



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Producción de hidrógeno mediante
tecnología nuclear, un escenario sostenible
en México**

T E S I S

QUE PARA OBTENER POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

CAMPO DEL CONOCIMIENTO EN ENERGÍA

P R E S E N T A

ENRIQUE ORTEGA VALENCIA

Director de tesis:

DR. JUAN LUIS FRANÇOIS LACOUTURE



MÉXICO, D. F. 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. José Luis Fernández Zayas

Secretario: Dr. Juan Luis Francois Lacouture

Vocal: Dra. Cecilia Martín Del Campo Márquez

1^{er}. Suplente: M. en C. Rubén Oretga Carmona

2^{do}. Suplente: Dr. Pablo Álvarez Watkins

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Facultad de Ingeniería

TUTOR DE TESIS:

Dr. Juan Luis Francois Lacouture

FIRMA

INDICE

Resumen.....	1
Introducción.....	2
Capítulo I. Ciclos de de producción de hidrógeno.....	6
1.1. Procesos convencionales de producción de hidrógeno	7
1.1.1. Reformado de gas natural	8
1.1.1.1. Autoreformado de gas natural (SMR)	10
1.1.1.2. Reformado de gas natural con energía nuclear como fuente de energía primaria (<i>Nuclear-SMR</i>)	11
1.1.1.2.1. Introducción al reactor de alta temperatura (HTTR)	11
1.1.1.2.2. Principios básicos del HTTR	12
1.1.1.2.3. Sistema de apagado del reactor	13
1.1.1.2.4. Sistema de remoción del calor residual	13
1.1.1.2.5. Características de la planta del HTTR	13
1.1.1.2.6. El sistema de enfriamiento	15
1.1.1.2.7. Sistema de enfriamiento primario	16
1.1.1.2.8. Intercambiador de calor intermedio (He/He)	17
1.1.1.2.9. Impacto ambiental asociado a la operación del reactor	18
1.1.1.2.10. Descripción del proceso de reformado de gas natural utilizando energía nuclear como fuente de energía primaria	20
1.1.2. Gasificación de carbón	20
1.1.3. Fractura de agua por medio de electrólisis de baja temperatura	21
1.1.4. Los ciclos termoquímicos, Termociclos	23
1.1.4.1. El ciclo yodo-azufre	23
1.1.5. Producción de hidrógeno a partir de biomasa por medio de procesos fotovoltaicos (<i>Biomasa-Solar</i>)	25
1.1.5.1. Conversión de biomasa	25
Referencias	26
Capítulo II. Metodología del desarrollo sostenible	27
2.1. Indicadores energéticos para el desarrollo sostenible	28
2.2. Introducción	28
2.3. Dimensiones del Desarrollo Sostenible	29
2.3.1. Dimensión Social	29
2.3.2. Dimensión Económica	30
2.3.3. Dimensión Ambiental	31
2.3.4. Dimensión Política	32
2.4. Metodología	32
2.4.1. Desarrollo de la Metodología	32
2.4.1.1. Estandarización de datos	33
2.4.1.2. Calificación global de los ciclos de combustible	34
2.4.1.3. Construcción de escenarios	34
2.4.1.4. Análisis de sensibilidad	35
2.4.1.4.1. Escenario captura de CO ₂	36
2.4.1.4.2. El escenario “World Energy Outlook”	36

2.5. Descripción de los indicadores	38
Referencias	48
Capítulo III. Recopilación de datos	49
3.1 Números calculados	50
3.1.1. Balances de Masa	50
3.1.2. Análisis de grados de libertad	53
3.1.3. EL PROCESO <i>SMR</i>	54
3.1.4. Cálculo de las emisiones totales	58
3.2 Recopilación de datos	60
3.2.1. SOCI. Consumo energético per capita	60
3.2.2. SOC2. Fatalidades por energía producida y por tipo de combustible	61
3.2.3. ECO1. Eficiencia en la producción de hidrógeno por tipo de energía primaria	62
3.2.4. ECO2. Costo de generación energético unitario por combustible	63
3.2.5. ECO3. Años de reserva de combustible primario	64
3.2.6_ AMB1. Emisiones de gases de CO ₂ provenientes de los ciclos de producción de hidrógeno por GJ de energía primaria	65
3.2.7. AMB2. Emisiones de óxidos de azufre SO _x provenientes de los ciclos de producción de hidrógeno por GJ de energía primaria	66
3.2.8. AMB3. Emisiones de NO _x provenientes de los ciclos de producción de hidrógeno por GJ de energía primaria	67
3.2.9. AMB4. Generación de desechos sólidos por ciclo de combustible	68
3.2.10. AMB5. Producción de desechos radioactivos por generación energética unitaria	69
3.2.11. AMB6. Densidad de potencia energética	70
Referencias	71
Capítulo IV. Resultados	72
4.1. Escenario base	73
4.1.1. Análisis de resultados	73
4.1.1.1. Caso base	73
4.1.1.2. Caso social	74
4.1.1.3. Caso Económico	74
4.1.1.4. Caso ambiental	75
4.2. Escenario Captura de dióxido de carbono	75
4.2.1. Análisis de resultados	76
4.2.1.1. Caso base	76
4.2.1.2. Caso social	76
4.2.1.3. Caso económico	77
4.2.1.4. Caso ambiental	77
4.3. Escenario Outlook 2020	78
4.3.1. Análisis de resultados	78
4.3.1.1. Caso base	78
4.3.1.2. Caso social	79
4.3.1.3. Caso económico	79

4.3.1.4.Caso ambiental	80
4.4.Escenario Outlook 2030	80
4.4.1. Análisis de resultados	81
4.4.1.1.Caso base	81
4.4.1.2.Caso social	81
4.4.1.3.Caso económico	82
4.4.1.4.Caso ambiental	82
Conclusiones	83
Apéndices	87
A. Energía Nuclear	88
B. Gas Natural	92
C. Carbón	96
D. Energía Eólica	100
E. Biomasa	102

Índice de figuras

Figura 1. Ciclos convencionales de combustible para la producción de hidrógeno	7
Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de reformado de gas natural	9
Figura 3. Diagrama de flujo de procesos del reformado de gas natural	10
Figura 4. Arreglo de la planta del HTTR	14
Figura 5. Diagrama de flujo del proceso de generación de energía nuclear por medio del HTTR	15
Figura 6. Diagrama de flujo del proceso acoplado del proceso SMR y el reactor nuclear de alta temperatura	20
Figura 7. Diagrama de una celda de electrólisis de baja temperatura	22
Figura 8. Diagrama de flujo del proceso de termociclos que utiliza energía nuclear como fuente de energía primaria	24
Figura 9. Diagrama de bloques de la metodología de desarrollo sostenible	33
Figura 10. Descripción del cálculo de emisiones para los ciclos de combustible para la producción de hidrógeno	55
Figura 11. Gráfico del indicador SOC1	60
Figura 12. Gráfico del indicador SOC2	61
Figura 13. Gráfico del indicador ECO1	62
Figura 14. Gráfico del indicador ECO2	63
Figura 15. Gráfico del indicador ECO3	64
Figura 16. Gráfico del indicador AMB1	65
Figura 17. Gráfico del indicador AMB2	66
Figura 18. Gráfico del indicador AMB3	67
Figura 19. Gráfico del indicador AMB4	68
Figura 20. Gráfico del indicador AMB5	69
Figura 21. Gráfico del indicador AMB6	70
Figura 22. Gráfica de resultados para el escenario base	73
Figura 23. Gráfica de resultados para el escenario social	74
Figura 24. Gráfica de resultados para el escenario económico	74
Figura 25. Gráfica de resultados para el escenario ambiental	75
Figura 26. Gráfica de resultados para el escenario captura de dióxido de carbono, caso base	76
Figura 27. Gráfica de resultados para el escenario captura de dióxido de carbono, caso social	76
Figura 28. Gráfica de resultados para el escenario captura de dióxido de carbono, caso económico	77
Figura 29. Gráfica de resultados para el escenario captura de dióxido de carbono, caso ambiental	77
Figura 30. Gráfica de resultados para el escenario Outlook 2020, caso base	78
Figura 31. Gráfica de resultados para el escenario Outlook 2020, caso social	79
Figura 32. Gráfica de resultados para el escenario Outlook 2020, caso económico	79
Figura 33. Gráfica de resultados para el escenario Outlook 2020, caso ambiental	80
Figura 34. Gráfica de resultados para el escenario Outlook 2030, caso base	81
Figura 35. Gráfica de resultados para el escenario Outlook 2030, caso social	81
Figura 36. Gráfica de resultados para el escenario Outlook 2030, caso económico	82

