnología y el historial-proyección de participación de generación eléctrica de cada una, es posible calcular las emisiones de cada una y plasmarlas gráficamente como resultado de este ejercicio. Para ello es mostrado a continuación el Gráfico 31, en el cual se especifican las emisiones totales anuales de la operación del sector de generación eléctrica, así como, la participación de cada una de las tecnologías.

En un principio se puede observar que, aunque se han implementado y planeado grandes esfuerzos para disminuir la implicación ambiental de este sector, las emisiones de estos gases muestran un alza mayor a la que se ha registrado en años anteriores, esto debido al objetivo de aumentar en gran medida la producción eléctrica mexicana. Es también importante señalar que, para cada año, alrededor del 99% de las emisiones son resultantes del proceso llevado a cabo en centrales convencionales. Por otra parte, es visible la evolución y extinción de las emisiones

de ciertas tecnologías, tales como la dual, carboeléctrica y termoeléctrica convencional; también el crecimiento de las emisiones provenientes de las centrales de ciclo combinado, así como la estabilidad de las emisiones de las tecnologías limpias.

Dentro del periodo 2015-2029, el 98.4% de las emisiones totales de GEI se verá relacionado a la operación de las tecnologías convencionales y el 1.6% a la de las limpias. Dentro del grupo de las tecnologías convencionales, el ciclo combinado será el responsable de contribuir con 84.56% del total de estas emisiones, seguido por la tecnología carboeléctrica, a la que se le atribuirá el 7.37% de las mismas y, en tercer lugar, por las centrales del tipo lecho fluidizado, responsables de contribuir con el 2.87%. Dentro del grupo de tecnologías limpias, la que mayor impacto atmosférico implicará su operación es la hidroeléctrica, la cual contribuirá con el 0.69% de las emisiones totales. De las tres tecnologías con mayores emisiones en el periodo de estudio se espera que las provenientes de las centrales de ciclo combinado crezcan 40.17% y que aproximadamente el 98% de las emisiones totales para el 2029 provengan del proceso de este tipo de centrales, el ejercicio de planeación propone disminuir las emisiones relacionadas al uso de la tecnología carboeléctrica por arriba del 3000%. Estas emisiones serán resultantes del apoyo que este tipo de centrales cederá para encaminar el empoderamiento de las centrales de ciclo combinado. De hecho, los resultados de estos cálculos muestran que, después del 2018, las emisiones relacionadas a estas plantas se minimizarán de una forma nunca antes vista y llegarán a ser menores a las relacionadas a las centrales hidroeléctricas. Por último, las emisiones ligadas a la operación del lecho fluidizado se proyecta que tengan un decremento del 0.29%, lo cual es mínimo, y se espera que continúen con este comportamiento debido a la estabilidad de su generación.

Continuando con este análisis, se muestra el Gráfico 32, en el cual se desarrolla el historial y proyección de las emisiones de GEI por unidad de generación anual. Como es notorio, los resultados de este análisis tienen una estrecha relación con el aumento de la generación por tecnologías limpias, así como de procesos

dependientes de combustibles fósiles de menores emisiones. Aunque a medida que ha crecido la población, y con ella el consumo eléctrico, este gráfico comprueba un comportamiento contrario, demostrando que los esfuerzos para disminuir las emisiones de este sector han surtido efecto, siendo los años con mayores tasas de emisión los pertenecientes a la década de los noventa, también detalla en qué años la generación de este recurso conllevó un gran impacto ambiental. Ejemplo de ello es el año 1994, el cual fue el que mayor implicación de emisiones atmosféricas tuvo en relación a la generación eléctrica y al que se le atribuye el menor uso de fuentes limpias de energía dentro de su cartera de explotación y el que también tuvo mayor uso del proceso termoeléctrico para satisfacer la demanda eléctrica. En contraposición se tiene el año 2030, en el cual se planea aumentar la participación de tecnologías limpias al 38% de la generación total y el resto dejarlo en manos del ciclo combinado. Aunque en este año se pretenda producir más del 67% de lo producido en 1994, el resultado del cálculo de las emisiones de ciclo vida ha demostrado que el 2030 será el año con menores emisiones relacionadas con la capacidad instalada provenientes de este sector. Dentro del periodo 2015-2029, se puede observar que este comportamiento prevalece, siendo el 2017 el año de transición donde se darán pasos grandes en la reducción de estas emisiones.

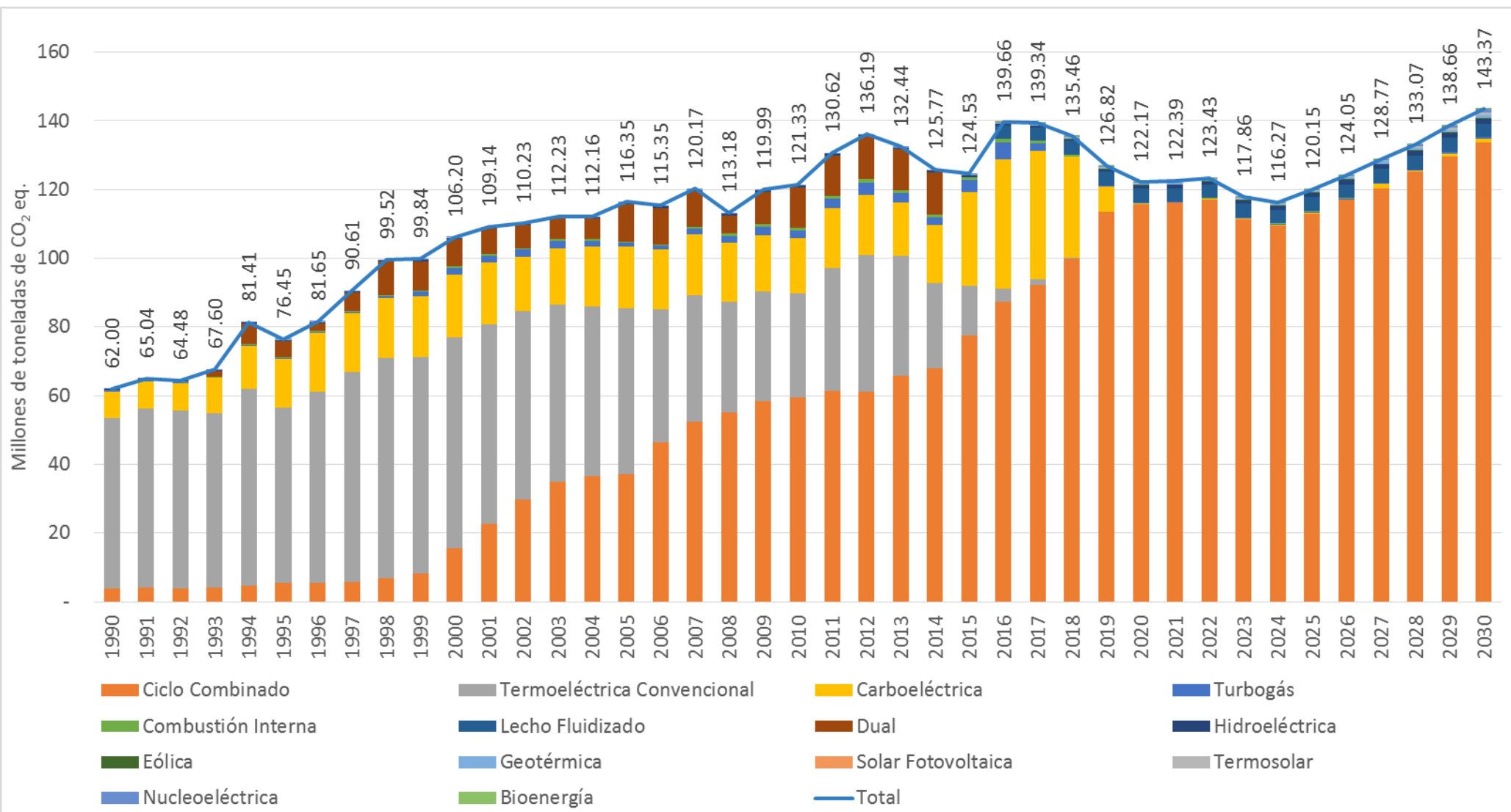


Gráfico 31. Evolución de emisiones de GEI por tipo de tecnología. **Fuente.** Elaboración propia con información de la SENER, del CEFP y Hondo, H.

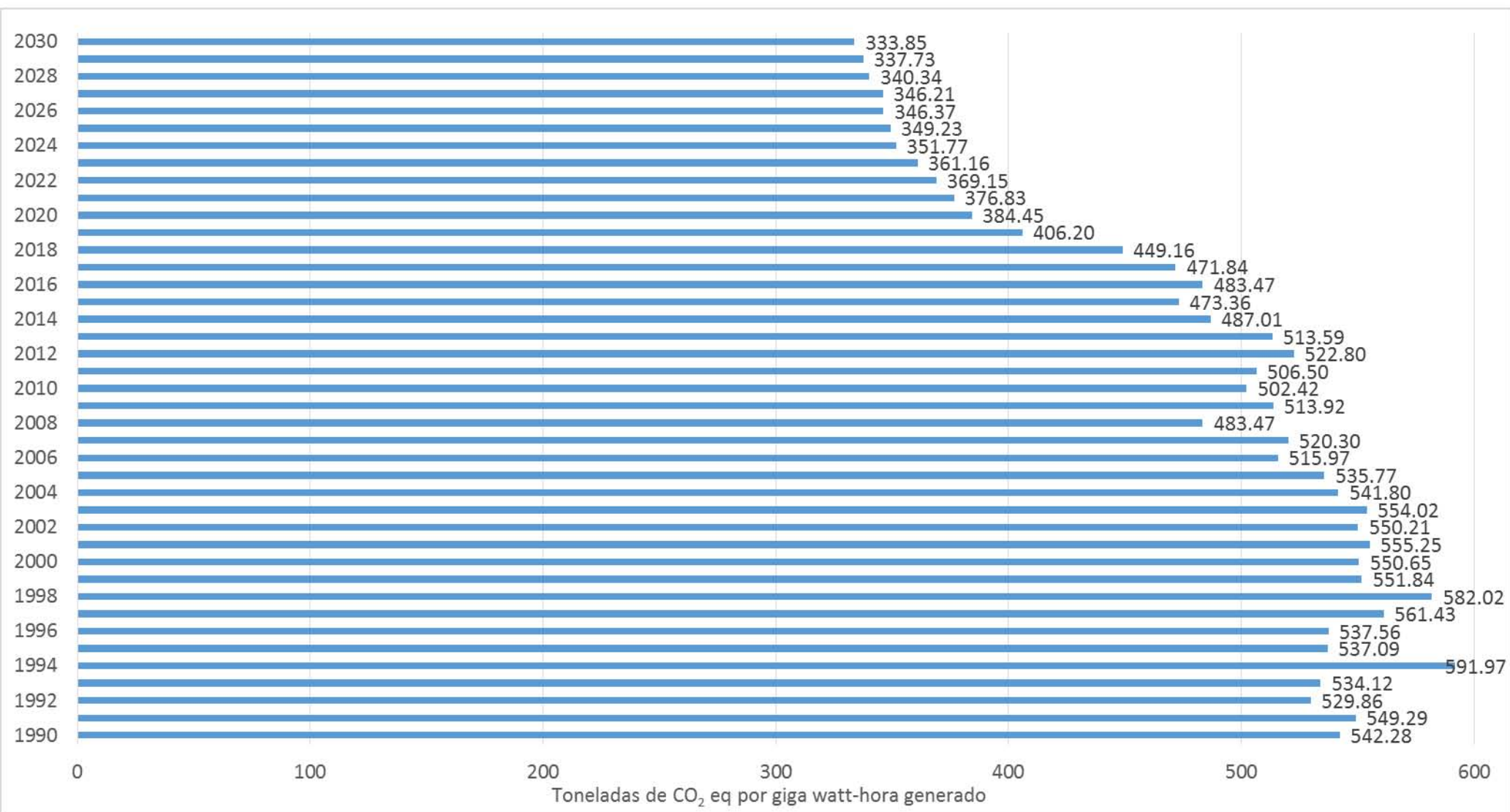


Gráfico 32. Relación de emisiones de GEI por unidad de energía generada anualmente. **Fuente.** Elaboración propia con información de la SENER, del CEFP y Hondo, H.

Una vez conocidos y tratados todos los datos relacionados a la afectación ambiental, particularmente a los referidos a la atmosfera, que implican la generación eléctrica en nuestro país, han dado la suficiente información para verificar si las medidas que se han tomado en este sector cumplirán con la meta aspiracional propuesta en la Ley General de Cambio Climático. Para ello es necesario discutir sobre tres años importantes en los panoramas de generación eléctrica y emisiones respectivas de GEI de este sector.

En el año 2000, comúnmente referido como línea base, se generaron 192.86 billones de watts-hora, los cuales fueron responsables de la emisión de 106.2 millones de toneladas de CO₂ eq. A continuación, se despliega la información relacionada a este año.

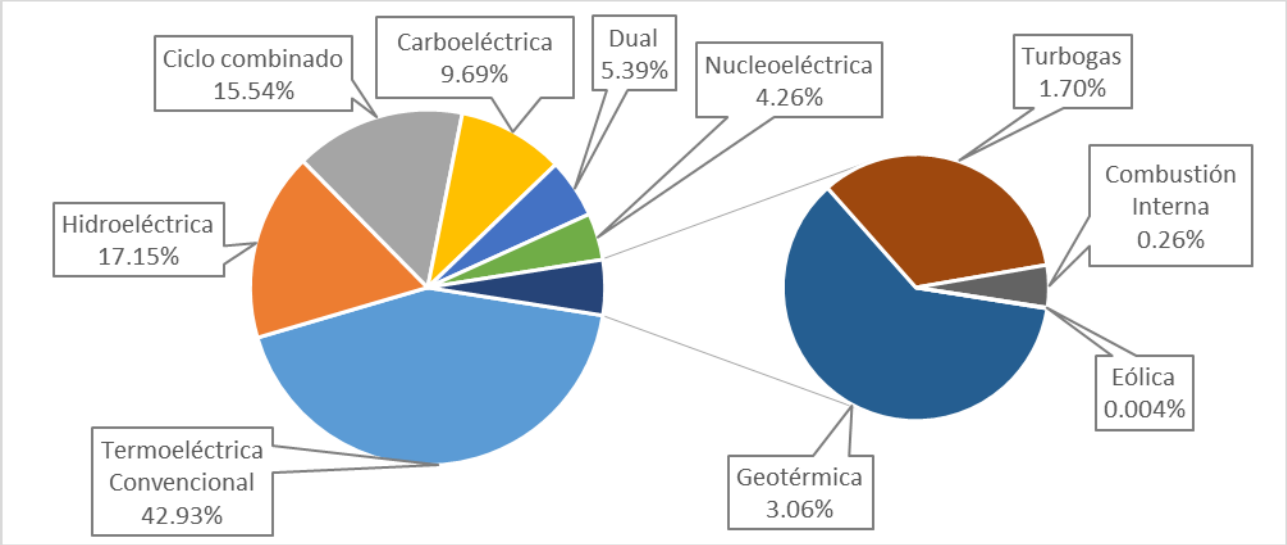


Gráfico 33. Mix de generación eléctrica, 2000. Fuente. CEFP.

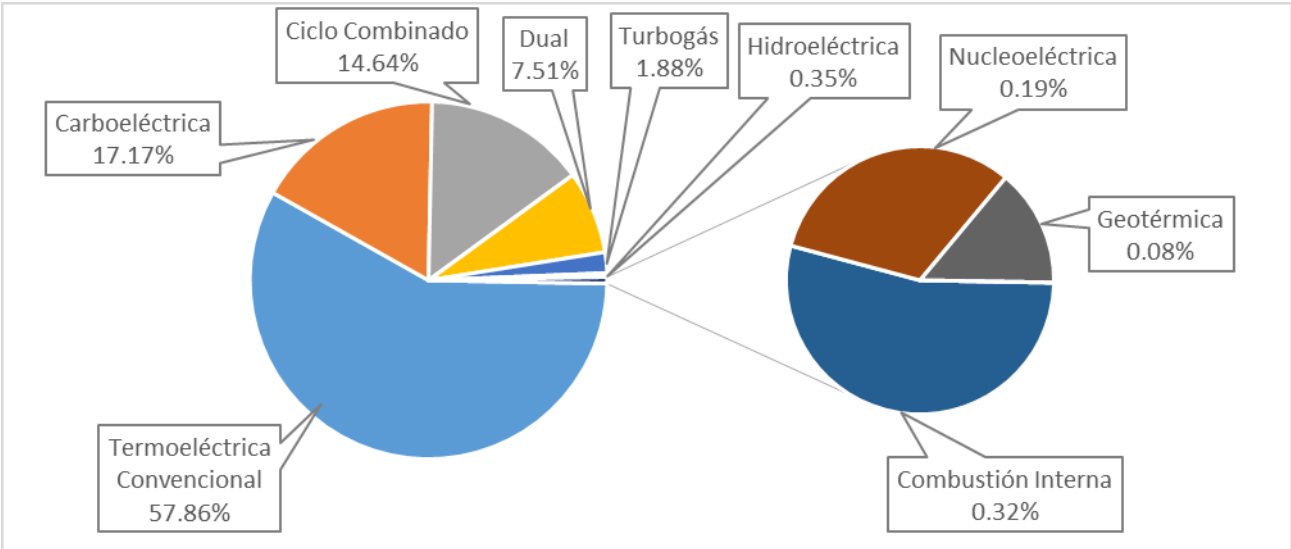


Gráfico 34. Participación por tecnología en la emisión de GEI, 2000. Fuente. Elaboración propia con información del CEFP y Hondo, H.

Como se puede observar en los Gráficos 18a y 31, aunque este año tuvo una buena participación de tecnologías limpias (24.5%), es también uno de los que mayores emisiones tuvo por generación de unidades de potencia-tiempo. Esto se debió principalmente al uso excesivo de centrales termoeléctricas y duales.

Siguiendo la planeación eléctrica propuesta en el PRODESEN 2016-2030 y estudiando el primer año de la meta anteriormente mencionada, para el 2020 la SENER se ha comprometido a generar 317.33 billones de watts-hora, 124.47 TWh más de lo que se generó en el 2000, lo cual es cercano al doble de lo generado para ese año. Si esto llega a cumplirse, se emitirían cerca de 122.17 millones de toneladas de CO₂ eq, aproximadamente 15.8 millones más de lo correspondiente en la línea base.

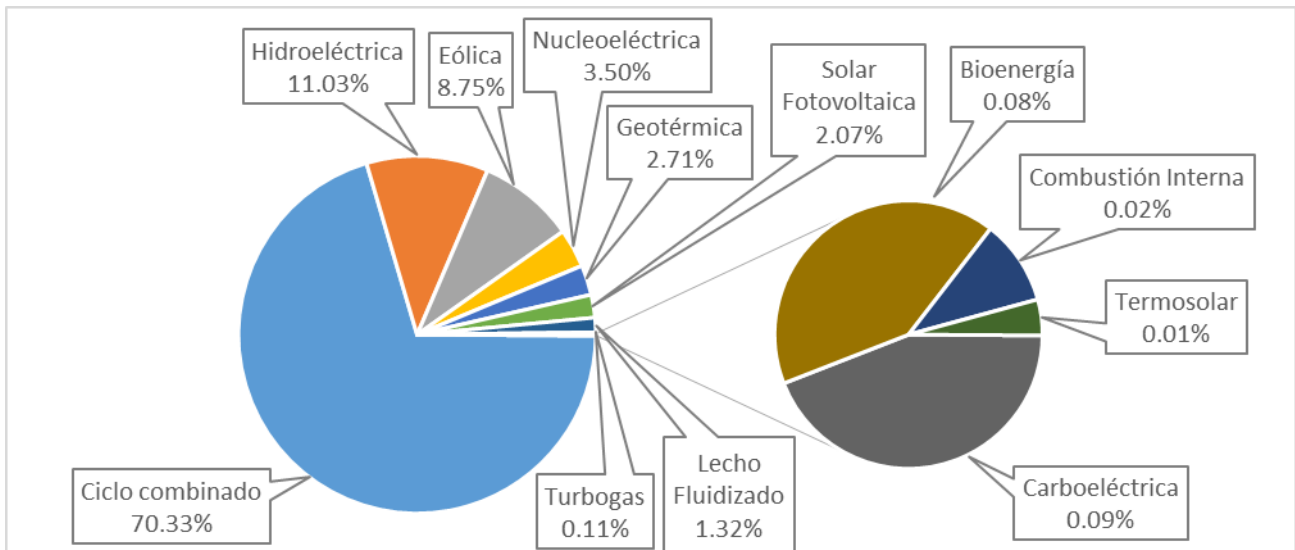


Gráfico 35. Mix de generación eléctrica, 2020. Fuente. SENER.

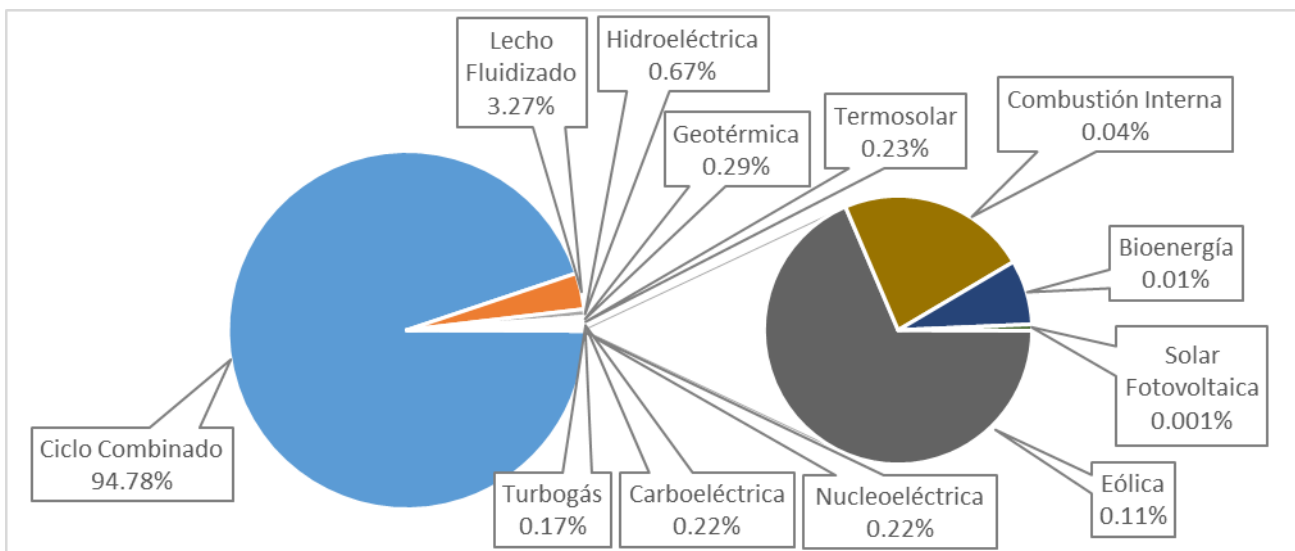


Gráfico 36. Participación por tecnología en la emisión de GEI, 2020. Fuente. Elaboración propia con información de la SENER y Hondo, H.

A diferencia del 2000, en el 2020 se planea generar electricidad principalmente al hacer uso de centrales de ciclo combinado. Como se ha discutido anteriormente, después del nuevo milenio esta tecnología empezó a ganar mayor reconocimiento y a partir del 2006 se posicionó como la principal tecnología de generación, después de ese año esta tecnología se consolidó en esta posición al seguir aumentando su participación. Otra de las grandes diferencias entre estos puntos, es el gran descenso del uso de fuentes de energía como el carbón y los derivados del petróleo, al grado de que en este año se planea eliminar la aportación eléctrica de centrales termoeléctricas y reducir a gran escala la producción de las carboeléctricas. Para ello también fue planeado aumentar en 3.6 puntos porcentuales el uso de fuentes energéticas limpias a diferencia de lo usado en el 2000, lo cual puede ser comprobado al comparar los gráficos mostrados anteriormente, donde no solamente se comprueba el aumento de las mismas, sino, la adición de nuevas formas de generación. Por último, es importante mencionar que, aunque las emisiones aumentaron debido al incremento de generación, este año disminuyó considerablemente el impacto atmosférico asociado al mismo.

El tercer y último año a analizar es el año 2030, el cual es el último año que cubre la planeación eléctrica actual mexicana y es, hasta ahora, el más cercano al segundo año mencionado en dicha meta. Siguiendo lo reportado por la SENER, para este año se tiene la expectativa de producir aproximadamente 425.4 billones de watts-hora, 54.7% más de lo que se generó en el 2000 y 25.4% de lo que se planea generar en el 2020. Con esta producción también se conllevará a un alza en las emisiones. Usando los factores de ciclo vida se puede predecir el total de emisiones del sector eléctrico para este año, las cuales se prevén sean cercanas a 143.37 millones de toneladas de CO₂ eq., siendo el año que, dentro del alcance de este trabajo, que en su transcurso se emitirán las mayores cantidades de GEI, al superar las pertenecientes a la línea base por 25.2% y las del 2020 por 14.1%. A continuación se detallan los datos pertenecientes a este año.

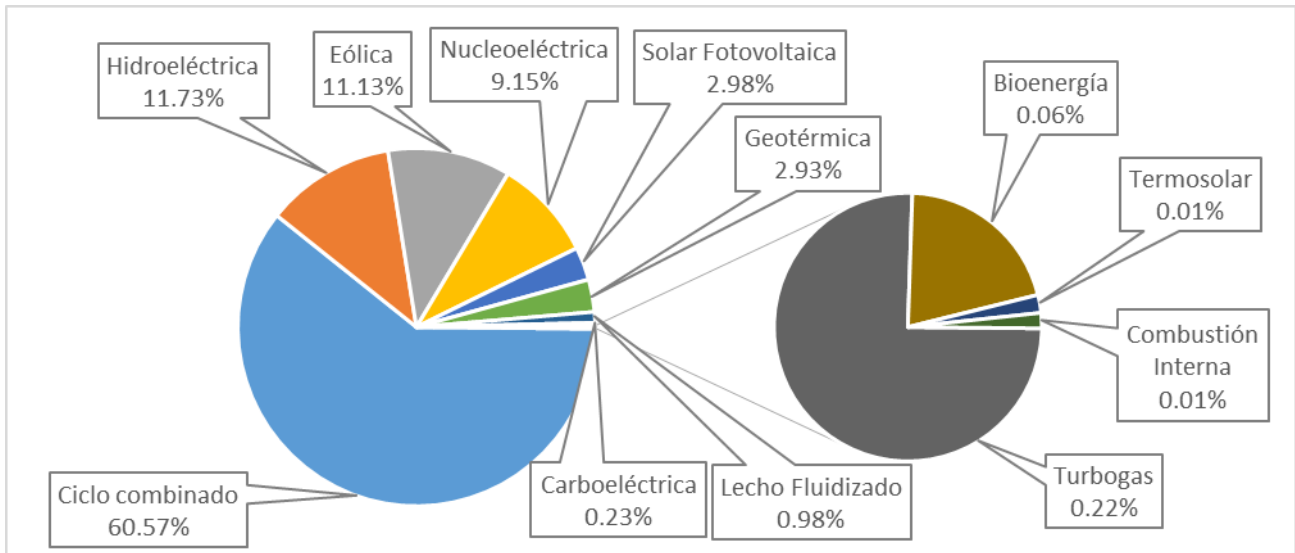


Gráfico 37. Mix de generación eléctrica, 2030. **Fuente.** SENER.

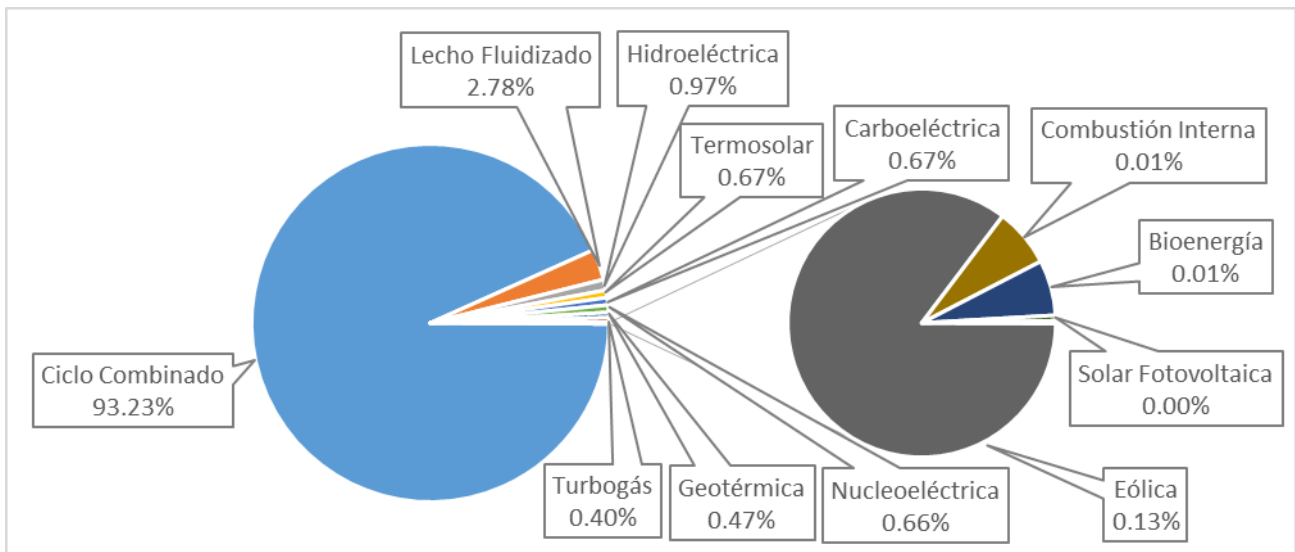


Gráfico 38. Participación por tecnología en la emisión de GEI, 2030. **Fuente.** Elaboración propia con información de la SENER y Hondo, H.

Como es observable en estos gráficos, en comparación al 2020, en el 2030 se tiene planeado disminuir ligeramente la generación de las centrales de ciclo combinado y esto se debe principalmente a la apertura de la participación de tecnologías de conversión energética por fuentes limpias, siendo la tecnología nucleoelectrica la que se planea tenga mayor crecimiento y que junto la hidroeléctrica y eólica sean las principales proveedoras de energía eléctrica por medios limpios para ese entonces.

A diferencia de los años anteriormente estudiados, el año 2030 presentará la utilización más alta de tecnologías limpias al pretender cubrir el 38% de la generación total a través del uso de centrales pertenecientes a este grupo; por ello, y como es mostrado en el Gráfico 32, es el año que alcanzará el menor fomento de emisiones relacionadas a la generación eléctrica. Entonces, la única razón por la cual se espera tenga las mayores emisiones en la historia de la generación eléctrica es por la proyección tan alta que tiene, de la cual, es más del doble de la que se tuvo en la línea base.

Uno de los años que se dio a notar a lo largo del análisis de este trabajo y que pertenece a la década de los años dos mil veinte es el 2024. Como se ha comentado anteriormente, este año presenta las menores emisiones dentro del periodo 2008-2030. Con respecto a la línea base, este año emitirá 8.6% más de lo reportado y en contraste con el 2030 emitirá lo mismo que el 81.8% de lo pertinente para ese año. Aún más interesante, este año se planea tener una participación de tecnologías limpias de 34.6% y producirá 41.6% más de lo generado en el año 2000, lo mismo que el 77.7% de lo que se proyecta generar en el 2030. La razón de que en comparación a los otros años correspondientes a esta década, éste logró esa gran disminución de emisiones es, inicialmente, reducir la participación de centrales carboeléctricas en un 34% y un 5% las de ciclo combinado (reducciones que se harán necesariamente por retiro de este tipo de tecnologías), tomando como referencia el año 2020. En contraparte, en este año centrales con tecnologías limpias, tales como la hidroeléctrica, eólica, geotérmica, solar y de bioenergía tendrán una mayor participación dentro del SEN, planeado de esta forma con el fin de amortiguar la caída de generación que se dará ante la fuera en marcha de dichas centrales convencionales.