Figura 37. Gráfica de resultados para el escenario Outlook 2030, caso ambiental	82
Figura 38. Ciclo de combustible de los procesos que utilizan energía nuclear	88
Figura 39. Ciclo de combustible de los procesos que utilizan gas natural	92
Figura 40. Ciclo de combustible de los procesos que utilizan carbón	96
Figura 41. Ciclo de combustible de los procesos que utilizan energía eólica	100
Figura 42. Ciclo de combustible de los procesos que utilizan biomasa	102

Índice de tablas

Tabla 1. Requerimientos del proceso de reformado de gas natural	10
Tabla 2. Características generales del HTTR	13
Tabla 3. Resumen de las condiciones de operación del HTTR	14
Tabla 4. Características de operación del intercambiador de calor en “U” de la planta del HTTR	17
Tabla 5. Características de operación del intercambiador de calor IHX de la planta del HTTR	18
Tabla 6. Inventario de grafito activado de acuerdo a la operación anual de un reactor HTGR	18
Tabla 7. Material metálico irradiado durante la operación de un HTGR	19
Tabla 8. Inventario de desechos anuales de la operación de un reactor típico de alta	19
Tabla 9. Indicadores del desarrollo sostenible de la dimensión social	29
Tabla 10. Indicadores del desarrollo sostenible de la dimensión económica	30
Tabla 11. Indicadores del desarrollo sostenible de la dimensión ambiental	32
Tabla 12. Tasas de crecimiento de las fuentes de energía primaria en México “ <i>World Energy Outlook</i> ”	37
Tabla 13. Proyecciones del 2020 y 2030 para las fuentes de energía primaria en México	37
Tabla 14. Descripción del indicador SOC1	38
Tabla 15. Descripción del indicador SOC2	39
Tabla 16. Descripción del indicador ECO1	40
Tabla 17. Descripción del indicador ECO2	41
Tabla 18. Descripción del indicador ECO3	41
Tabla 19. Descripción del indicador AMB1	42
Tabla 20. Descripción del indicador AMB2	43
Tabla 21. Descripción del indicador AMB3	44
Tabla 22. Descripción del indicador AMB4	45
Tabla 23. Descripción del indicador AMB4	45
Tabla 24. Descripción del indicador AMB5	46
Tabla 25. Descripción de la tabla de análisis de grados de libertad	53
Tabla 26. Entalpías de formación	56
Tabla 27. Constantes para el cálculo de calores específico	57
Tabla 28. Balance de masa y energía para el proceso SMR	58
Tabla 29. Datos técnicos de los procesos SMR	59
Tabla 30. Resumen de las emisiones a la atmosféricas provenientes de los ciclos	

de combustible SMR	59
Tabla 31. Reporte de resultados para el indicador SOC1	60
Tabla 32. Reporte de resultados para el indicador SOC2	61
Tabla 33. Reporte de resultados para el indicador ECO1	62
Tabla 34. Reporte de resultados para el indicador ECO2	63
Tabla 35. Reporte de resultados para el indicador ECO3	64
Tabla 36. Reporte de resultados para el indicador AMB1	65
Tabla 37. Reporte de resultados para el indicador AMB2	66
Tabla 38. Reporte de resultados para el indicador AMB3.....	67
Tabla 39. Reporte de resultados para el indicador AMB4	68
Tabla 40. Reporte de resultados para el indicador AMB5	69
Tabla 41. Reporte de resultados para el indicador AMB6	70
Tabla 42. Resultados obtenidos de los ciclos de producción de hidrógeno para el escenario base	73
Tabla 43. Resultados obtenidos de los ciclos de producción de hidrógeno para el escenario reducción en los costos de captura	75
Tabla 44. Resultados obtenidos de los ciclos de producción de hidrógeno para el escenario Outlook 2020	78
Tabla 45. Resultados obtenidos de los ciclos de producción de hidrógeno para el escenario Outlook 2030	80
Tabla 46. Etapas del ciclo de combustible nuclear	90
Tabla 47. Externalidades asociadas del ciclo de combustible nuclear	91
Tabla 48. Etapas del ciclo del gas natural	94
Tabla 49. Externalidades asociadas del ciclo de combustible del gas natural	95
Tabla 50. Etapas del ciclo del carbón	97
Tabla 51. Externalidades asociadas del ciclo del carbón	99
Tabla 52. Descripción del parque eólico considerado para el estudio de las externalidades asociadas al ciclo de combustible	101
Tabla 53. Descripción de las externalidades asociadas al ciclo de combustible	101
Tabla 54. Etapas del ciclo de la biomasa	103
Tabla 55. Externalidades asociadas del ciclo de combustible de la biomasa	106

RESUMEN

La energía es un punto clave en el desarrollo social y económico de un país, por tal motivo asegurar el suministro energético en México es de vital importancia. El hidrógeno es sin duda alguna uno de los combustibles alternos más prometedores ante la visible necesidad de descentralizar la producción energética basada en hidrocarburos. La versatilidad de sus aplicaciones, su alto poder calorífico y la posibilidad de contar con un ciclo de combustible limpio, son sólo algunos ejemplos de su potencial de desarrollo. Sin embargo el elemento más abundante del universo no se encuentra en su forma elemental en nuestro planeta, forma moléculas –como en los hidrocarburos ó agua- y para su utilización debe extraerse. En la actualidad se conocen diferentes métodos para la obtención de hidrógeno, hay térmicos, eléctricos, químicos, fotovoltaicos entre otros. La elección del método de producción y la fuente de energía primaria para llevarla a cabo es decisiva para juzgar la sostenibilidad del ciclo de combustible del hidrógeno. El desarrollo sostenible está definido como aquél que cubre las necesidades presentes sin comprometer la necesidad de cubrir las necesidades de las futuras generaciones, y en el marco de esta definición fueron evaluados los indicadores del desarrollo sostenible de los diferentes ciclos de combustible en la producción de hidrógeno en México. Estos indicadores toman en consideración los factores sociales, económicos y ambientales. En esta tesis se estudiaron algunos procesos para la generación de hidrógeno, los que utilizan carbón, gas natural, energía hidráulica, eólica, geotérmica, biomasa, solar y nuclear, como fuentes de energía primaria. Y fueron elaborados análisis de sensibilidad basados en la reducción de los costos de los procesos de captura de CO₂ y en proyecciones elaboradas por la Agencia Internacional de Energía, acerca del suministro de energía primaria en México para los años 2020 y 2030. Los resultados obtenidos reflejan que la tecnología mejor evaluada por medio de los indicadores del desarrollo sostenible, estudiados en la metodología desarrollada en esta tesis, es el ciclo de producción de hidrógeno basado en la reformación de gas natural que utiliza energía nuclear como fuente de energía primaria. Para el caso social, el ciclo de combustible mejor evaluado es la electrólisis que utiliza como fuente de energía la electricidad generada por las centrales hidroeléctricas. En el caso económico, la tecnología mejor evaluada es el reformado de gas natural con energía nuclear, y por último, en el caso ambiental, el ciclo de combustible mejor calificado es el proceso de los ciclos termoquímicos basados en la descomposición de los ácidos sulfúrico y yodhídrico, con energía nuclear como fuente primaria de energía. Para el análisis de sensibilidad, fueron estudiados los escenarios “Outlook 2020 y 2030”. En estos escenarios se consideraron las tasas de crecimiento en el suministro de energía primaria en México, para cada una de las fuentes primarias de energía de producción de hidrógeno. En un caso base -en donde todos los indicadores tienen pesos equivalentes- y en el caso ambiental, la tecnología mejor calificada es la electrólisis que utiliza energía eléctrica proveniente de un parque eólico. Cuando la dimensión económica fue la prioridad, el proceso de reformado de gas con energía nuclear es el ciclo mejor calificado. Y cuando la dimensión social fue de primordial interés, la electrólisis que utiliza energía eléctrica proveniente de una central hidroeléctrica es la tecnología mejor calificada.