Siguiendo lo mencionado, en el segundo artículo transitorio de la Ley General de Cambio Climático se especifica la expectativa de reducción del total de emisiones de todos los sectores de interés con respecto al año 2000 en un 30% para el año 2020 y en 50% para el año 2050, en la categoría de impacto atmosférico. Si en el año 2000 se emitieron un total de gases de efecto invernadero de 576.49 millones

de toneladas de CO₂ eq., esta meta estipula que la suma de emisiones de estos sectores en cuanto a este tipo de gases no debe sobrepasar 403.54 millones de toneladas de CO₂ eq. para el año 2020 y 288.24 millones de toneladas para el año 2050.

Dentro de los GEI emitidos en el año 2000, 106.2 millones de toneladas, o el 18.4% del total, fueron emitidos específicamente por el sector de generación eléctrica. Entonces, si se aplicará con rigidez lo dicho por esta meta y se exigiera reducir las emisiones de cada sector en 30% al 2020, este sector tendría que ser responsable de la emisión de 74.34 millones de toneladas de este tipo de gases. Siguiendo el modelo de cálculo usado en el desarrollo de este trabajo, el cual está basado en los datos de análisis de ciclo de vida reportados por la CRIEPI, y la información referida a la proyección de generación reportada por la SENER, se espera que para el año 2020 sean emitidos 122.17 millones de toneladas, 47.83 millones de toneladas por arriba de lo señalado por esta meta. Por lo cual, se podría concluir que el seguimiento de esta planeación del sector de generación eléctrica no aseguraría el cumplimiento de este objetivo indicativo.

En tanto al 2050, podemos observar en el Gráfico 31 que después del 2020, la tendencia del decremento de las emisiones aumenta, hasta alcanzar el año 2024, el cual, como se ha mencionado anteriormente, es el año que ha logrado disminuir a gran escala sus emisiones, pero que aun así no logrará cumplir con lo establecido en esta meta. Después de este año, se espera que las emisiones vuelvan a aumentar debido a la entrada en operación de nuevas centrales de ciclo combinado, separándose aún más de lo prometido a alcanzar.

Aunque por lo anteriormente discutido puede llegar a pensarse que los esfuerzos por el gobierno mexicano han sido mínimos en este contexto, el que específicamente este sector no logró cumplir con esta meta no implica que el progreso en la elaboración de una electricidad más verde, en esta nación, ha sido en vano. Una de los grandes éxitos que se han logrado en los tiempos actuales ha sido el minimizar a gran escala la participación de centrales que usan sólo un combustible fósil en su operación, las cuales son, dentro del grupo de tecnologías

convencionales, las más contaminantes, y en su lugar han sido reemplazadas por la tecnología que menores emisiones tiene dentro de este grupo. Otro de los grandes éxitos que conllevará el seguimiento de dicha planeación es la apertura y promoción de nuevas formas de generación por fuentes renovables o, en su caso, de mínimas emisiones, a las cuales se espera que se les otorgue mayor capacidad en el futuro cercano después del año 2030, por lo que no se puede dar por imposible el alcanzar lo señalado para el año 2050.

Por otra parte, es importante considerar que si el alcance de esta meta sólo tomara en cuenta el total de emisiones de todos los sectores, sin importar la contribución de los mismos, entonces esta meta podría alcanzarse, ya que este sector para el 2020 contribuiría con el 30.27% del total de emisiones que se pretende alcanzar. Con ello los demás sectores tendrían un margen de casi dos tercios del mismo total para abarcar.

Para que estos sectores puedan contribuir en la lucha contra el cambio climático, el Gobierno de la República han propuesto una serie de medidas para cada uno de ellos en el documento titulado “Compromisos de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático para el periodo 2020-2030”¹¹⁰. Uno de los ejemplos es el sector industrial que para alcanzar esta meta este sector debe de sustituir los combustibles pesados por gas natural, energías limpias o biomasa, así como, reducir en mínimo el 25% las fugas, venteo y quemas controladas de metano y controlar las partículas negras de hollín en equipos e instalaciones industriales.

En el caso del sector del transporte, el abastecimiento de gasolinas y diésel de ultra bajo azufre debe de volverse obligatorio; asimismo, el incrementar y/o modernizar la flota vehicular a automóviles eléctricos, híbridos o consumidores principalmente de gas natural, siendo también positivo el reducir la importación de automóviles usados e impulsar el transporte multimodal de carga y pasajeros.

¹¹⁰ Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2015) . Compromisos de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático para el Periodo 2020-2030. México: PDF. Disponible en: http://www.inecc.gob.mx/descargas/adaptacion/2015_indc_esp.pdf [Consultado 8 Jul. 2016].

Actualmente, en el sector urbano la meta es impulsar la construcción de edificaciones y la transformación hacia ciudades sustentables, con eficiencia energética y bajo carbono; también promover el uso doméstico de calentadores y celdas solares, y recuperar y usar el metano en los rellenos sanitarios municipales y las plantas de tratamiento de aguas residuales.

En los sectores forestal y agropecuario, se pretende para alcanzar al 2030 la tasa cero de deforestación al mejorar el manejo forestal, con lo cual se incrementará la conectividad ecológica y aumentará la captura de carbono mediante la conservación, restauración y protección de todo tipo de cuencas y ecosistemas costeros. También se pretende impulsar la tecnificación sustentable del campo, promover biodigestores en granjas agropecuarias y recuperar pastizales.

Por último, es importante hablar sobre las medidas propuestas por el gobierno para prever a la sociedad de los futuros daños consecuentes del cambio climático. Para ello las cuestiones de adaptación al cambio climático se han dividido en tres áreas, una de ellas es la adaptación basada en el sector social, en la cual se ha propuesto la meta de reducir en 50% el número de municipios vulnerables para el 2030 al incrementar los insumos financieros para la prevención y atención de desastres, establecer una regulación efectiva del uso de suelo en zonas de riesgo, gestionar integralmente cuencas para garantizar el acceso al agua y asegurar la capacitación y participación social en la política de adaptación. Todos estos pasos llevarán incorporados un enfoque climático, de género y de derechos humanos.

Conclusiones

La electricidad es un ingrediente esencial de las economías globales, al ser el instrumento más viable en la generación de procesos de producción de bienes y servicios para el progreso humano. Sin embargo, el sector eléctrico, tanto en el contexto nacional como en el mundial, se considera de uso intensivo desde el punto de vista de los recursos y el medio ambiente. En este sentido, la industria eléctrica actualmente confronta la necesidad de alcanzar un equilibrio entre su realización óptima y la contaminación atmosférica que implica, particularmente la de los gases que potencializan el efecto invernadero, y con ello el cambio climático.

Un abasto eléctrico confiable, limpio y a un precio razonable es esencial para el funcionamiento asertivo de la economía moderna y es parte esencial de la calidad de vida en nuestra nación. Como se ha comprobado en el desarrollo de este trabajo, el aseguramiento de este abasto recae en la planeación energética nacional, la cual se fundamenta de diversos protocolos, leyes y normas, y depende de varios factores, como lo son los límites del catálogo de tecnologías de conversión energética, definidos por la cantidad de fuentes de energía económicamente y, ahora, sustentablemente viables, y de la dinámica del mercado energético, donde el gas natural será el combustible clave en la realización de los proyectos definidos por el gobierno.

Ante la obligación de alcanzar la sustentabilidad, es necesario en la actualidad utilizar herramientas de amplio estudio de impacto ambiental, como lo es el Análisis del Ciclo de Vida. Contrastando con lo anteriormente mencionado, esta metodología tiene el alcance de calcular o predecir el impacto a los ciclos biogeoquímicos total o parcial de cualquier producto o servicio al englobar una serie de estudios en cada etapa del ciclo útil del mismo, con la finalidad de analizar las emisiones de contaminantes de cada una, y con ello lograr comparar la afectación ambiental del desarrollo o uso de servicios o productos del mismo giro.

La utilización del ACV en la empresa eléctrica ha sido fundamental para concretar y comparar la contribución de emisiones en términos temporales de GEI por

tecnología de producción de electricidad, lo cual en la planeación energética de los años actuales juega un papel importante en la toma de decisiones y que también se espera se siga enriqueciendo para tener resultados más certeros y versátiles para las nuevas generaciones de tecnologías.

Ante el resultado de este trabajo al haber aplicado adecuadamente los factores del ACV para centrales eléctricas en la proyección energética encontrada en el PRODESEN 2016-2030 se puede asegurar que el Sector Eléctrico no cumplirá para el año 2020 con la meta aspiracional de la Ley General de Cambio Climático, dado que se emitirán 47.83 millones de toneladas por arriba de lo señalado por dicha meta, 64.3% más de lo que se esperaba. Por lo que, para alcanzar a cumplir con esta meta en el primer año especificado, será de suma importancia que los demás sectores reduzcan en buena medida sus emisiones y, con ello, la participación de emisiones del Sector Eléctrico se vea solventado, asegurando un menor impacto en la atmósfera, ciclos biogeoquímicos y una mejora en la calidad de vida.

Bibliografía

- Roldán Viloria, José. *Energías Renovables, Lo que hay que saber*. España. 2013.
- Zuk, M., V. Garibay Bravo, R. Iniestra, M. López, L. Rojas Bracho, I. Laguna. *Introducción a la evaluación de los impactos de las termoeléctricas de México*. México, 2006.
- European Commission. *Externalities of Energy, Vol. 5 Nuclear*. Brussels-Luxemburgo, 1995.
- Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM. *Invalidez de las Reformas Hechas por el Ejecutivo Federal al Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica*. 1st ed., 2005, México DF, pp.15-17.
- González González, Miguel Alejandro. *Geotermia Como Alternativa Energética En México, ¿Es Realmente Viable?* Puebla, México, 2010.
- Secretaría de Energía. *Balance Nacional de Energía 2014*. México, 2015.
- Secretaría de Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2015-2029. México, 2015.
- Secretaría de Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2016-2030. México, 2015.
- Martín del Campo, Cecilia. *Apuntes de Energía y Ambiente, Capítulo Centrales Eléctricas en México*. Maestría en Ingeniería en Energía, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 2007.
- PricewaterhouseCoopers. *Transformación del Sector Eléctrico Mexicano, Implicaciones de la Ley de la Industria Eléctrica y la Ley de la CFE*. México. 2014.
- Ley de la Industria Eléctrica, Diario Oficial de la Federación, México, DF., 11 de Agosto del 2014.
- KPMG. *Reforma Energética, la nueva realidad en México*. México, 2015.

- Martínez, J. y Fernández Bremauntz, A. *Cambio climático: una visión desde México*. Instituto Nacional de Ecología, México, D.F. 2004.
- Yáñez-Vargas. Apolinar. *Impacto ambiental y metodologías de análisis*. Revista BIOCYT, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, 2008.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Obras y/o Actividades que Requieren MIA, Rama Productiva: Industria Eléctrica*. México, México, 2013.
- Martínez, J y Fernández Bremauntz, A. *Cambio Climático: Una Visión Desde México*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México, México, 2004.
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático. *Segundo Informe de evaluación de Cambio Climático*. 1995.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero*. México DF., 2015.
- Martínez, J. and Fernández Bremauntz, A. *Cambio Climático: Una Visión Desde México*. México, 2004.
- Comisión para la Cooperación Ambiental. *Emisiones atmosféricas de las centrales eléctricas en América del Norte*. Montreal, Canadá, 2005.
- Ley General de Cambio Climático. Diario Oficial de la Federación, México, 6 de Junio del 2012.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación, México, 6 de Junio del 2012.
- Ley Federal de Responsabilidad Ambiental. Diario Oficial de la Federación, México, 6 de Junio del 2013.
- Instituto Nacional de Ecología. *Emisiones Derivadas de la Producción de Energía en Centrales Termoeléctricas*. México DF., 2007.
- Romero Rodríguez, Blanca. *El Análisis del Ciclo de Vida y la Gestión Ambiental*. Instituto de Investigaciones Eléctrica, México, 2003.
- Hondo, H. *Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case*. Tokio, Japón. 2004.

- Grupo consultivo de expertos (GCE) sobre las comunicaciones nacionales de las partes no incluidas en el Anexo I de la convención. *Manual del Sector de la Energía - Quema de Combustibles*, 2006.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. *Compromisos de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático para el Periodo 2020-2030*. México D.F., 2015.

Tesis

- Covarrubias Cortes, Cynthia Teresita. *Automatización de sistemas administrativos en tiempo real en el manejo del procedimiento de cuentas de enlace en la Comisión Federal de Electricidad*. Tesis de Licenciatura dentro de la División de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad de Sonora, 2002.
- Mendoza Rodríguez, César Alberto. *Viabilidad técnica-económica de una central solar termoeléctrica de colectores cilíndricos parabólicos para su implementación en México*. Tesis de Licenciatura para obtener el título de Ingeniero Eléctrico- Electrónico, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2011.
- Campos Anastacio, Esteban. *Generación de electricidad a través de fusión nuclear*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico Electricista. Universidad Nacional Autónoma de México. México, Edo. De México, 2009.
- Castrejón Botello, David. *Evaluación de escenarios tecnológicos en la oferta de electricidad para México en el largo plazo*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Energía. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F., Noviembre 2012.
- Coxtinica Mulato, Arturo. *La generación de energía eléctrica por fuentes renovables y su uso en México*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Eléctrico-Electrónico. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F., 2015.

- Pérez Sánchez, Jordán. *Análisis comparativo de tecnologías de captura de CO₂ en la central dual carboeléctrica "Pdte. Plutarco Elías Calles"*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F., Agosto 2013.
- Técnico Superior Universitario en la Carrera de Tecnología Ambiental. Universidad Tecnológica del Valle de Toluca, Estado de México, México, 2015.

Fuentes de información electrónica

- Foro Nuclear. *222 Cuestiones sobre la Energía*. Disponible en: <http://www.foronuclear.org/es/222-cuestiones-sobre-la-energia>, consultado el 28 de Marzo del. 2016.
- Digitales.DGSCA-UNAM, C. (2016). *Energía*. Revista.unam.mx. Disponible en: <http://www.revista.unam.mx/vol.1/num2/art2/> [Consultado 27 Mar. 2016].
- Bellis, Mary. (2016). *The History of Engines - How Steam Engines Work*. Disponible en: http://inventors.about.com/library/inventors/blengine_history.htm [Consultado 17 Mar. 2016].
- Bellis, Mary. (2015). *The Industrial Revolution – The Beginning of the Modern Age*. Disponible en: <https://jomariemayo.wordpress.com/2015/01/19/the-industrial-revolution-the-beginning-of-the-modern-age/> [Consultado 14 Mar. 2016].
- Union of Concerned Scientists. (2016). *A Short History of Energy*. Disponible en: http://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energy-choices/a-short-history-of-energy.html#.Vviw_eJ97Gh [Consultado 27 Mar. 2016].
- Custom-qr-codes.net. (2016). *Transportation History: The Steam Locomotive*. Disponible en: <http://www.custom-qr-codes.net/history-steam-locomotive.html> [Consultado 15 Mar. 2016].
- Engineering and Technology History Wiki. (2016). *Pearl Street Station* Disponible en: http://ethw.org/Pearl_Street_Station [Consultado 16 Mar. 2016].