INTRODUCCION

La evaluación de los sistemas energéticos por medio de indicadores del desarrollo sostenible inició con la publicación del reporte Brundtland en 1987, diversas organizaciones nacionales e internacionales han desarrollado un conjunto de indicadores para medir uno o más aspectos del desarrollo sostenible. Estos esfuerzos se incrementaron en 1992 cuando se creó la Agenda 21, en donde varias naciones y organizaciones gubernamentales y no gubernamentales se unieron para desarrollar el concepto de indicadores del desarrollo sostenible.

En respuesta a las decisiones hechas por Naciones Unidas (UN), la Comisión sobre el Desarrollo Sostenible (CSD) y el capítulo 40 de la Agenda 21, en 1955 el Departamento de las Naciones Unidas para Asuntos Sociales y Económicos (UNDESA) iniciaron un trabajo para obtener un conjunto de indicadores para el Desarrollo Sostenible.

El trabajo inicial de los indicadores energéticos lo hizo la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) con contribuciones de UNDESA, la Agencia Internacional de Energía (IEA) y otras organizaciones nacionales e internacionales presentaron en la novena sesión de la Comisión del Desarrollo Sostenible (CSD-9) en 2001, el proyecto “Indicadores para el Desarrollo Energético Sostenible” (ISED). Durante esta sesión la energía fue el tema central. Los temas abordados en esta sesión también fueron la accesibilidad y el poder de adquisición de los servicios de energía moderna de las sociedades rurales y en algunas ciudades urbanizadas. La disseminación de información sobre tecnologías eficientes y limpias, la buena práctica y las políticas adecuadas fueron reconocidas como una importante contribución para proveer energía para el Desarrollo Sostenible. La comunidad internacional notó la información relevante que guiaría las decisiones de mercado para una política sostenible y las opciones energéticas alternativas. Las decisiones tomadas en la CSD-9 permitieron refinar los ISED, incluyendo la identificación de tópicos energéticos claves de accesibilidad, eficiencia energética, energías renovables, tecnologías avanzadas para fósiles, tecnologías energéticas nucleares, energía rural y transporte.

La energía se discutió también en los siguientes años en la Cumbre Mundial del Desarrollo Sostenible (WSSD) basándose en Johannesburgo. La comunidad internacional basándose en la CSD-9 reconoció que la accesibilidad de energía como un tema de primordial importancia de las Metas del Desarrollo del Milenio “tener una proporción en la equidad social” hacia el año 2015. La WSSD agregó la factibilidad en el acceso energético para las comunidades con alto índice de pobreza con el objeto de hacer equitativas las oportunidades de desarrollo, basándose en una política nacional del desarrollo sostenible.

El primordial objetivo de la producción energética es alcanzar altos estándares de vida, una economía sólida y un ambiente limpio. No toda energía –carbón, solar, nuclear, eólica o alguna otra- es buena o mala por sí misma, y cada una de ellas es válida para alcanzar un objetivo ó fin.

Durante muchos años la problemática global fue producir energía sin estudiar las externalidades que serían asociadas a quemar de forma irracional hidrocarburos, hasta llegar al punto de alterar nuestro ecosistema y poner en riesgo nuestra salud. Aunado a los

cambios climáticos que se han llevado a cabo en nuestro planeta, hemos sido testigos de los grandes problemas que han conllevado la centralización de energéticos, entre otros la inestabilidad económica de los precios y las crisis económicas.

Adecuar y comparar las tecnologías energéticas utilizadas ha sido clave para el desarrollo económico y la industria. La energía es un punto central en el bienestar social y económico, además es indispensable para la actividad comercial e industrial.

Muchas de las energías comúnmente usadas están basadas en recursos limitados de combustibles fósiles, esto se considera ambientalmente no sostenible. No hay energía de producción o tecnología de conversión fuera del riesgo o libre de desperdicios. Algunas de las tecnologías no emiten sustancias de riesgo ambiental en su uso, pero emisiones y desperdicios pueden estar asociados con su manufactura u otras partes en su ciclo de vida. La quema de combustibles fósiles es responsable de la contaminación del aire urbano, la acidificación regional y el riesgo de los cambios climáticos inducidos por el hombre. El uso de la energía nuclear ha creado también problemas, como la disposición de desperdicios de alto nivel radiológico y la proliferación de armas nucleares. El uso no comercial de biomasa en algunas ciudades desarrolladas contribuye a la desertificación y pérdida de la biodiversidad.

El estudio de todos los factores que se encuentran inmersos dentro de una elección de una fuente energética es clave para satisfacer nuestras necesidades y al mismo tiempo procurar un ambiente saludable que nos permita vivir y facilitar las condiciones de vida de nuestras futuras generaciones. El concepto de desarrollo sostenible nos permite estudiar los factores que nos permitirán alcanzar este crecimiento armónico.

El desarrollo sostenible ha sido bien definido por la Comisión Brundtlan, como “el desarrollo que cubre las necesidades presentes sin comprometer la habilidad de cubrir las necesidades de las futuras generaciones”.

De forma clara podemos visualizar los factores que se encuentran inmersos dentro de este concepto; el factor social es el más claro porque obviamente nosotros somos el punto central; el factor ambiental, porque es indudable que un ambiente limpio es necesario para propiciar una buena condición de vida para las futuras generaciones; el factor económico, porque es indudable que una tecnología energética cara es inaccesible para la sociedad; el factor político, porque la planeación institucional es necesaria para llevar acciones globales; el factor filosófico por último, representa la base ideológica que sustenta toda acción. Encontrar un punto armónico entre los factores social, ambiental, económico, político y filosófico permitirá un crecimiento equilibrado y sano.

Para alcanzar el desarrollo sostenible en una escala global se requerirá el uso responsable de recursos, tecnologías, incentivos económicos especiales y planeación de una política estratégica a niveles locales y nacionales.

El Hidrógeno es uno de los combustibles alternos más prometedores, es ambientalmente limpio ya que produce agua como producto de combustión y termodinámicamente

eficiente. Sin embargo, el elemento más abundante del universo no se encuentra en su forma elemental en nuestro planeta, forma moléculas y para su utilización debe extraerse.

En la actualidad se conocen diferentes métodos para la producción de hidrógeno, hay eléctricos, caloríficos, químicos, fotovoltaicos entre otros. Los métodos industrialmente convencionales, son los eléctricos y caloríficos, que son representados por la electrólisis y el reformado de gas natural.

El método de electrólisis, consiste en fraccionar la molécula del agua por medio de una corriente eléctrica, la fuente energética primaria de este proceso es entonces la electricidad.

El método de reformado de gas, consiste en fracturar por medio de calor la molécula del gas natural (CH_4) para extraer de ella el hidrógeno, en este proceso la fuente energética primaria es el calor.

Es precisamente en la elección de las fuentes energéticas primarias en donde se juzga la sostenibilidad de la tecnología del hidrógeno, ya que como hemos citado la utilización del hidrógeno genera agua como producto final.

El objetivo de este trabajo de investigación es desarrollar una metodología basada en indicadores energéticos para evaluar la sostenibilidad de procesos convencionales de producción de Hidrógeno en México.

En esta tesis se estudiaron los procesos actualmente conocidos para la generación de hidrógeno, los que utilizan carbón, gas natural, energía hidráulica, eólica, geotérmica, biomasa, solar y nuclear, como fuentes de energía primaria.

La evaluación de estos sistemas energéticos en México se basó en datos del suministro de energía primaria reportados por la Secretaria de Energía, las proyecciones de los escenarios de los años 2020 y 2030 en estimaciones realizadas por la Agencia Internacional de Energía y las externalidades sociales-ambientales de los ciclos de combustible, provenientes de reportes de la Comunidad Europea.

En síntesis, en el presente trabajo se creó una metodología para evaluar el desarrollo sostenible de sistemas energéticos basada en metodologías elaboradas por organismos internacionales tales como la Agencia Internacional de Energía (IEA), la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA), el Departamento de Las Naciones Unidas para Asuntos Sociales y Económicos (UNDESA) y la Agencia Ambiental Europea (EEA), con la finalidad de evaluar diferentes tecnologías de producción de hidrógeno en México. La metodología está diseñada para evaluar ciclos de combustible, esto es, todas y cada una de las etapas de los procesos de producción de hidrógeno, desde la extracción de la fuente de energía primaria hasta las externalidades sociales y ambientales del proceso integral de conversión a hidrógeno.

Las tecnologías analizadas son los procesos de gasificación de carbón, reformado de gas natural, termociclos, electrolisis y biomasa. La descripción de estas tecnologías se

encuentra en el capítulo I. En este capítulo son mostradas las singularidades de cada uno de los procesos.

En el segundo capítulo se muestra la estructura de la metodología diseñada, se describen y justifican los indicadores seleccionados, así como la forma en que serán cuantificados y la bibliografía en donde podrán encontrarse. También en este capítulo se describen los casos y los escenarios analizados.

En el capítulo tercero, “Recopilación de Datos” se encuentra la información calculada y recabada de la bibliografía, para aplicarse en la metodología.

En el último capítulo se encuentran los resultados y el análisis de cada uno de los escenarios planteados en la metodología.

A manera de visualizar mejor la recopilación de datos obtenidos para los ciclos de producción de hidrógeno, en los apéndices son mostrados diagramas de flujo de estos ciclos, así como algunos datos referentes a externalidades ambientales y sociales, tal y como se obtuvieron de los reportes de una comisión europea que evalúa externalidades de ciclos de combustible, el Externe.

Capitulo I. Ciclos de de producción de hidrógeno

El hidrógeno es un energético secundario y puede producirse por una gran variedad de métodos, cada uno de ellos se caracteriza por la fuente de energía primaria utilizada para obtenerlo. Dentro de las fuentes primarias están incluidas la energía nuclear, las fuentes renovables como la biomasa, la energía solar, la eólica y la hidráulica, también se incluyen los recursos fósiles como el gas natural y el carbón. Las tecnologías de producción también representan una gran cantidad de alternativas, existen procesos químicos, biológicos, electrolíticos, fotolíticos y termoquímicos.

La elección del energético primario y la tecnología para producir hidrógeno están sujetas a parámetros como el costo del ciclo de combustible y las externalidades asociadas, como los impactos ambientales y sociales. A continuación, en la Figura 1 se ilustran las tecnologías convencionales utilizadas para producir hidrógeno.

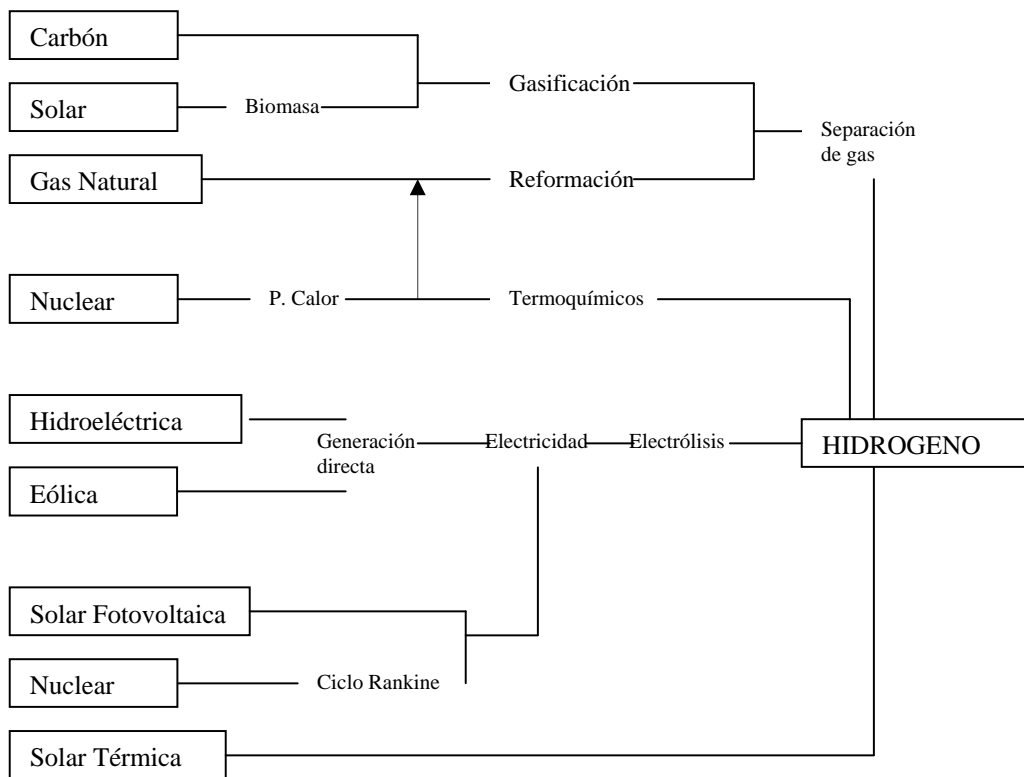


Figura 1. Ciclos convencionales de combustible para la producción de hidrógeno

1.1. Procesos convencionales de producción de hidrógeno

A continuación se presenta una descripción de los ciclos convencionales involucrados en la producción de hidrógeno.

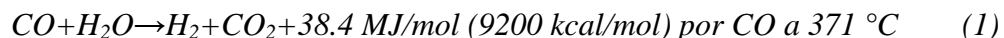
1.1.1. Reformado de gas natural [1]

En este proceso, los hidrocarburos alimentados son convertidos a gas de síntesis (CO , CO_2 , H_2) por una reacción del gas con un catalizador. Este proceso se opera usualmente entre $600\text{-}1000^\circ\text{C}$ a $0.79\text{-}4.93\text{ MPa}$ ($100\text{-}700\text{ psig}$), usando catalizadores a base de Níquel (Ni).