- Library Of Congress. (2016). *The World's First Hydroelectric Power Plant Began Operation*. Disponible en: http://www.americaslibrary.gov/jb/gilded/jb_gilded_hydro_1.html [Consultado 16 Mar. 2016].
- Braun, Eliezer. (1992). XXIII. *La Electricidad En México*. Disponible en: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/112/htm/sec_25.htm [Consultado 18 Mar. 2016].
- Comisión Federal de Electricidad (2016). CFE y la electricidad en México. Disponible en: http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/CFE_y_la_electricidad_en_Mexico/Paginas/CFEylaelectricidadMexico.aspx [Consultado 17 Mar. 2016].
- Energía Nuclear. (2016). *Energía nuclear en México*. Disponible en: http://energia-nuclear.net/situacion/energia_nuclear_mexico.html [Consultado 28 Mar. 2016].
- Suplementos Corporativos. (2010). *Primeros pasos de la energía eólica en México, Parques Eólicos*. Disponible en: <http://www.parqueseolicosonline.com/2010/02/primeros-pasos/> [Consultado 28 Mar. 2016].
- Servicio Geológico Mexicano (2016). *¿Qué es el carbón mineral?* Disponible en: http://www.sgm.gob.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=167&Itemid=126 [Consultado 22 Mar. 2016].
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2006). *Energías renovables*. Disponible en: <http://www.idae.es/index.php/idpag.16/reلمenu.301/mod.pags/mem.detalle> [Consultado 29 Mar. 2016].
- Espada, Blanca (2016). *Las energías convencionales*. Disponible en: <http://erenovable.com/las-energias-convencionales/> [Consultado 29 Mar. 2016].
- Torresol Energy (2016). *Tecnología de Torre Central*. Disponible en: <http://www.torresolenergy.com/TORRESOL/tecnologia-torre-central/mx> [Consultado 13 Apr. 2016].
- Asociación Nacional de Energía Solar (2016). *Red Termosolar SCP*. Disponible en: http://www.anes.org/anes/index.php?option=com_wrapper&Itemid=76 [Consultado 13 Apr. 2016].

- Energiadoblezero (2016). *Sistemas de discos parabólicos*. Disponible en: <http://energiadoblezero.com/energias-renovables/energia-solar-termoelectrica/sistemas-de-discos-parabolicos> [Consultado 13 Abr. 2016].
- Energía e Impacto Ambiental. (2010). *Energía Solar Fotovoltaica: Principio Físico*. Disponible en: <https://energiaunam.wordpress.com/2010/03/02/81/> [Consultado 14 Apr. 2016].
- Escuela de Ingeniería de Antioquia (fecha no especificada). *Tipos de Centrales Hidroeléctricas*. Disponible en: http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/interesantes/centrales/pagina_nueva_1.htm [Consultado 14 Apr. 2016].
- Centro Nacional de Control de Energía (2016). *Subastas a Largo Plazo*. Disponible en: <http://www.cenace.gob.mx/paginas/publicas/MercadoOperacion/Subastas.aspx> [Consultado 20 Apr. 2016].
- Comisión Federal de Electricidad (2016). *Clientes*. Disponible en: http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/Estadisticas/Paginas/clientes.aspx [Consultado 22 Apr. 2016].
- Energía a Debate (2014). *El sector eléctrico, de monopolio a mercado competitivo*. Disponible en: <http://energiaadebate.com/el-sector-electrico-de-monopolio-a-mercado-competitivo/> [Consultado 23 Abr. 2016].
- Índex Mundi (2016). *Electricidad - producción por país - Mapa Comparativo de Países - Mundo*. Disponible en: <http://www.indexmundi.com/map/?v=79&l=es> [Consultado 20 Abr. 2016].
- Sistemas, N. (2016). *Contaminación ambiental*. Disponible en: <https://www.inspiration.org/cambio-climatico/contaminacion/tipos-de-contaminacion/contaminacion-ambiental> [Consultado 25 Abr. 2016].
- Enciclopedia de Tipos (2016). *Tipos de impacto ambiental*. Disponible en: <http://www.tiposde.org/ciencias-naturales/763-tipos-de-impacto-ambiental/> [Consultado 2 May 2016].
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2016). *Definición y Objetivo*. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion->

ambiental/impacto-ambiental-y-tipos/definicion-y-objetivo [Consultado 2 May 2016].

- Craco.galeon.com. (2016). *Índice 1*. Disponible en: <http://craco.galeon.com/ecologi.htm> LA ATMÓSFERA [Consultado 2 May 2016].
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2016). *Fuentes de contaminación del aire*. Disponible en: <http://www.inecc.gob.mx/calaire-informacion-basica/537-calaire-fuentes> [Consultado 27 Abr. 2016].
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2016). *Contaminantes primarios y secundarios*. [online] Disponible: <http://www.inecc.gob.mx/calaire-informacion-basica/525-calaire-cont-primarios-secundarios> [Consultado 30 Abr. 2016].
- Comisión Europea (fecha no especificada). *Comprender los Gases de Efecto Invernadero*. Disponible en: http://ec.europa.eu/clima/sites/campaign/pdf/gases_es.pdf [Consultado 20 May 2016].
- Cambio Climático Global. (2013) *¿Qué es el Calentamiento Global?* Disponible en: <http://cambioclimaticoglobal.com/que-es-el-calentamiento-global> [Consultado 18 May 2016].
- Centro Mario Molina (2016). *¿Qué es el cambio climático?* Disponible en: <http://centromariomolina.org/cambio-climatico/temas/educacion-en-cambio-climatico/> [Consultado 22 May 2016].
- Escolares.net. (2016). *Alteraciones en los ciclos biogeoquímicos*. Disponible en: <http://www.escolares.net/biologia/alteraciones-en-los-ciclos-biogeoquimicos/> [Consultado 14 May 2016].
- El Banco Mundial (2016). *Indicadores*. Disponible en: <http://databank.bancomundial.org/data/home.aspx> [Consultado 10 May 2016]...Siendo consultados los indicadores de emisiones de GEI –Óxido nitroso, metano, dióxido de carbono y total–, crecimiento del PIB, población total y consumo de energía eléctrica –De energéticos fósiles, nuclear y alternativa y total– para el Mundo y México.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2016). *Normatividad*. Disponible en: <http://www.inecc.gob.mx/calaire-informacion-basica/564-calaire-normatividad#reglamento> [Consultado 1 Jun. 2016].

- Índice Mundi (2016). *Ranking de países por Emisiones de CO2 (kt)*. Disponible en: <http://www.indexmundi.com/es/datos/indicadores/EN.ATM.CO2E.KT/rankings> [Consultado 7 Jun. 2016].
- Conservación & Carbono S.A.S (2016). *Análisis del Ciclo de Vida – ISO 14040 « Conservación y Carbono | Por un desarrollo sostenible*. Disponible en: <http://www.conservacionycarbono.com/analisis-del-ciclo-de-vida-iso-14040> [Consultado 11 Jun. 2016].
- Centro Mario Molina (2013). *Análisis de ciclo de vida de casos de estudio de futuras centrales eléctricas en México*. Disponible en: <http://centromariomolina.org/wp-content/uploads/2014/01/3.-ACV-CentralesElectricasM%C3%A9xico.pdf> [Consultado 18 Jun. 2016].
- International Energy Agency (2008). *Energy Technology Perspectives*. Disponible en: <http://www.iea.org/w/bookshop/add.aspx?id=330> [Consultado Jul 1, 2016].
- Comisión para la Cooperación Ambiental (2005). *Gases de efecto invernadero | Power Plant Emissions of North America*. Disponible en: <http://www2.cec.org/site/PPE/es/emisiones-de-contaminantes/gases-de-efecto-invernadero-0> [Consultado 10 Jul. 2016].

Fuentes de información multimedia

- Masini Aguilera, Francisco Javier, (2014). *Análisis de Funciones, ¿Cómo funciona un foco Incandescente?* [vídeo] Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=2_ipDw-Ug04 [Consultado 27 Mar. 2016].

Apéndice 1

Generadores Eléctricos

Un generador eléctrico es todo equipo destinado a convertir energía mecánica a energía eléctrica mediante el fenómeno de la inducción electromagnética¹¹¹ al hacer uso de un flujo magnético¹¹², existen diferentes tipos de generadores y estos se clasifican según del tipo de corriente que generan.

- Dínamos

Los dínamos, por ejemplo, fueron los primeros generadores usados en la producción de electricidad, tal es el caso de Pearl Station, y son equipos que basan su funcionamiento en el aprovechamiento de un campo magnético¹¹³ al usar bobinas para generar electricidad mediante la producción de corriente directa¹¹⁴. Los dínamos se componen principalmente por:

- Estator, estructura estática responsable de generar el campo magnético.
- Armadura, artefacto rotante conformado por bobinas de cobre en espiral, las cuales cortan las líneas de flujo del campo magnético generado por el estator, obteniéndose pulsos de energía eléctrica.
- Conmutador, en la generación de corriente directa el flujo de la corriente fluye en una sola dirección y esto representa un problema cuando la armadura revierte la corriente cada media revolución, para ello fue creado el conmutador, artefacto giratorio que desconecta la alimentación durante la corriente invertida del ciclo. Una de las partes más importantes del

¹¹¹ Fenómeno que origina la producción de una fuerza electromotriz cuando ocurre una variación del flujo magnético en un medio o cuerpo expuesto a un campo magnético, la razón por la cual se produce esta fuerza es la oposición de dichas variaciones de flujo.

¹¹² Producto del campo magnético medio y el área perpendicular que atraviesa. En el caso de generadores eléctricos el campo magnético es atravesado por bobinas giratorias, entonces el área que se usa es la de la bobina sobre un plano perpendicular.

¹¹³ Se define como campo magnético al espacio que rodea a todo imán en el cual se manifiestan sus efectos magnéticos. Dichas regiones están compuestas por líneas de flujo, las cuales se originan en el polo norte del imán y residen en el polo sur, estas líneas también cuentan con la misma dirección que la fuerza magnética ejercida por este objeto. En las generación de electricidad de utiliza electroimanes, los cuales producen un campo magnético más potente.

¹¹⁴ O corriente continua, es aquella cuyas cargas eléctricas o electrones fluyen siempre en el mismo sentido en un circuito eléctrico cerrado, moviéndose del polo negativo hacia el polo positivo de una fuente de fuerza electromotriz.

conmutador son los cepillos, los cuales se encargan de conducir la electricidad remanente a la armadura¹¹⁵.

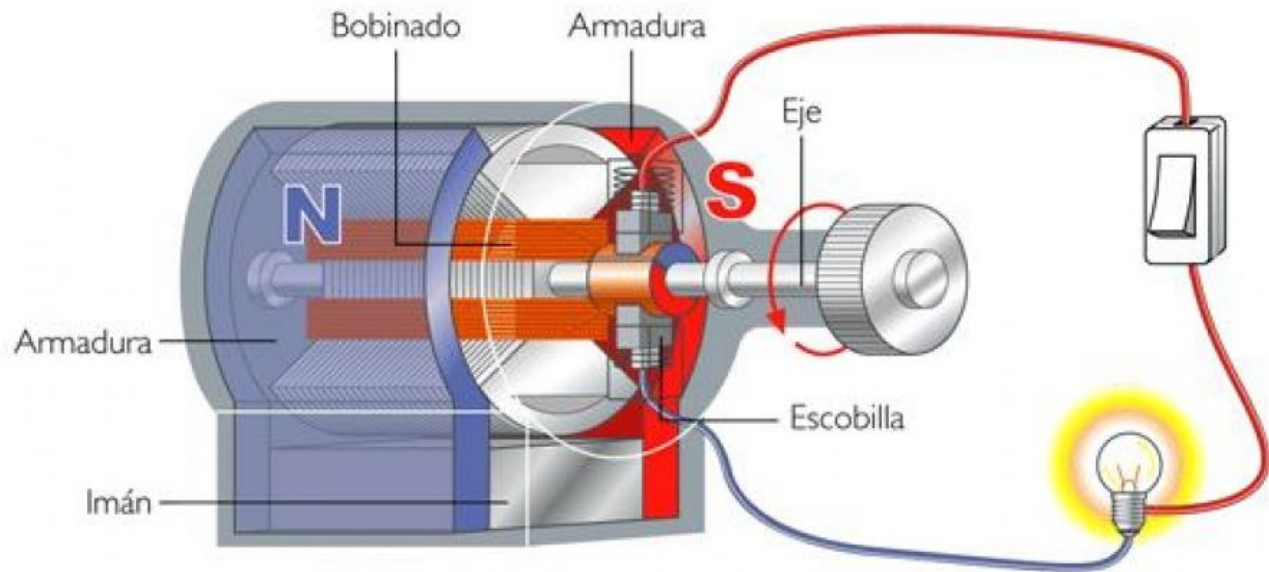


Ilustración 33. Esquema completo de un dínamo.
Fuente. dinamodelos.blogspot.com

- Alternadores

Debido a los altos costos de producción de corriente directa y su baja eficiencia para transmitirse a grandes distancias, los generadores de corriente alterna¹¹⁶ rápidamente tomaron su lugar en la producción eléctrica y son los generadores que actualmente se utilizan en la mayoría de las centrales eléctricas¹¹⁷, por lo que cuando se habla de un generador en una central eléctrica se refiere a un alternador. Los generadores de corriente alterna son técnicamente llamados “alternadores” y consta de tres partes fundamentales, el inductor, que es el que crea el campo

¹¹⁵Center, C. (2011). *Generators and Dynamos*. [online] Edisontechcenter.org. Disponible en: <http://www.edisontechcenter.org/generators.html> [Consultado 15 Mar. 2016].

¹¹⁶ En este tipo de corriente los electrones no fluyen en una dirección. Se mueven hacia adelante y atrás constantemente. Como resultado de este movimiento el cambio de la tensión de los electrones del sistema tampoco es constante, gráficamente circuitos que usan esta corriente se reflejan como funciones sinusoidales. Gracias a esta forma de oscilación la corriente alterna logra transmitir la energía de manera más eficiente.

¹¹⁷ Francescutti, P. (n.d.). *La guerra de las corrientes: Tesla frente a Edison*. 1st ed. [ebook] Disponible en: http://www.ree.es/sala_prensa/ext_img/entrelneas-0007_5.pdf [Consultado 31 Mar. 2016].

magnético, el inducido que es el conductor el cual es atravesado por las líneas de fuerza de dicho campo y anillos colectores que son los responsables de conducir la corriente generada al transformador. El inductor está constituido por el rotor, dotado piezas magnéticas, las que para simplificar son imanes permanentes, cuya polaridad se indica, el inducido o estator por bobinas de alambre arrolladas en los soportes polares, y los anillos colectores por cepillos de grafito o carbón que se ponen en contacto con el rotor gracias a la acción de resortes que presionan a los cepillos adecuadamente¹¹⁸.

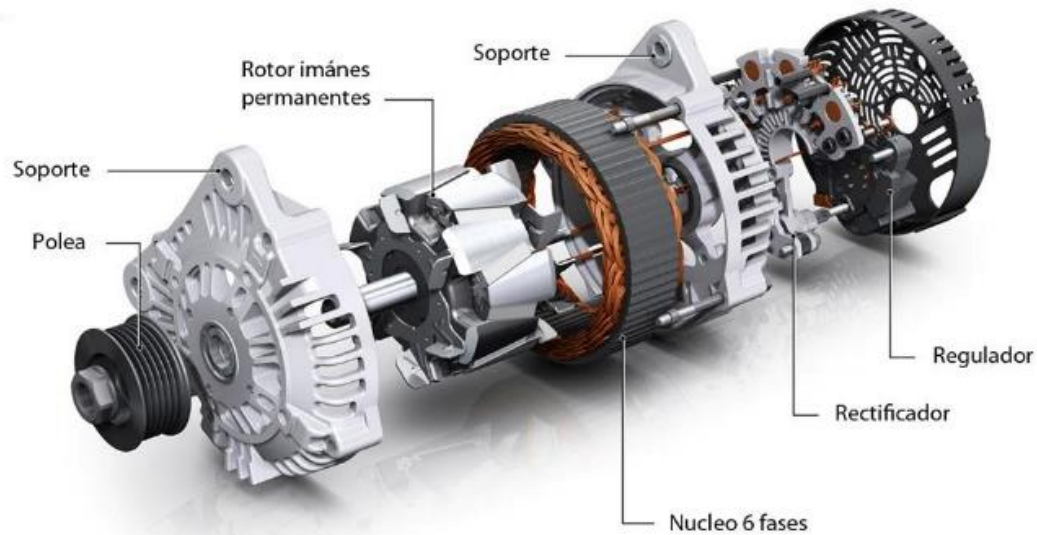


Ilustración 34. Esquema completo de un alternador.