Debido a que la alimentación de hidrocarburos debía ser libre de Azufre, el proceso de desulfuración apareció como parte del proceso de reformación. El primer desulfurizador consiste en hacer pasar la alimentación del hidrocarburo por un catalizador de Co-Mo en presencia de 5% de Hidrógeno (H_2) para convertir el Azufre en Ácido Sulhídrico (H_2S). Los gases son enfriados y lavados con una solución de Monoetanolamina (MEA), para reducir el contenido de Azufre hasta 5 ppm por la absorción del catalizador de ZnO a una temperatura de $340\text{-}370^\circ\text{C}$.

Una vez desulfurizado, el gas puede pasarse al reformador primario. Este reformador es una cámara de calentamiento a fuego directo, que contiene múltiples tubos de una aleación basada en aleaciones de Níquel: HK 40 , Inconel 617 , Incoloy 800 . Estos tubos son normalmente de $108\text{ mm OD X }72\text{ mm ID}$. El catalizador contiene entre $16\text{-}20\%$ de Níquel, el Óxido de Níquel, generalmente se coloca sobre Aluminato de Calcio, Alumina o Titanato de Calcio. El reformador tiene una velocidad espacial VS (vol/hr^3) del orden de $5000\text{-}8000$, basada en la alimentación neta. La tasa de Vapor-Carbón está usualmente en el rango de $3.5\text{-}4.5$, la temperatura de salida del gas es de $870\text{-}885^\circ\text{C}$ y una presión de $2.34\text{-}2.51\text{ Mpa}$ ($325\text{-}350\text{ psig}$) para favorecer la reacción de reformación. La temperatura del gas de calentamiento es de $980\text{-}1040^\circ\text{C}$, en la sección del horno. En estas condiciones de operación la conversión de metano es de aproximadamente del 94% .

La composición de salida del gas del reformador es: 76% H_2 , 12% CO , 10% CO_2 y 1.3% de CH_4 . En la siguiente etapa, el CO es convertido a CO_2 e H_2 en el Convertidor Shift de acuerdo a la reacción (1):



Esta reacción se lleva a cabo con un catalizador de FeO sobre Cromo (Cr) a $340\text{-}455^\circ\text{C}$. Este catalizador comúnmente se coloca en forma de tabletas de $6\text{X}6\text{ mm}$ o de $9.5\text{X}9.5\text{ mm}$, en donde la velocidad espacial $\text{VS}=4000$. Los gases obtenidos son enfriados fuera del reactor para producir vapor de agua en un intercambiador de calor y son regresados al Convertidor Shift a una temperatura aproximada a $200\text{-}215^\circ\text{C}$, para completar la reacción a baja temperatura en el Convertidor Shift LV. Este convertidor tiene un catalizador de Zn-Cu en forma de tabletas de $6\text{X}3\text{ mm}$, estas tabletas se encuentra sobre una base de Alumina y opera a una temperatura de $200\text{-}230^\circ\text{C}$. El contenido de CO de los gases está entre $0.2\text{-}0.25\%$ (en base seca) y con una $\text{VS}=4000$. Debido a las bajas temperaturas de operación del Convertidor Shift LV, es sensible a envenenamiento del catalizador con Azufre, para evitarlo, el catalizador puede separarse en dos camas unidas por un bypass. La primera cama contiene el 20% del volumen total; el catalizador de la cama principal es remplazado

cada cinco años. El contenido de gas a la salida es de 86 %H₂, 0.25% CO, 22% CO₂ y 1.3% de CH₄ en base seca.

El gas es enfriado y el calor es recuperado tanto como sea posible y el CO₂ es enfriado fuera por MEA. El lavador de gases contiene cerca de 98.2 %H₂, 0.3% CO, 0.01% CO₂ y 1.5% de CH₄. Los óxidos de carbón remanentes son convertidos a CH₄ a una temperatura de 315°C con una VS=6000. El catalizador empleado en esta reacción es Óxido de Níquel con un contenido de Ni neto del 35%, éste se encuentra sobre una base de Silica. El catalizador está hecho en forma de tabletas de 6X6 mm. Sobre este catalizador el CO y el CO₂ reaccionan con agua para formar CH₄. La salida de los gases es enfriada y es enviada a un separador de forma que el producto contiene 98.2% H₂ y 1.8% de CH₄.

A continuación, en la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo de proceso correspondiente al proceso de reformado de gas natural descrito anteriormente.

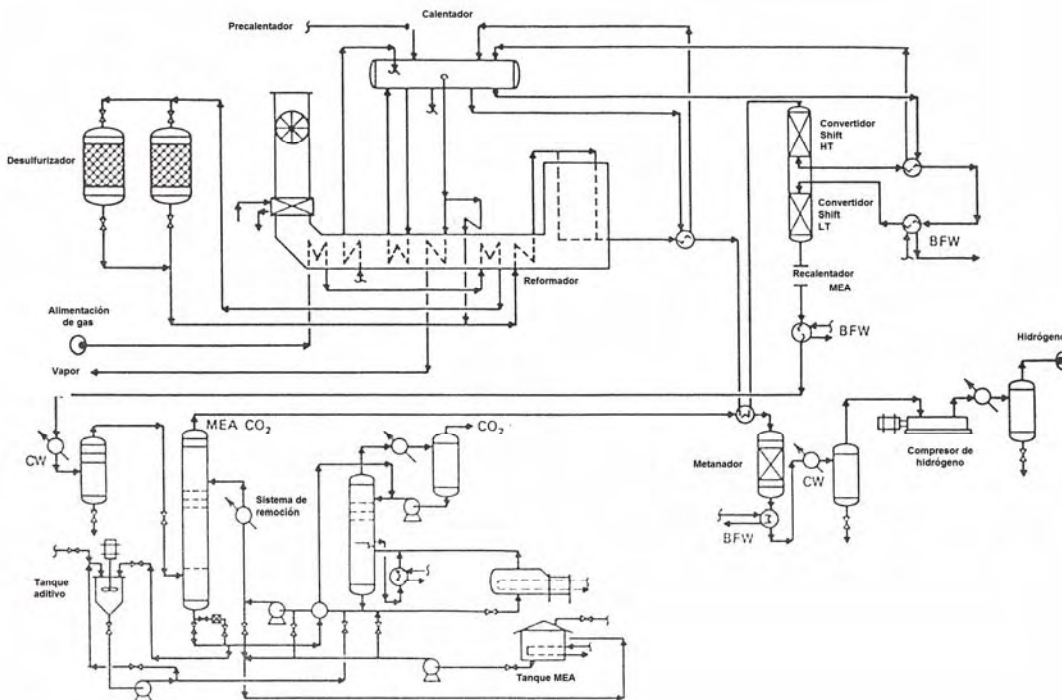


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de reformado de gas natural

El proceso de reformación de gas natural puede utilizar diferentes fuentes de energía primaria para el suministro de calor en el reformador primario.

En la siguiente tabla se muestran los requerimientos del proceso de reformación de gases.

Requerimientos	Gas Natural
Alimentación de combustible, m ³	9752
Equivalente térmico, GJ	297
Energía, Kw-h	2080
Agua de enfriamiento, m ³	293.6
Agua desmineralizada, m ³	58.4
Producción de Hidrógeno (97%), m ³	30,000

Tabla 1. Requerimientos del proceso de reformado de gas natural

Los procesos estudiados en esta investigación que utilizan el proceso de reformado de gas natural son los siguientes:

1. Autoreformado de gas natural (*SMR*).
2. Autoreformado de gas natural con secuestro de dióxido de carbono (*SMR-Captura CO₂*).
3. Reformado de gas natural con energía nuclear como fuente de energía primaria (*Nuclear-SMR*).
4. Reformado de gas natural con energía nuclear como fuente primaria de energía con secuestro de dióxido de carbono (*Nuclear-SMR-Captura CO₂*).

1.1.1.1. Autoreformado de gas natural (*SMR*)

A continuación se presenta un diagrama de flujo referente al proceso de reformado de gas.