Fuente. <http://blog.hunabsys.com/wp-content/uploads/2015/12/alternador.jpg>

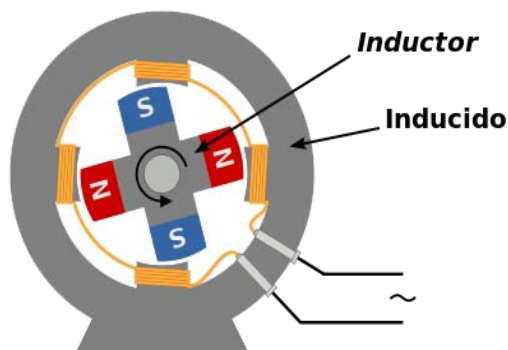


Ilustración 35. Polos de un alternador.

Fuente. [wikipedia.org/wiki/Alternador#/media/File:Alternador.svg](https://www.wikipedia.org/wiki/Alternador#/media/File:Alternador.svg)

¹¹⁸ Academia de Física CBTIS 162 (2016). 3.2.8 GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA Y CORRIENTE CONTINUA - FISICA. [online] Disponible en: <https://sites.google.com/site/fisicacbtis162/services/3-2-8-generator-de-corriente-alterna-y-corriente-continua-1> [Consultado 6 Abr. 2016].

Apéndice 2

Ciclos Termodinámicos

La eficiencia de una central eléctrica depende de la optimización del proceso de operación, en otras palabras, siempre se busca aumentar la producción energética, y reducir los costos de consumos energéticos y consumibles, garantizando de esta forma el cumplimiento del marco normativo en materia ambiental. Por lo que al hablar de eficiencia se debe poner mayor atención en los equipos encargados del aprovechamiento energético de las fuentes de energía explotadas. Ciertos equipos traen consigo una eficiencia dada por el fabricante¹¹⁹, por lo que, dependiendo de la cantidad del recurso energético y de las condiciones ambientales del área designada para construir una central eléctrica se buscan equipos que cumplan con la eficiencia necesaria para explotar efectivamente estos recursos. En las centrales que usan medios termodinámicos para la producción de electricidad uno de los factores más importantes para llevar a cabo dicho fin efectivamente son los ciclos termodinámicos, los cuales son implementados de distintas formas para que el fluido encargado de poner en funcionamiento las turbinas entregue el trabajo necesario de la forma más conveniente para llevar a cabo la optimización de la operación.

Un ciclo termodinámico es un proceso especial en el cual el estado inicial de la sustancia que se encuentra en él coincide con su estado final, al pasar por una serie de procesos que hayan cambiado su estado. En las centrales eléctricas se usan principalmente:

- Ciclo Rankine

El ciclo Rankine es el ciclo comúnmente aplicado en todas las plantas generadoras de potencia con turbinas de vapor. Este ciclo emplea las características del agua como un recurso principal y la utiliza como fluido de trabajo, manejando su cambio de fase entre el líquido y el vapor. Este ciclo puede usar muchas otras sustancias

¹¹⁹ Hablando específicamente a equipos como turbinas y generadores eléctricos.

como fluidos de trabajo, la elección depende de varios factores, incluyendo la necesidad de ajustar las temperaturas de transferencia de calor a los estados de vapor y líquido, en tanto la presión del sistema se mantenga debajo del límite.

El ciclo Rankine en una central eléctrica empieza cuando el fluido de trabajo entra a la caldera, gracias al trabajo de un sistema de bombeo, a una temperatura relativamente baja. La caldera se encuentra a presión constante y es en ésta donde ocurre la transferencia de calor gracias a la combustión o uso de algún energético, entonces el líquido es calentado llegando a su punto de ebullición, generando así la corriente de vapor que sale de la caldera. Entonces el vapor es conducido a la turbina de vapor, donde se expande (en un proceso isentrópico) produciendo el trabajo para impulsar la turbina y así obtener energía mecánica. A la salida de la turbina, el vapor, con mucha menor presión, es conducido al condensador donde las condiciones de este equipo dan pie al proceso de condensación del mismo al mantener la presión y temperatura de su saturación constante.

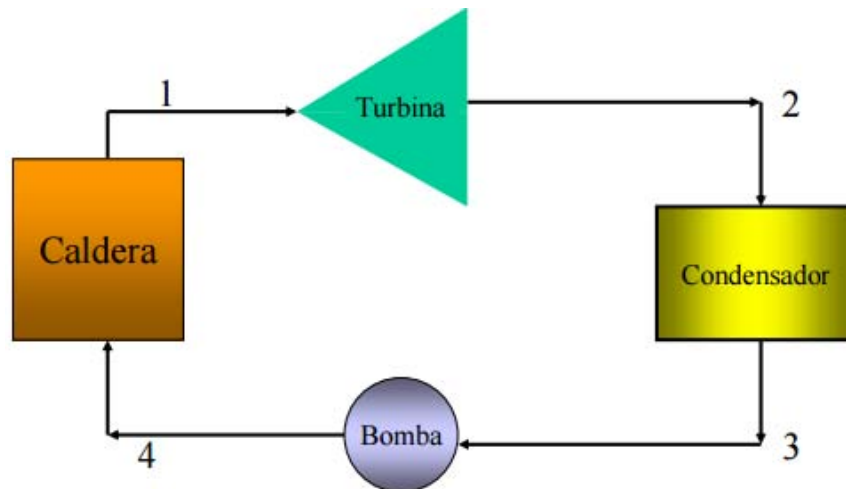


Ilustración 36. Ciclo Rankine.

Fuente. Martín Bárcenas, Facultad de Ingeniería-División de Ciencias Básicas, UNAM.

- Ciclo Brayton

Este ciclo es específico de las turbinas de gas. Estas turbinas se componen individualmente de un compresor, una cámara de combustión y una turbina de expansión. El proceso de generación inicia cuando al compresor se le inyecta una corriente de aire a condiciones atmosféricas y depurada con la ayuda de un filtro colocado a la entrada de éste, después el aire es comprimido y una parte es llevada

a la cámara de combustión, donde es mezclado con el combustible (gas natural o diésel) también alimentado a la misma cámara y es en esta sección donde el aire comprimido proporciona el oxígeno necesario para realizar la combustión del energético y producir gases de combustión de alta presión y temperatura, que posteriormente serán llevados a la turbina de expansión. En la turbina se mezcla la parte restante de la corriente de aire a la salida del compresor y los gases provenientes de la cámara, con la finalidad de lograr la expansión de esta mezcla y aprovechar la energía cinética resultante para provocar el movimiento mecánico de este equipo, que surtirá de energía al generador produciendo así energía eléctrica. Generalmente los gases a la salida de la turbina son liberados a la atmósfera. En este ciclo el aire del exterior es comprimido, calentado y posteriormente expandido en la turbina, quedando como excedente la diferencia entre la potencia generada en ella y la que es requerida para comprimir el aire. La potencia eléctrica producida por la turbina y requerida por el compresor es proporcional a la temperatura absoluta de los gases de escape.

Actualmente, existen diversas variaciones del ciclo de Brayton, por ejemplo, se puede disminuir el consumo de combustible mediante el precalentamiento del aire comprimido con los gases de escape de la turbina a través de un recuperador o regenerador; se puede reducir el trabajo del compresor , y por ende, aumentar la potencia generada mediante etapas de inter o pre enfriamiento; o bien, se pueden utilizar los gases de escape para generar vapor y así generar electricidad adicional en un ciclo combinado.

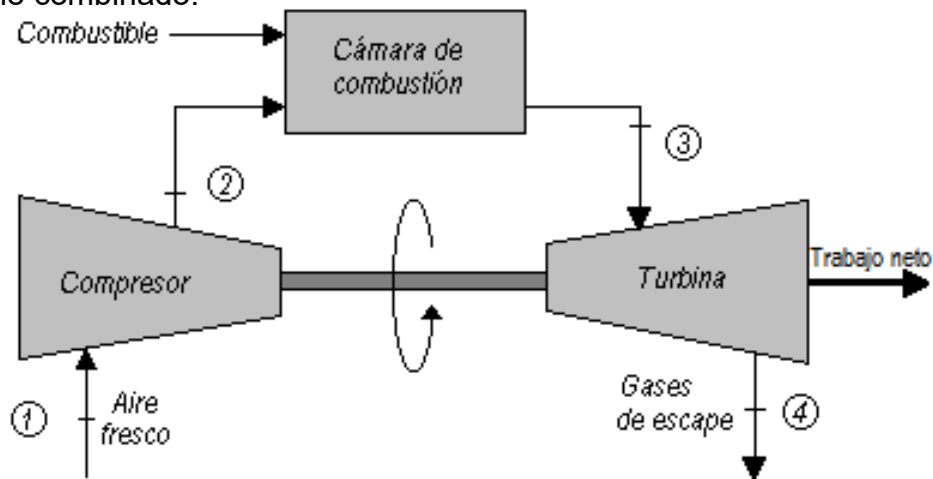


Ilustración 37. Ciclo Brayton.

Fuente. <http://html.rincondelvago.com/000541662.png>

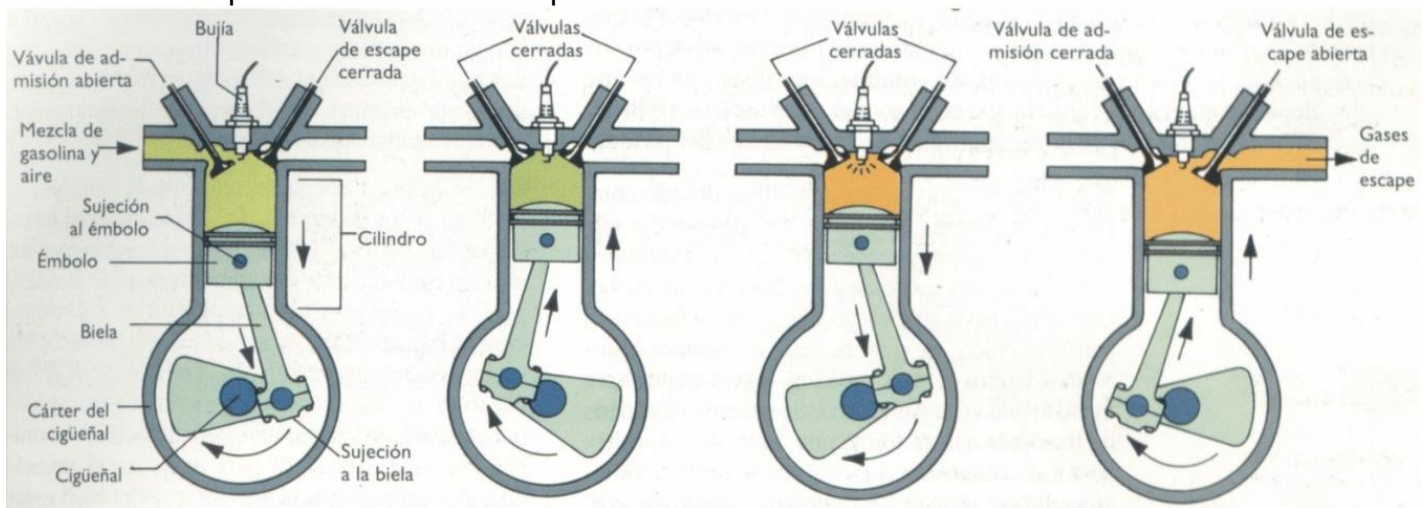
- Ciclo Otto

Los motores de combustión interna pueden ser de dos tipos: de encendido por chispa y de encendido por compresión. Los ciclos Termodinámicos que modelan este tipo de motores son el ciclo Otto y el Diésel respectivamente.

En un motor Otto el aire y el combustible entran a través del carburador, cuya función es mezclarlos. Ésta mezcla se comprime hasta una temperatura menor a la de autoencendido, con el aumento de la relación de compresión aumenta la eficiencia pero si se alcanza la temperatura de auto-ignición el combustible puede “quemarse” antes de tiempo y éste se consumiría más rápidamente, además, se produciría un sonido llamado “golpeteo” del motor.

- Ciclo Diésel

El ciclo diésel es un intento para lograr una eficiencia lo más a fin posible a la del ciclo de Carnot en una máquina de combustión interna. Su funcionamiento se basa en la compresión de aire hasta alcanzar una temperatura mayor a la temperatura de autoencendido del combustible, y la combustión ocurre al contacto cuando éste es inyectado (bujía y carburador sustituidos por inyector de combustible). Como solo se comprime el aire se evitan problemas de autoencendido.



ADMISIÓN

Pistón baja y entra combustible por la válvula de admisión
El cigüeñal da 1/2 revolución

COMPRESIÓN

Pistón sube y el combustible y el aire se comprimen.
Las válvulas están cerradas
El cigüeñal da 1/2 revolución

EXPLOSIÓN

La mezcla del combustible y de aire explota. Como las válvulas están cerradas el pistón baja. Potencia
El cigüeñal da 1/2 revolución

ESCAPE

Pistón sube y expulsa los gases quemados por la válvula de escape
El cigüeñal da 1/2 revolución

Ilustración 38. Ciclo Otto/ Diésel.

Fuente. <http://html.rincondelvago.com/000152301.png>

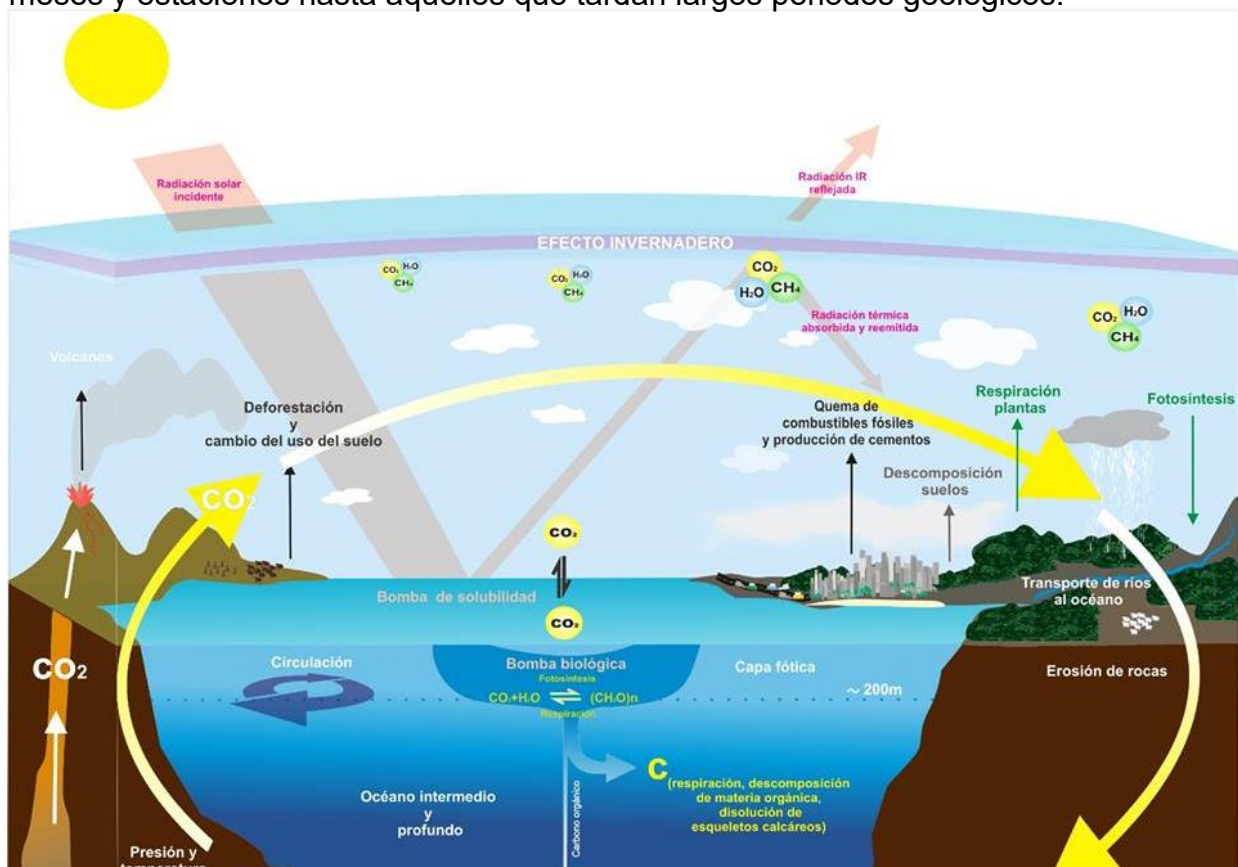
Apéndice 3

Ciclos Biogeoquímicos

- Ciclo del carbono

El carbono es parte fundamental de la vida al ser primordial en la evolución de los organismos que habitan la tierra, al componerse y alimentarse principalmente de proteínas, ácidos nucleicos, carbohidratos y lípidos, entre otros.

Las principales reservas de carbono en la Tierra se encuentran en la litosfera (rocas calcáreas y combustibles fósiles), en la hidrosfera (CO_2 disuelto y caparazones de moluscos encontrados en los océanos), la biosfera (humus y seres vivos) y la atmósfera (CO_2). Es por ello que este ciclo (ver Ilustración 39) juega un papel importante en la regulación del clima del planeta. El carbono circula entre la atmósfera, la hidrosfera, la biosfera y la litosfera por medio de la interacción en escalas de tiempo que van desde procesos que demoran algunas horas, días, meses y estaciones hasta aquellos que tardan largos periodos geológicos.



Ilustraci6n 39. Ciclo del carbono.

Aunque la mayoría de las reservas de carbono son sólidas o líquidas, su ciclo es fundamentalmente gaseoso y orgánico, e inicia cuando los organismos autótrofos sintetizan materia orgánica a partir del dióxido de carbono disuelto en aire o agua, en su mayor parte mediante el proceso fotosintético a partir de la luz solar. Al mismo tiempo la cadena alimenticia ocurre, facilitando la descomposición de la materia orgánica y dejando salir carbono a la atmósfera, océanos y/o suelos. Durante este proceso las bacterias y los hongos se encargan de descomponer las plantas muertas y la materia animal, devolviendo carbono al medio ambiente. En la litosfera la movilización del carbono secuestrado en los diferentes tipos de rocas es muy lenta, al igual que el proceso inverso. Por otra parte el carbono también se intercambia entre los océanos y la atmósfera, esto sucede en ambos sentidos en la interacción entre el aire y el agua.

Se genera dióxido de carbono por la respiración de los seres vivos y descomposición de la materia orgánica, así como por los procesos de combustión que afectan tanto a diferentes combustibles fósiles como a la materia vegetal.

A través de sus actividades diarias y la explotación masiva de combustibles fósiles, el hombre interviene en el ciclo del carbono al liberar grandes cantidades de carbono a la atmósfera a un ritmo mayor del que puede ser absorbido. La excesiva deforestación y el constante cambio de usos del suelo han perturbado el presupuesto global del carbono, aumentando, en forma lenta pero continua la concentración de CO₂ en la atmósfera; propiciando cambios en el clima con consecuencias en el ascenso en el nivel del mar, cambios en las precipitaciones, desaparición de bosques, extinción de organismos y problemas en la agricultura. Por otra parte también se emiten otros gases que intervienen en este ciclo, tales como metano —en procesos de combustión, descomposición de materia orgánica y determinados usos intensivos agrícolas (arroz) y ganaderos (rumiantes)— y monóxido de carbono —originado principalmente por combustión incompleta—.

- Ciclo del nitrógeno

El ciclo de nitrógeno al igual que los otros ciclos biogeoquímicos tiene una trayectoria definida, pero más complicada a comparación. Al ser el elemento más abundante en la atmósfera, éste sólo se encuentra en su estado molecular (N_2), siendo imposible para la mayoría de los seres vivos aprovecharlo, sólo algunas bacterias y las cianobacterias son los únicos organismos capaces de asimilar el N_2 , al “romper” la unión de los enlaces de esta molécula por medios enzimáticos, eléctricos o fotoquímicos; y así producir los compuestos nitrogenados que pueden ser aprovechados por los seres vivos. Gracias a la acción de estas bacterias y su interacción con organismos autótrofos, el nitrógeno puede ser fijado en ellos para dar las bases de la producción de aminoácidos y proteínas vegetales, que son aprovechadas a su vez por animales herbívoros, quienes los van almacenando a través de la cadena alimenticia, regresando de nuevo al ciclo por medio de los desechos (tanto restos orgánicos, como productos finales del metabolismo), gracias a que las bacterias fijadoras lo pueden “retomar” y finalmente ser asimilados nuevamente por las plantas.

A pesar de que la mayor parte del nitrógeno se encuentra en la atmósfera, la reserva realmente activa de este elemento se encuentra en el suelo, ya que aquí van a parar los desechos orgánicos de los organismos vivos y los restos de éstos. Y es así, como las bacterias fijadoras de nitrógeno concluyen el proceso de descomposición de estos materiales, convirtiendo el nitrógeno orgánico en inorgánico (nitratos). Los nitratos son la única forma en la cual las plantas pueden absorber este elemento para poder sintetizar sus propias proteínas, por medio de la fotosíntesis. Entonces el ciclo del nitrógeno puede ser descrito en seis fases:

1. Fijación. Incorporación del nitrógeno atmosférico, a las plantas, gracias a la acción de algunos microorganismos. Esta fijación se da por medio de la conversión de N_2 en amoníaco (NH_3) o nitratos (NO_3^-).
2. Nitrificación o mineralización. Solamente existen dos formas de nitrógeno que son asimilables por las plantas, el nitrato (NO_3^-) y el amonio (NH_4^+),

siendo el NO_3^- el preferido por la mayoría de las especies. Por lo que el NH_4^+ se procesa para generar NO_3^- por medio de la nitrificación, proceso realizado por los microorganismos presentes en el suelo y que depende de la temperatura y el pH del mismo. Esta fase es realizada en dos pasos por las diferentes bacterias encontradas en este medio: primero procesan el NH_4^+ en nitritos (NO_2^-) y después oxidan los NO_2^- a NO_3^- . Este proceso es importante para las bacterias, ya que les entrega energía. Por otra parte, el nitrato no es el único producto que se origina durante esta fase. Las diferentes reacciones que tienen lugar durante la nitrificación producen varios óxidos de nitrógeno (NO , NO_2 , N_2O).

3. Asimilación. La asimilación ocurre cuando las plantas absorben a través de sus raíces, NO_3^- o NH_3 (al desprotonar el NH_4^+). Luego, estas moléculas son incorporadas tanto a las proteínas, como a los ácidos nucleicos de las plantas.
4. Amonificación. Cuando los organismos producen desechos que contienen nitrógeno como la orina (urea), los desechos de las aves (ácido úrico), así como de los organismos muertos, éstos son descompuestos por bacterias presentes en el suelo y en el agua, liberando el nitrógeno al medio bajo la forma de amonio, el cual después es digerido enzimáticamente por otro grupo de bacterias fijadoras, degradándolo en compuestos aminados.
5. Inmovilización. Es el proceso contrario a la mineralización, por medio del cual las formas inorgánicas (NH_4^+ y NO_3^-) son convertidas a nitrógeno orgánico y, por tanto, no asimilables.
6. Desnitrificación. La reducción de los NO_3^- a N_2 , y NH_4^+ a NH_3 , se llama desnitrificación, y es llevado a cabo por las bacterias desnitrificadoras que revierten la acción de las fijadoras de nitrógeno, regresando el nitrógeno a la

atmósfera en forma gaseosa, llevando consigo una porción de óxidos de nitrógeno¹²⁰.

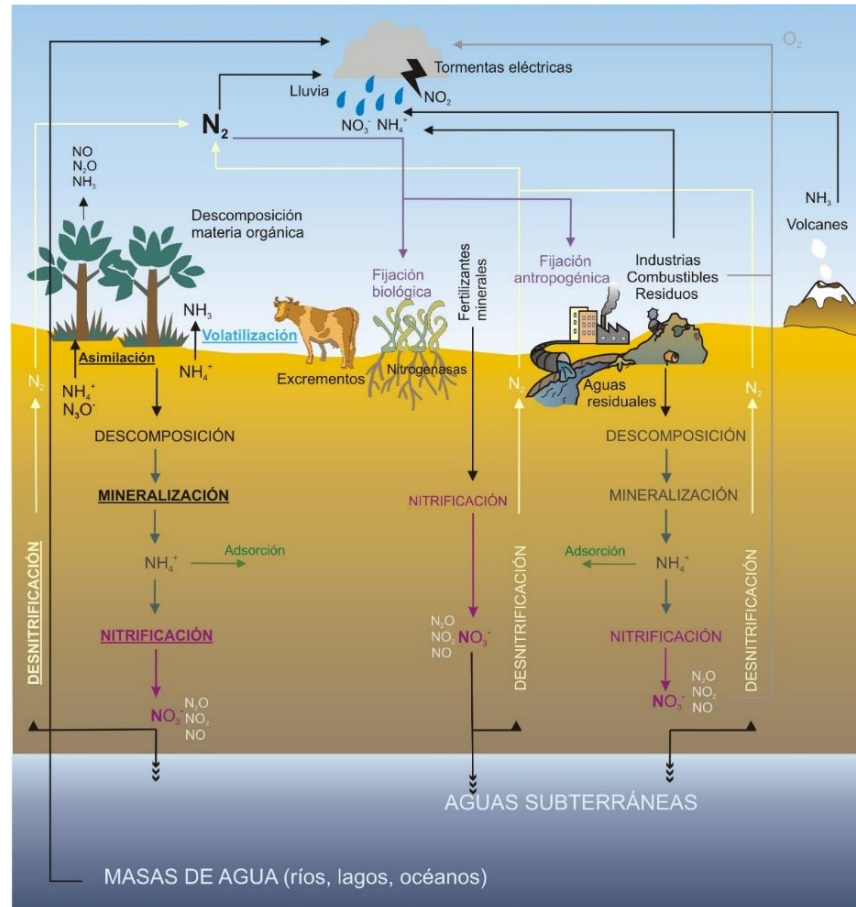


Ilustración 40. Ciclo del nitrógeno.

Fuente. <http://www.miliarium.com/proyectos/nitratos/Nitrato/CicloNitrogeno.asp>

Las actividades antropogénicas que más intervienen en este ciclo son la combustión en vehículos de transporte, la generación de energía eléctrica y determinados procesos industriales. Los cuales liberan a la atmósfera amoníaco y óxidos de nitrógeno.

- Ciclo del azufre

Los mayores depósitos de azufre son de tipo sedimentario, encontrándose principalmente en las profundidades del agua y en el suelo, también, en bastante

¹²⁰ Divulgacion.ccg.unam.mx. (2016). [online] Disponible en: http://www.divulgacion.ccg.unam.mx/webfm_send/109 [Consultado 7 May 2016].

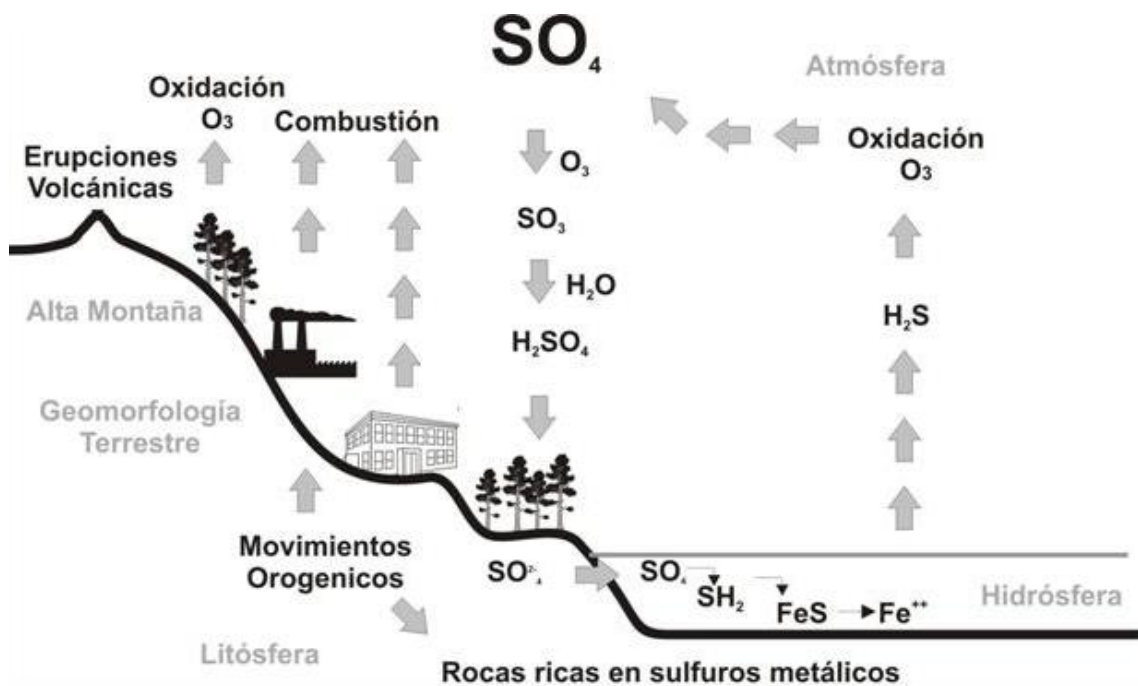
menor medida en la atmósfera en fase gaseosa y en forma de sulfuro de hidrógeno (H_2S) y dióxido de azufre (SO_2).

La principal fuente de azufre para los organismos es el sulfato inorgánico (SO_4^{2-}) disuelto en el agua, que es absorbido por las plantas y utilizado en la formación de aminoácidos azufrados. En esta parte del ciclo, el H_2S encontrando en las zonas profundas de los ecosistemas acuáticos es oxidado por bacterias sulfurosas, las cuales, inicialmente lo procesan para generar azufre elemental, azufre que no es asimilable por las plantas, y después lo vuelven a oxidar para producir SO_4^{2-} , continuando de esta manera con el ciclo. Por otra parte se produce H_2S como resultado de la acción de bacterias heterótrofas sobre los diversos desechos orgánicos, emitiendo H_2S directamente a la atmósfera.

La fase sedimentaria del ciclo corresponde a la precipitación del azufre, bajo condiciones anaerobias, en presencia de hierro partiendo de sulfuro de hidrógeno (SH_2), lo que produce una acumulación lenta y continua de azufre en los sedimentos profundos acuáticos. Cuando esta acumulación de azufre se produce en yacimientos carboníferos y petrolíferos, da como consecuencia la presencia de este elemento en los combustibles fósiles.

La extracción de combustibles fósiles y su utilización en procesos de combustión, produce la liberación del azufre contenido en los mismos, a la atmósfera en forma de SO_2 , donde también se adiciona el SO_2 emitido en las erupciones volcánicas. Una parte del SO_2 presente en la atmósfera es reabsorbido por las plantas y otra se transforma en sulfatos que vuelven, por deposición o precipitación, a la tierra, siendo absorbida por el suelo y reutilizados por los organismos, con lo que queda cerrado el ciclo (ver Ilustración 41).

En la atmósfera se produce ácido sulfúrico a partir del dióxido de azufre, con participación de radicales hidroxilo y peróxido y en parte se neutraliza con partículas de amoníaco y carbonato cálcico. Tanto las partículas de sulfúrico como sus sales son higroscópicas y actúan como núcleos de condensación, depositándose finalmente por el agua de lluvia o la nieve.



Rocas ricas en sulfuros metálicos

Ilustración 41. Ciclo del azufre

Fuente.://datateca.unad.edu.co/contenidos/102021/AntiguasVersiones/contenidolinea/ciclos_biogeoquimicos_ciclo_del_azufre.html

El hombre interviene en el ciclo a través de la utilización de combustibles con azufre, de manera que se emiten cantidades masivas de dióxido de azufre a la atmósfera, superiores a las emisiones naturales.

- Ciclo del oxígeno

El oxígeno es uno de los elementos más importantes para los organismos, ya que no sólo es parte del aire que respiramos, también lo es del agua que bebemos, es por ello que es el elemento más abundante en la Tierra y su ciclo es únicamente gaseoso, siendo su principal reserva la atmósfera. A diferencia de los otros ciclos, el del oxígeno es más sencillo, ya que éste se origina de la fotosíntesis y es eliminado en la respiración de animales, plantas e incluso bacterias, también en procesos de combustión y en la descomposición aerobia de la materia orgánica (ver Ilustración 42).