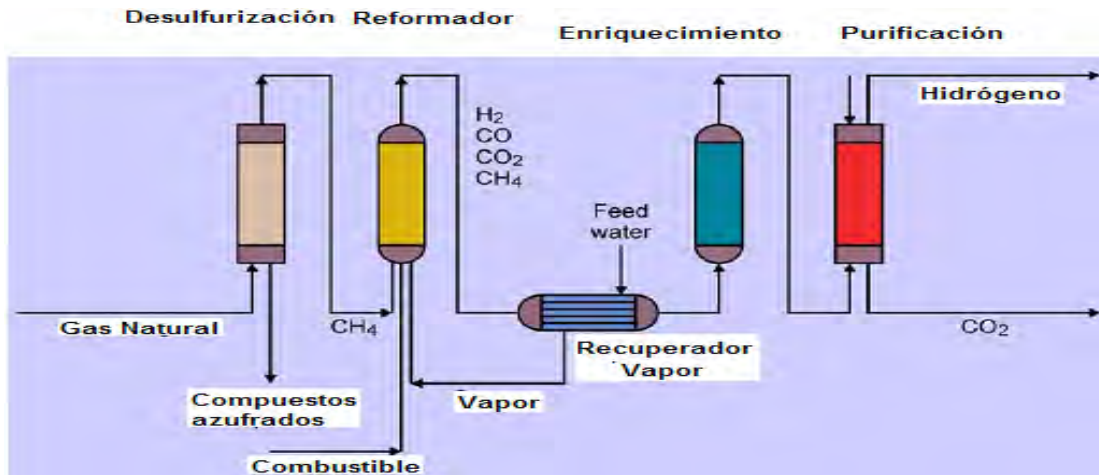


Figura 3. Diagrama de flujo de procesos del reformado de gas natural

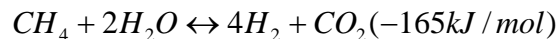
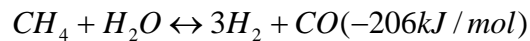
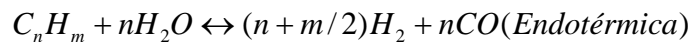
El proceso de reformado de gas natural es la descomposición catalítica de hidrocarburos ligeros (por ejemplo, metano, gas natural y naftas) en un reactor para obtener una mezcla de gases rica en hidrógeno.

Las reacciones del proceso de reformado son reacciones endotérmicas llevadas a cabo a temperaturas mayores de 500°C. El proceso de reformado se lleva a cabo a temperaturas cercanas a los 850°C y a presiones mayores a 2.5 MPa en presencia de catalizadores de hierro y níquel.

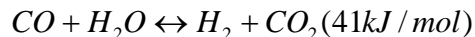
A continuación se presenta un diagrama de flujo referente al proceso de reformado de gas natural.

Figura 3. Diagrama de flujo de procesos del reformado de gas natural

Las reacciones más importantes que se llevan a cabo en este proceso son las siguientes:



Para incrementar la conversión de hidrógeno del proceso se hace reaccionar al monóxido de carbono remanente de la siguiente manera:



A diferencia del proceso de autoreformado de gas natural en el que la energía primaria del proceso SMR se obtiene de la quema de gas natural, los procesos que utilizan energía nuclear como fuente primaria, merecen mayor atención por el sistema acoplado del reactor nuclear con la planta de reformado de gas natural.

1.1.1.2. Reformado de gas natural con energía nuclear como fuente de energía primaria (Nuclear-SMR)

1.1.1.2.1. Introducción al reactor de alta temperatura (HTTR) [2]

El HTTR (High Temperature Test Reactor) es un reactor de 30 MW térmicos moderado con grafito y enfriado con Helio, con una temperatura de salida de 950°C. Es utilizado para realizar pruebas de irradiación de materiales, pruebas de aplicación de calor nuclear y pruebas de seguridad.

El Instituto japonés de investigación en energía atómica JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute) recibió el permiso de construcción del HTTR en febrero de 1990 después de 22 pruebas de seguridad. La investigación y desarrollo inició en 1969.

En Junio de 1987 la Atomic Energy Commission de Japón (AECJ) revisó el “Programa para el desarrollo y utilización de Energía Nuclear” y en ella se reconoció que los reactores de gas de alta temperatura (HTGR, por sus siglas en inglés) no podrían incorporarse a los

proyectos comerciales de las planas existentes. La promoción de la investigación y desarrollo sobre el HTGR en Japón es muy significativa desde el punto de vista de que esta tecnología es una de las llamadas tecnologías de frontera.

El proyecto HTGR en Japón inició desde este informe de la comisión, fue entonces como inició el proyecto HTTR que tendría los siguientes alcances:

1. Estudio la tecnología de los HTGR.
2. Desarrollo de la tecnología de los HTGR avanzados.
3. Pruebas de irradiación de materiales para desarrollar tecnología de frontera de alta temperatura.

El HTTR es el sexto HTGR en el mundo, la diferencia de este reactor con los otros de alta temperatura está en la temperatura de salida del refrigerante del reactor, es entre 850-950°C. Además el HTTR tiene sólo un circuito de refrigeración principal, mientras los HTGR tienen dos circuitos; otra diferencia notable es la potencia del reactor HTTR, es de 30 MW.

En 1989 el gobierno de Japón aceptó la construcción del HTTR, después de que JAERI entregara al primer ministro el reporte de seguridad del reactor. El reactor alcanzó su primera criticidad en 1998. A partir de entonces, iniciaron las pruebas de demostración de seguridad y de aplicación de calor nuclear, algunas de estas aplicaciones incluyen las plantas de producción de hidrógeno y metanol.

Como un reactor HTGR, el HTTR tiene los siguientes propósitos:

1. El establecimiento de las tecnologías básicas de los HTGR's
2. Demostración de la seguridad de la operación de seguridad de los HTGR's y las características inherentes de seguridad.
3. Demostración de los procesos de calor nuclear
4. Prueba de equipo para estudios básicos avanzados

1.1.1.2.2. Principios básicos del HTTR

JAERI elaboró un conjunto de principios de diseño para el HTTR, el cual incluye entre otros puntos:

1. El combustible no deberá fallar en condiciones normales de operación. Para asegurarlo, la temperatura máxima del combustible no deberá exceder 1600°C en un accidente operacional anticipado (AOO's).
2. El reactor debe apagarse de forma segura por medio de las barras de control, Además el sistema de apagado de reserva (RSS) es independiente del sistema de barras de control.
3. Un accidente drástico resultante de la inserción de las barras de control.
4. El calor de reacción residual debe removerse de forma segura después de un AOO.

5. La contención preverá que los productos de fisión salgan a la atmósfera en caso de un accidente de despresurización.
6. La presión de helio en el sistema de enfriamiento secundario (SHCS) deberá prever la fuga de helio del sistema de enfriamiento primario (PCS), debido al rompimiento de un tubo de transferencia de calor del IHX.
7. Desarrollo de materiales que tengan alta resistencia al calor y a la temperatura.

En la Tabla 2, se encuentran tabuladas las principales características del reactor de alta temperatura.

Características	
Altura del núcleo	2.9 m
Diámetro del núcleo	2.3 m
Geometría del núcleo	Prismático
Combustible	UO ₂
Enriquecimiento	6 % (peso)
Moderador	Grafito

Tabla 2. Características generales del HTTR

1.1.1.2.3. Sistema de apagado del reactor

El sistema de apagado del reactor debe operar de forma segura en condiciones normales de operación usando las barras de control (RC).