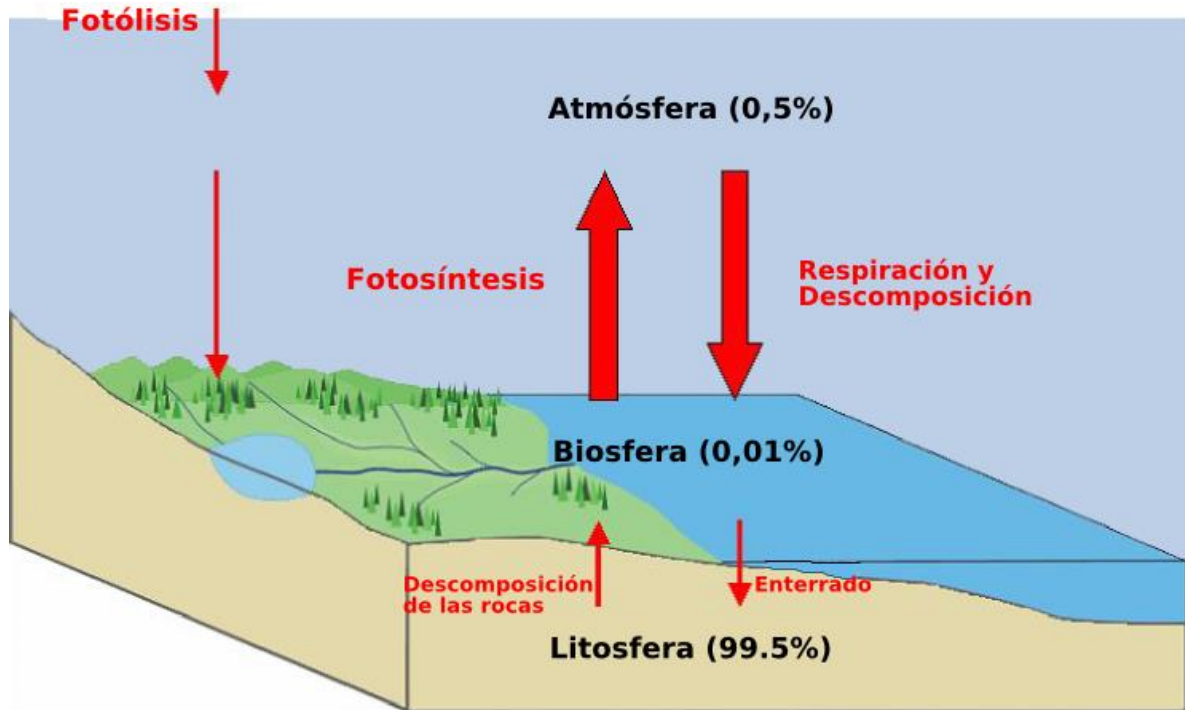


Ilustración 42. Ciclo del oxígeno
Fuente. https://es.wikipedia.org/wiki/Oxygen_Cycle

A su vez, el ciclo del oxígeno interviene en diferentes procesos de oxidación en la atmósfera y, aún más importante, en la formación de ozono estratosférico, como fase determinante en el ciclo del mismo (ver Ilustración 43).

El ozono es generado de forma natural por efecto de los rayos solares sobre las moléculas de oxígeno en la propia troposfera y, sobretudo, en la estratosfera, de donde pasa en gran parte a la troposfera gracias al intercambio de aire que se produce en la tropopausa. Por otra parte, el ozono que se acumula en la troposfera también puede originarse por actividades antropogénicas, ligándose a la emisión de contaminantes atmosféricos¹²¹. La importancia de tener una capa compuesta de esta molécula en la troposfera radica en que el O₃ absorbe las radiaciones solares ultravioletas, nocivas para el ser humano. Por lo tanto, esta capa actúa a modo de escudo que filtra los rayos del Sol haciendo posible la vida en nuestro planeta. De

¹²¹ Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias (2010). *Ciclo Del Ozono*. [online] Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/29713534/Ciclo-Del-Ozono-Clase-4> [Consultado 9 May 2016].

ahí que el adelgazamiento en los últimos años de esta capa sea motivo de preocupación para la comunidad científica internacional¹²².

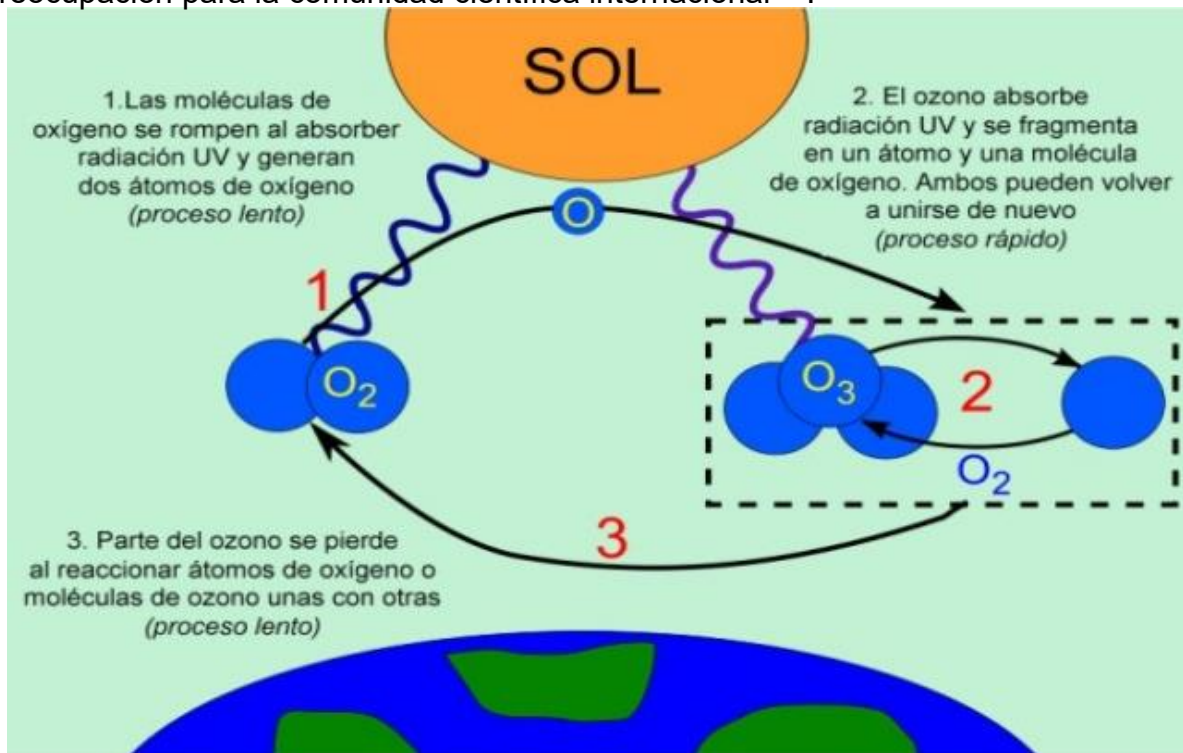


Ilustración 43. Ciclo del ozono.

Fuente. https://es.wikipedia.org/wiki/Capa_de_ozono#/media/File:Ozone_cycle.svg

El hombre interviene fundamentalmente sobre el ozono: en la troposfera incrementando su concentración y en la estratosfera disminuyéndola, en ambos casos a través de la emisión de diversos contaminantes¹²³.

- Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico se define como el "proceso integrante de los flujos de agua, energía y algunas sustancias químicas" y se refiere al movimiento general del agua: al ascender por evaporación y descender al precipitar, formando dos corrientes de

¹²² Defensacentral.com. (2015). *¿Qué es la capa de ozono y por qué es importante?* - *UstedPregunta*. [online] Disponible en:

<http://www.defensacentral.com/ustedpregunta/categoria/ciencia/que-es-la-capa-de-ozono-y-por-que-es-importante/> [Consultado 12 May 2016].

¹²³ Anon, (2016). [online] Disponible en:

http://www.navarra.es/home_es/Temas/Medio+Ambiente/Calidad+del+aire/Informacion/La+atmosfera/Ciclos+biogeoquimicos.htm [Consultado 15 May 2016].

agua, la superficial y la subterránea. La precipitación de la misma puede ser en fase líquida o sólida (nieve, granizo, etc.)

Una vez formada la corriente de agua superficial, una parte es absorbida por la zona radicular de las plantas y llega a formar parte activa de los tejidos de las plantas o transpirada nuevamente hacia la atmósfera. La otra parte, puede desplazarse paralelamente a la superficie del terreno a través de la zona no saturada del terreno, como flujo subsuperficial, hasta llegar a aflorar en los nacimientos o manantiales, esto ocurre gracias al escurrimiento por las laderas, el cual sigue la dirección de las pendientes del terreno.

La corriente subterránea se forma cuando el agua precipitada se infiltra en los suelos hasta llegar a una zona saturada del terreno, donde inicia el almacenamiento de la misma. Las aguas subterráneas, se hallan limitadas inferiormente por depósitos impermeables (arcillas, formaciones rocosas, etc.), por lo que no permanecen estáticas, sino que se desplazan entre sitios por las diferencias entre las equipotencias de los suelos.

La evaporación es un proceso continuo cuasi-estacionario presente en todos los puntos de la cuenca, el cual va desde la evapotranspiración en la vegetación hasta aquella proveniente de la superficie del terreno, los cuerpos abiertos de agua, las corrientes principales y secundarias y las zonas no saturadas y saturadas del terreno.

Por otra parte, es importante remarcar que la precipitación del agua que da pie a la corriente subterránea es mucho más lenta que la superficial y esta lentitud le confiere al ciclo ciertas características fundamentales, como es que los ríos continúen con caudal mucho tiempo después de las últimas precipitaciones.

En conclusión, el ciclo hidrológico es la sucesión de estados que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y volver a la atmósfera (ver Ilustración 44): evaporación del suelo, del mar, o de superficies de aguas continentales; condensación para formar nubes, precipitación, acumulación en el suelo y en

superficies de agua y re-evaporación. De esta forma, se pueden definir dos tipos de ciclos hidrológicos, el externo y el interno:

- El ciclo hidrológico externo es la componente del ciclo hidrológico tal que el vapor de agua evaporado de la superficie del mar se condensa bajo la forma de precipitación, la cual cae sobre los continentes.
- El ciclo hidrológico interno es la componente del ciclo hidrológico limitado a una cierta superficie continental: el vapor de agua evaporado por esta superficie se condensa bajo la forma de precipitación dentro de los límites de esta misma región. (Entiéndase, que esta parte del agua evaporada no entra dentro de la circulación interna porque es arrastrada por los vientos fuera de los límites del territorio dado).¹²⁴



Ilustración 44. Ciclo hidrológico.

Fuente. Cotler et al., 2006 Atlas de la cuenca Lerma- Chapala

¹²⁴ CIIFEN (2016). *Ciclos Biogeoquímicos*. [online] Disponible en: http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=article&id=580&catid=98&content=1&Itemid=131&lang=Des [Consultado 11 May 2016].

Apéndice 4

Serie de fases de trabajo del Análisis del Ciclo de Vida

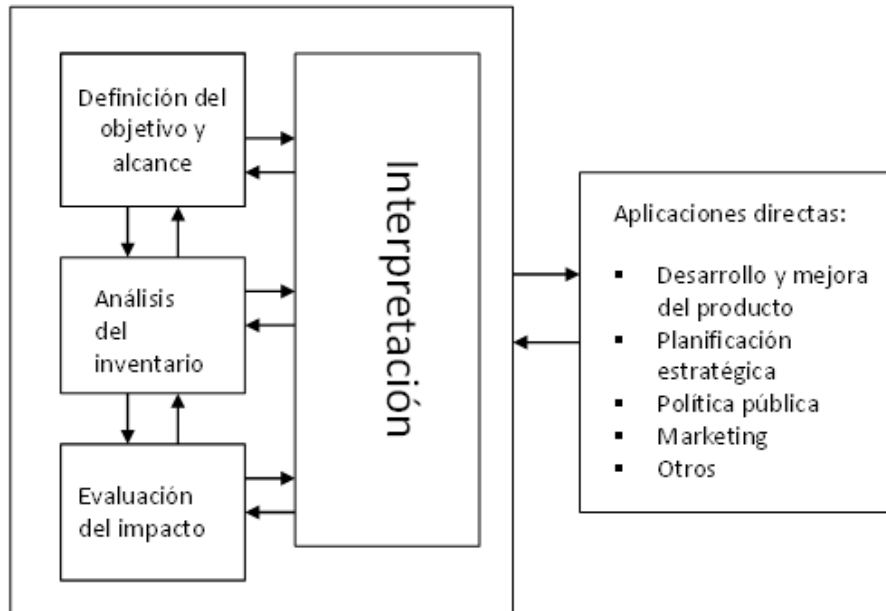


Ilustración 45. Fases del Análisis de Ciclo de Vida.
Fuente. ISO 14040, 1997.

En la definición de objetivos y alcance del estudio se establecen los objetivos y la unidad funcional que se empleará, los sistemas a analizar, así como los límites establecidos.

La unidad funcional proporciona una referencia a partir de la cual se normalizan los datos de entrada o salida. Se establecen también los requisitos (geográficos, temporales, procedencia...) de calidad de datos. Se definen la metodología a emplear en la Evaluación de Impactos, así como las categorías de impactos que se evaluarán.

El análisis de inventario es fundamentalmente un balance de materia y energía del sistema, aunque también puede incluir otros parámetros como: utilización del suelo, radiaciones, ruido, vibraciones, biodiversidad afectada, etc. Comprende la recopilación de los datos y la realización de los cálculos adecuados para cuantificar las entradas y salidas del sistema estudiado.

Las entradas son las materias primas, la energía y el transporte necesario. Las salidas son las emisiones (aire, agua y suelo). A todo el conjunto de datos analizados se le conoce con el nombre de ecovector o perfil ambiental, ya que contiene la información básica sobre el comportamiento ambiental y los impactos causados en el ciclo de vida considerado.

La recolección de datos es la tarea más exigente en cuanto a la ejecución de ACV y es la que más tiempo conlleva. Todos los procedimientos de cálculo se deben documentar explícitamente y se deben especificar y explicar claramente las suposiciones realizadas.

La finalidad de la fase de evaluación de impactos es la de interpretar el inventario, analizando y evaluando los impactos producidos por las cargas ambientales identificadas. Es la fase del ACV dirigida al entendimiento y evaluación de la magnitud e importancia de los potenciales impactos medioambientales de un sistema¹²⁵.

Las fases activas o dinámicas, en las que se recopilan y evalúan los datos son la segunda y la tercera, a diferencia, las fases primera y cuarta pueden considerarse como fases estáticas. A partir de los resultados de una fase pueden reconsiderarse las hipótesis de la fase anterior y reconducirla hacia el camino que ofrezca el nuevo conocimiento adquirido. El ACV es, por lo tanto, un proceso que se retroalimenta y se enriquece a medida que se realiza¹²⁶.

¹²⁵ Tapia Fernández, Carlos. *Análisis de Ciclo de Vida en la aplicación intensiva de energías renovables en el ciclo de agua*. Proyecto final de carrera para la carrera de Ingeniería Química. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, España, 2008.

¹²⁶ Romero Rodríguez, Blanca Iris. *El Análisis del Ciclo de Vida y la Gestión Ambiental*. México, D.F. Boletín, Instituto de Investigaciones Eléctricas. Julio – Septiembre, 2003.

Apéndice 5

Datos extraídos del informe “Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case”, del Instituto Central de Investigación de la Industria Eléctrica (CRIEPI).