En el caso de un SCRAM durante operación normal, primero se insertan 9 pares de barras en la región de reflectores, posteriormente el resto de las barras son insertadas después de apagar el núcleo, para prevenir exponerlas a temperaturas de 900°C. La temperatura del núcleo se monitorea por medio de la temperatura del Helio a la salida.

1.1.1.2.4. Sistema de remoción del calor residual

El sistema principal de enfriamiento (MCS) remueve el calor residual del núcleo durante la operación normal. Además del MCS, el HTTR tiene dos sistemas de remoción de calor, el sistema de enfriamiento auxiliar (ACS) para accidentes AOO's y el sistema de recirculación forzada del sistema de enfriamiento del reactor (VCS).

1.1.1.2.5. Características de la planta del HTTR

La planta se compone del edificio del reactor, un edificio de almacenamiento de combustible gastado y un edificio de maquinaria. El edificio del reactor tiene dimensiones de 48m x 50m. En él se encuentran la vasija del reactor a presión (RPV) y el sistema principal de enfriamiento. La Figura 4 muestra un diagrama de la planta del HTTR. La temperatura de salida del refrigerante está entre 850-9450°C. El HTTR tiene dos modos de operación: el modo "carga en paralelo" y el modo "carga normal". El IHX y el PPWC se operan simultáneamente. Por otra parte el PPWC sólo es operado durante el modo de carga

normal. La capacidad calorífica máxima del IHX y del PPWC es 10 y 20 MW respectivamente, durante la operación de carga en paralelo.

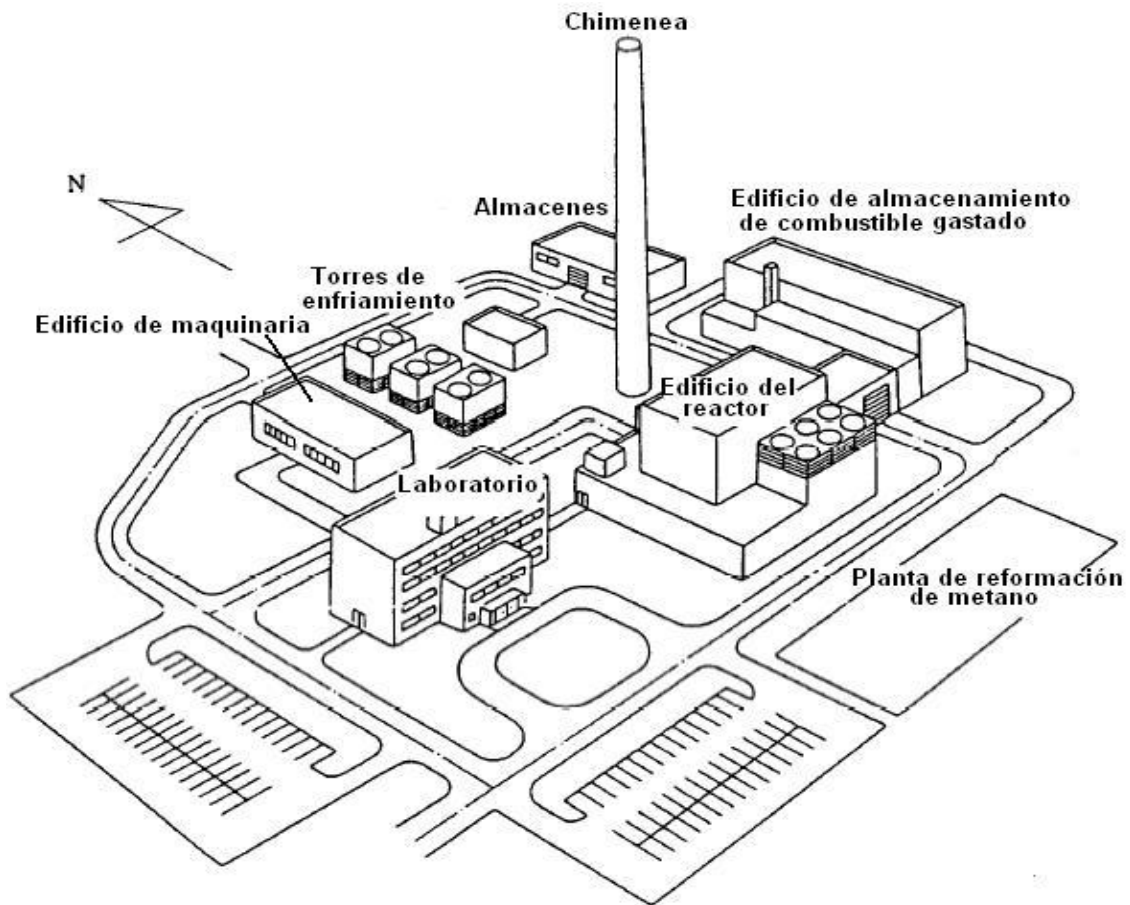


Figura 4. Arreglo de la planta del HTTR.

En la siguiente tabla se muestran datos de los requerimientos del reactor nuclear de alta temperatura.

Potencia térmica	30 MW
Temperatura de salida del refrigerante	850/950°C
Temperatura de entrada del refrigerante	395°C
Número de lazos de refrigerante	1
Sistemas de calor residual	IHX
Presión del refrigerante primario	4 MPa
Tiempo de vida de la planta	20 años

Tabla 3. Resumen de las condiciones de operación del HTTR.

1.1.1.2.6. El sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento consiste de un sistema de enfriamiento primario (PCS), sistema de enfriamiento secundario de Helio (SHCS), sistema de enfriamiento de agua presurizada (PWCS) y del sistema de enfriamiento de la vasija (VCS).

Estos sistemas se ilustran a continuación en la Figura 5:

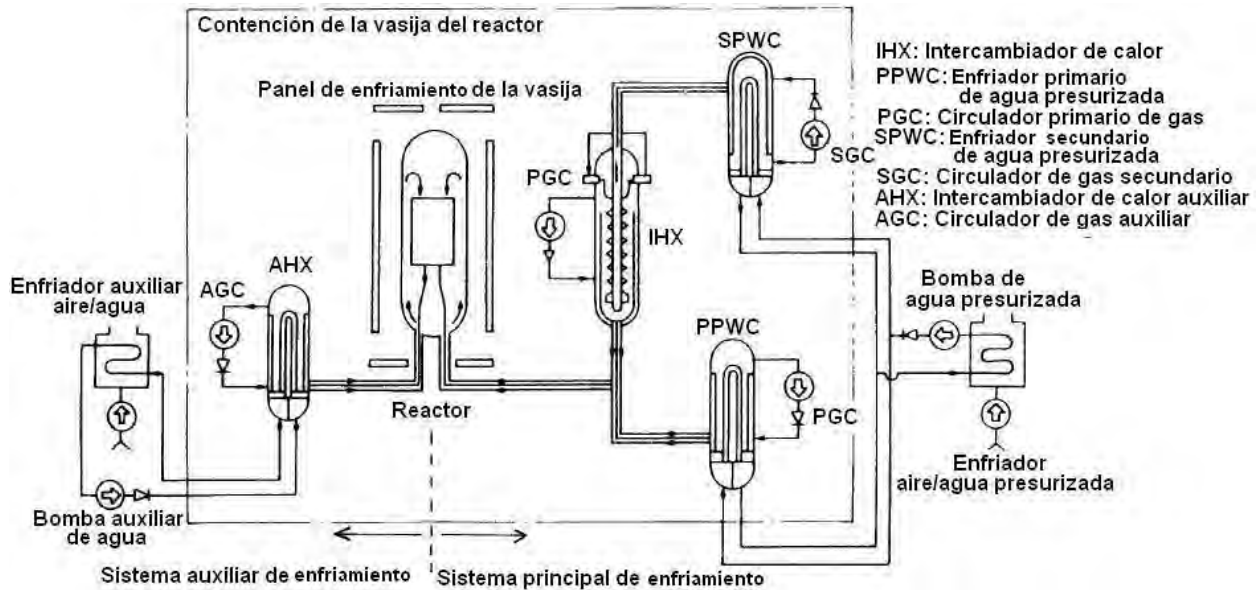


Figura 5. Diagrama de flujo del proceso de generación de energía nuclear por medio del HTRR.