1. Emisiones de Ciclo de Vida de centrales de aprovechamiento de carbón

	gCO₂eq/kWh	Porcentaje (%)
Combustión del combustible	886.8	90.9
Construcción	3.6	0.4
Operación de la planta	32.0	3.3
-Minería	9.7	1.0
-Transporte	15.5	1.6
-Generación	6.7	0.7
-Eliminación de cenizas	0.0	0.0
Fuga de metano	52.9	5.4
Total	975.0	100.0

2. Emisiones de Ciclo de Vida de centrales de aprovechamiento de petróleo

	gCO₂eq/kWh	Porcentaje (%)
Combustión del combustible	704.3	94.0
Construcción	2.3	0.3
Operación de la planta	35.2	4.7
-Extracción	11.1	1.5
-Combustible	7.6	0.9
-Llamarada	4.4	0.6
-Transporte	6.7	0.9
-Refinación	12.6	1.7
-Generación	4.8	0.6
Fuga de metano	0.3	0.0
Total	742.1	100.0

3. Emisiones de Ciclo de Vida de centrales de aprovechamiento de gas natural

	gCO₂eq/kWh	Porcentaje (%)
Combustión del combustible	477.9	78.7
Construcción	2.9	0.5
Operación de la planta	117.7	19.4
-Producción de Gas Natural		
-Combustible	67.6	11.1
-CO₂ en gas crudo	26.2	4.3
-Transporte	19.4	3.2
-Generación	4.5	0.7
Fuga de metano	9.1	1.5
-Producción de Gas Natural	9.1	1.5
Total	607.6	100.0

4. Emisiones de Ciclo de Vida de centrales de aprovechamiento de ciclo combinado

	gCO₂eq/kWh	Porcentaje (%)
Combustión del combustible	407.5	78.5
Construcción	2.7	0.5
Operación de la planta	100.9	19.5
-Producción de Gas Natural		
-Combustible	57.7	11.1
-CO₂ en gas crudo	22.3	4.3
-Transporte	16.5	3.2
-Generación	4.5	0.9
Fuga de metano	7.7	1.5
-Producción de Gas Natural	7.7	1.5
Total	518.8	100.0

5. Emisiones de Ciclo de Vida de centrales de aprovechamiento de energía nuclear

	Caso base	
	gCO ₂ eq/kWh	Porcentaje (%)
Construcción	2.8	11.7
Operación de la planta	20.9	86.6
-Minería y molienda	1.1	4.5
-Conversión	0.2	0.9
-Enriquecimiento	15.0	61.9
-Fabricación de combustible	0.7	2.8
-Reprocesamiento	-	-
-Fabricación de combustible reciclado (MOX)	-	-
-Transporte	0.0	0.2
-Generación	3.2	13.1
-Almacenamiento de combustible gastado	0.7	2.9
-Transporte y disposición de desperdicios de baja radiactividad	0.1	0.3
-Almacenamiento y disposición de desperdicios de alta radiactividad	-	-
Desmantelamiento	0.4	1.8
Total	24.2	100.0

	Caso de reciclaje	
	gCO ₂ eq/kWh	Porcentaje (%)
Construcción	3.2	14.3
Operación de la planta	18.5	83.7
-Minería y molienda	0.9	4.0
-Conversión	0.2	0.9
-Enriquecimiento	12.4	55.8
-Fabricación de combustible	0.6	2.8
-Reprocesamiento	0.7	3.2
-Fabricación de combustible reciclado (MOX)	0.0	0.2
-Transporte	0.0	0.2
-Generación	3.2	14.3

-Almacenamiento de combustible gastado	0.2	1.0
-Transporte y disposición de desperdicios de baja radiactividad	0.1	0.4
-Almacenamiento y disposición de desperdicios de alta radiactividad	0.2	1.0
Desmantelamiento	0.5	2.0
Total	22.2	100.0

6. Emisiones de Ciclo de Vida de centrales de aprovechamiento hidrológicas

	gCO₂eq/kWh	Porcentaje (%)
Construcción	9.3	82.8
-Maquinaria	0.9	8.0
-Presa	0.5	4.5
-Compuerta	4.5	39.8
-Otros cimientos	2.4	21.0
-Construcción del sitio	1.1	9.6
Operación	1.9	17.2
Total	11.3	100.0

7. Emisiones de Ciclo de Vida de centrales de aprovechamiento de energía geotérmica

	gCO₂eq/kWh	Porcentaje (%)
Construcción	5.3	35.3
-Cimientos	2.0	13.2
-Maquinaria	3.2	21.2
-Exploración	0.1	0.9
Operación	9.7	64.7
-Perforación de pozos adicionales	2.9	19.6
-Mantenimiento general	2.3	15.1
-Cambio de equipos	4.5	30.0
Total	15.0	100.0

8. Emisiones de Ciclo de Vida de centrales de aprovechamiento de energía eólica

	gCO₂eq/kWh	Porcentaje (%)
Construcción	21.2	71.9
-Cimientos	7.4	25.1
-Hélices	1.4	4.8
-Góndola	5.9	20.0
-Torre	3.4	11.7
-Turbina	3.0	10.3
Operación	8.3	28.1
Total	29.5	100.0

9. Emisiones de Ciclo de Vida de centrales de aprovechamiento de energía solar

	gCO₂eq/kWh	Porcentaje (%)
Construcción	41.1	76.9
-Panel o célula	28.3	53.0
-Soportes	9.8	18.3
-Otros	3.0	5.6
Operación	12.3	23.1
Total	53.4	100.0

Apéndice 6

Datos de la evolución de generación eléctrica en GWh, 1990-2030.

AÑO	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
TERMOELÉCTRICA CONVENCIONAL	66,916	70,328	69,829	68,339	77,023	68,948	74,805	82,102	86,206	85,104
CARBOELÉCTRICA	7,774	8,077	8,318	10,500	13,037	14,479	17,735	17,575	17,956	18,251
DUAL	0	0	0	2,148	7,770	6,053	2,775	7,001	12,692	11,234
TURBOGAS	669	659	281	277	456	364	440	657	1,088	2,077
COMBUSTIÓN INTERNA	80	186	237	277	249	455	419	460	314	382
CICLO COMBINADO	7,487	7,748	7,214	7,981	9,099	10,399	10,661	11,233	13,184	15,526
HIDROELÉCTRICA	23,338	21,737	26,095	26,235	20,048	27,528	31,442	26,430	24,616	32,714
GEOTÉRMICA	5,124	5,435	5,804	5,877	5,598	5,669	5,729	5,466	5,657	5,623
EÓLICA	0	0	0	0	4	6	5	4	5	6
NUCLEOELÉCTRICA	2,937	4,242	3,919	4,931	4,239	8,443	7,878	10,456	9,265	10,002
TOTAL	114,325	118,412	121,697	126,565	137,523	142,344	151,889	161,384	170,983	180,919

AÑO	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
TERMOELÉCTRICA CONVENCIONAL	82,800	78,316	73,807	69,348	66,334	65,077	51,931	49,482	43,325	43,112
CARBOELÉCTRICA	18,696	18,567	16,152	16,681	17,883	18,380	17,931	18,101	17,789	16,886
DUAL	10,404	9,574	8,744	7,914	7,915	14,275	13,875	13,375	6,883	12,299
TURBOGAS	3,280	3,244	3,589	3,703	2,536	1,603	1,783	2,854	3,027	3,732
COMBUSTIÓN INTERNA	498	614	730	846	845	534	594	951	1,009	1,244
CICLO COMBINADO	29,976	43,505	57,306	67,534	70,652	71,569	89,548	101,049	106,056	112,265
HIDROELÉCTRICA	33,075	28,435	24,862	19,754	25,076	27,611	30,305	27,042	38,892	26,445
GEOTÉRMICA	5,901	5,567	5,398	6,282	6,577	7,299	6,685	7,404	7,056	6,740

EÓLICA	8	7	7	5	6	5	45	284	255	249
NUCLEOELÉCTRICA	8,221	8,726	9,747	10,502	9,194	10,805	10,866	10,421	9,804	10,501
TOTAL	192,859	196,555	200,342	202,569	207,019	217,159	223,564	230,963	234,096	233,472

AÑO	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
TERMOELÉCTRICA CONVENCIONAL	40,570	47,869	53,918	47,167	33,481	19,337	5,195	2,303	217	0
CARBOELÉCTRICA DUAL	16,485	18,158	17,724	16,044	17,446	28,074	38,711	38,427	30,169	7,708
TURBOGAS	15,578	15,396	16,234	15,584	16,167	0	0	0	0	0
COMBUSTIÓN INTERNA CICLO COMBINADO	3,479	3,943	5,525	4,006	3,258	5,726	8,193	3,454	120	406
HIDROELÉCTRICA	1,160	1,314	1,842	1,335	1,086	1,199	1,312	1,184	832	120
GEOTÉRMICA	114,818	118,455	117,606	126,583	130,907	149,500	168,092	177,480	192,526	218,471
EÓLICA	36,739	35,796	31,317	27,444	38,145	36,149	34,154	34,109	34,813	34,893
NUCLEOELÉCTRICA	6,619	6,507	5,817	6,070	6,000	6,302	6,604	6,638	6,688	6,748
LECHO FLUIDIZADO	166	357	1,744	1,814	2,077	6,299	10,521	13,109	15,763	21,480
SOLAR FOTOVOLTAICA	5,879	10,089	8,770	11,800	9,677	10,198	10,718	11,062	11,062	11,062
TERMOELÉCTRICA CONVENCIONAL	0	0	0	0	0	0	4,175	4,163	4,163	4,163
TERMOELÉCTRICA CONVENCIONAL	0	0	2	13	13	285	557	2,713	4,535	6,350
TERMOELÉCTRICA CONVENCIONAL	0	0	0	0	0	0	19	27	27	27
TERMOELÉCTRICA CONVENCIONAL	0	0	0	0	0	0	276	258	278	335
TOTAL	241,491	257,884	260,498	257,860	258,256	263,068	288,527	294,927	301,193	311,763

AÑO	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
TERMOELÉCTRICA CONVENCIONAL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CARBOELÉCTRICA	274	96	276	94	182	247	171	1,382	279	847	978
TURBOGAS	341	326	340	477	534	643	493	509	633	805	940
COMBUSTIÓN INTERNA	64	51	51	103	163	241	121	0	0	5	23

CICLO COMBINADO	223,189	223,783	225,378	214,702	211,042	217,743	225,307	231,801	241,179	249,886	257,649
HIDROELÉCTRICA	34,989	36,843	44,123	46,129	49,286	49,151	49,902	49,902	50,039	49,902	49,902
GEOTÉRMICA	8,599	10,304	10,772	11,154	11,476	11,628	12,018	12,464	12,498	12,464	12,464
EÓLICA	27,753	30,759	30,759	30,759	34,659	39,673	43,716	47,366	47,495	47,366	47,366
NUCLEOELÉCTRICA	11,092	11,062	11,062	11,062	11,092	11,062	11,062	11,062	20,406	29,639	38,928
LECHO FLUIDIZADO	4,175	4,163	4,163	4,163	4,175	4,163	4,163	4,163	4,175	4,163	4,163
SOLAR											
FOTOVOLTAICA	6,571	6,733	6,915	7,107	7,333	8,878	10,585	12,151	12,376	12,519	12,697
TERMOSOLAR	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
BIOENERGÍA	258	257	301	388	469	493	493	900	472	279	257
TOTAL	317,332	324,404	334,167	326,165	330,438	343,949	358,058	371,727	389,579	407,902	425,395

Datos de la evolución de las emisiones de GEI del sector eléctrico mexicano en miles de toneladas de CO₂ equivalente, 1990-2030.

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
CICLO COMBINADO	3,884	4,020	3,743	4,141	4,721	5,395	5,531	5,828	6,840	8,055
TERMOELÉCTRICA CONVENCIONAL	49,658	52,190	51,820	50,714	57,159	51,166	55,513	60,928	63,973	63,156
CARBOELÉCTRICA	7,581	7,877	8,112	10,240	12,714	14,120	17,295	17,139	17,511	17,798
TURBOGÁS	406	400	171	168	277	221	267	399	661	1,262
COMBUSTIÓN INTERNA DUAL	54	126	160	187	168	307	283	310	212	258
HIDROELÉCTRICA	0	0	0	1,647	5,958	4,641	2,128	5,368	9,732	8,614
EÓLICA	264	246	295	296	227	311	355	299	278	370
GEOTÉRMICA	0	0	0	0	0.118	0.177	0.148	0.118	0.148	0.177
NUCLEOELÉCTRICA	77	82	87	88	84	85	86	82	85	84
TOTAL	71	103	95	119	103	204	191	253	224	242
TOTAL	61,996	65,043	64,482	67,601	81,409	76,451	81,649	90,606	99,516	99,839

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
CICLO COMBINADO	15,552	22,570	29,730	35,037	36,654	37,130	46,457	52,424	55,022	58,243
TERMOELÉCTRICA CONVENCIONAL	61,446	58,118	54,772	51,463	49,227	48,294	38,538	36,721	32,152	31,993
CARBOELÉCTRICA	18,232	18,107	15,751	16,267	17,440	17,924	17,487	17,652	17,348	16,467
TURBOGÁS	1,993	1,971	2,180	2,250	1,626	1,028	1,143	1,830	1,941	2,393
COMBUSTIÓN INTERNA	336	414	493	571	542	343	381	610	647	798
DUAL	7,977	7,341	6,704	6,068	6,069	10,945	10,639	10,255	5,278	9,430
HIDROELÉCTRICA	374	321	281	223	283	312	342	306	439	299
EÓLICA	0.236	0.207	0.207	0.148	0.180	0.148	1	8	8	7
GEOTÉRMICA	89	84	81	94	99	109	100	111	106	101
NUCLEOELÉCTRICA	199	211	236	254	222	261	263	252	237	254
TOTAL	106,197	109,137	110,229	112,228	112,162	116,347	115,352	120,169	113,177	119,985
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
CICLO COMBINADO	59,567	61,454	61,014	65,671	67,915	77,560	87,206	92,077	99,882	113,343
TERMOELÉCTRICA CONVENCIONAL	30,107	35,524	40,012	35,002	24,846	14,350	3,855	1,709	161	0
CARBOELÉCTRICA	16,076	17,708	17,285	15,646	17,013	27,377	37,751	37,474	29,421	7,517
TURBOGÁS	2,231	2,528	3,543	2,569	2,089	3,479	4,978	2,099	73	247
COMBUSTIÓN INTERNA	744	843	1,181	856	696	809	885	799	561	81
LECHO FLUIDIZADO	0	0	0	0	0	0	3,994	3,982	3,982	3,982
DUAL	11,944	11,805	12,447	11,949	12,396	0	0	0	0	0
HIDROELÉCTRICA	415	404	354	310	431	408	310	387	465	634
EÓLICA	5	11	51	54	61	186	99	100	100	101
GEOTÉRMICA	99	98	87	91	90	95	30	145	242	339
SOLAR FOTOVOLTAICA	0	0	0.112	1	1	15	1	1	1	1

TERMOSOLAR	0	0	0	0	0	0	0	275	282	284	287
NUCLEOELÉCTRICA	142	244	212	286	234	247	259	259	268	268	268
BIOENERGÍA	0	0	0	0	0	0	0	16	15	16	19
TOTAL	121,330	130,618	136,187	132,435	125,772	124,527	139,496	139,158	135,283	126,639	

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
CICLO COMBINADO	115,790	116,099	116,926	111,387	109,489	112,965	116,889	120,258	125,124	129,641	133,668
TERMOELÉCTRICA CONVENCIONAL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CARBOELÉCTRICA	267	94	269	92	177	241	167	1,348	272	826	954
TURBOGÁS	207	198	207	290	324	391	300	309	385	489	571
COMBUSTIÓN INTERNA	43	34	34	70	110	163	82	0	0	3	16
LECHO FLUIDIZADO	3,994	3,982	3,982	3,982	3,994	3,982	3,982	3,982	3,994	3,982	3,982
HIDROELÉCTRICA	819	907	907	907	1,022	1,170	1,290	1,397	1,401	1,397	1,397
EÓLICA	129	155	162	167	172	174	180	187	187	187	187
GEOTÉRMICA	351	360	369	380	392	474	565	649	661	669	678
SOLAR FOTOVOLTAICA	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
TERMOSOLAR	283	282	285	290	295	296	296	319	521	733	957
NUCLEOELÉCTRICA	268	268	268	268	268	268	268	268	494	717	942
BIOENERGÍA	15	15	17	22	27	28	28	51	27	16	15
TOTAL	121,997	122,246	123,357	117,797	116,239	120,117	124,020	128,696	132,590	137,760	142,019