El sistema de enfriamiento primario (PCS) consiste del sistema de enfriamiento principal (MCS) y del sistema auxiliar de enfriamiento (ACS). El MCS tiene dos intercambiadores de calor intermedios helio-helio, el intercambiador de calor intermedio (IHX) y el enfriador primario presurizado de agua (PPWC). El gas helio es transportado desde el núcleo del reactor al IHX y al PPWC a través de un tubo concéntrico de gas. El sistema de enfriamiento secundario de helio (SHCS) consiste, principalmente del PWC secundario que remueve el calor del helio primario a través del IHX.

El PWCS consiste de un enfriador de aire y una bomba de agua.

El ACS se encuentra en “standby” durante la operación normal y entra en operación para remover el calor residual después del SCRAM del reactor.

1.1.1.2.7. Sistema de enfriamiento primario

El PPWC es un intercambiador de calor con un tubo horizontal en forma de “U”. A continuación, en la Tabla 4, se muestran algunas características de este equipo.

Tipo		Tubo vertical “U”	
Número		1	
Presión máxima		4.8 MPa	
<ul style="list-style-type: none"> • Salida • Tubo 		4.8 MPa	
Temperatura máxima		430° C	
<ul style="list-style-type: none"> • Salida • Tubo 		380° C	
Capacidad calorífica		30 MW	
<ul style="list-style-type: none"> • Operación carga normal • Operación carga en paralelo 		20 MW	
Característica	Operación modo “alta temperatura”	Operación modo “pruebas experimentales”	
Flujo de Helio en el sistema primario			
<ul style="list-style-type: none"> • Operación normal • Operación paralelo 	45 t/h 30 t/h	37 t/h 24 t/h	
Temperatura de entrada de gas primario helio	850°C	950° C	
Temperatura de salida gas primario helio	395 °C	395° C	
Flujo de agua			
<ul style="list-style-type: none"> • Operación normal de carga • Operación de carga en paralelo 	640 t/h 420 t/h	630 t/h 420 t/h	
Temperatura de entrada de agua presurizada	150° C	150° C	
Temperatura de salida de agua presurizada	190° C	190° C	
Número de tubos de transferencia de calor			
Número	136		
Diámetro de salida	25.4mm		
Espesor	2.6mm		
Diámetro de salida	2.1m		

Continuación de la tabla de características del intercambiador de calor.

Altura total	7.1m	
Material		
Salida y entrada	SCMV4-2NT (2.5Cr-1Mo)	
Tubo de transferencia	SUS321TB	
Conjunto de tubos	SFVA F22B (2.5Cr-1Mo)	

Tabla 4. Características de operación del intercambiador de calor en “U” de la planta del HTTR

1.1.1.2.8. Intercambiador de calor intermedio (He/He)

El intercambiador IHX, es un intercambiador vertical en el cual entra el helio del sistema primario y sale el helio del sistema secundario. El helio primario entra por la parte de abajo del IHX mientras que el helio secundario entra a contracorriente.

A continuación se muestra una tabla de especificaciones del equipo.

Tipo	Flujo vertical
Número	1
Presión máxima <ul style="list-style-type: none"> • Salida • Tubo de transferencia 	4.8 MPa 0.3 MPa
Temperatura máxima <ul style="list-style-type: none"> • Salida • Tubo de transferencia de calor 	430° C 955° C

Característica	Operación modo “alta temperatura”	Operación modo “pruebas experimentales”
Flujo de helio sistema primario	15 t/h	12 t/h
Temperatura de entrada de helio	850° C	950° C
Temperatura de salida de helio	390° C	390° C
Flujo de helio sistema secundario	14 t/h	12 t/h
Temperatura de entrada de helio del sistema secundario	300° C	300° C
Temperatura de salida de helio del sistema secundario	775° C	860° C

Continuación de la tabla de especificaciones del intercambiador de calor.

Tubos de transferencia de calor		
<ul style="list-style-type: none"> • Número • Diámetro de salida • Espesor 	<p>96 31.8mm 3.5mm</p>	
Altura total	11.0m	
Material		
<ul style="list-style-type: none"> • Entradas/salidas • Tubos de transferencia • Calentador y ducto caliente 	<p>SCMV4.2NT (2.5Cr-1Mo) Hastelloy XR Hastelloy XR</p>	

Tabla 5. Características de operación del intercambiador de calor IHX de la planta del HTTR.

1.1.1.2.9. Impacto ambiental asociado a la operación del reactor [3]

Debido a que se desconocen datos precisos de la cantidad de desechos producidos por la operación del HTTR, se han tomado datos de un reactor nuclear HTGR genérico. Estos datos son presentados en las tablas 6, 7 y 8.

Ubicación de Grafito	Masa en el reactor (Mg)	Inventario total de grafito activado (Bq) ¹	Descarga másica promedio anual (Mg/yr)	Descarga promedio anual por 1 GWe (m ³ /GWeyr)	Actividad promedio anual en descarga (Bq) ¹	Categoría de los desechos activados
Reflectores reemplazables	353	1.2E+14	59	121	2.0E+13	LLW ²
Bloques de combustible	116	7.3E+13	39	79	2,4E+13	LLW ²
Reflectores permanentes	258	1.6E+14	4	9	2.7E+12	ILW ³
Total	727	3.5E+11	102	209	4.7E+13	

Tabla 6. Inventario de grafito activado de acuerdo a la operación anual de un reactor HTGR

¹Cantidades después de 30 años

²Desechos de bajo nivel

³Desechos de nivel intermedio

En la Tabla 7 se muestra el material metálico irradiado durante la operación de un reactor de alta temperatura enfriado por gas.

Metal	INCOLOY 800H	HASTELLOY X	HAYNES 230	9Cr1Mo steel
Cálculos ambientales	Tirrad*=10 años, 30 años de decaimiento	Tirrad*=60 años, 30 años de decaimiento	Tirrad*=60 años, 30 años de decaimiento	Tirrad*=60 años, 30 años de decaimiento
Actividad (MBq/g metal)	3600	8600	10000	60
	Actividad (Bq/g) % actividad total	Actividad (Bq/g) % actividad total	Actividad (Bq/g) % actividad total	Actividad (Bq/g) % actividad total
⁵⁹ Ni (7.5E+4 años)	2.3E+7 0.6%	3.8E+7 0.4%	4.8E+7 0.5%	3.2E+4 0.1%
⁶³ Ni (100 años)	3.4E+9 96.3%	7.8E+9 91.7%	9.8E+9 96.5%	6.6E+6 11.0%
⁵⁵ Fe (2.6 años)	1.3E+7 0.4%	3.0E+6 0.03%	0.2E+6 0.0%	1.5E+7 24.2%
⁶⁰ Co (5.25 años)	2.7E+7 0.7%	6.6E+8 7.7%	2.4E+8 2.4%	3.9E+7 64.4%

Tabla 7. Material metálico irradiado durante la operación de un HTGR

* Tiempo de irradiación del metal.

A continuación se presentan en la tabla 8, los desechos anuales producidos por la operación de un reactor de alta temperatura. Estos datos pueden ser considerados como genéricos para reactores de alta temperatura.

Salidas	Categoría de los desechos	Volumen promedio anual (m ³ /GWeyr)	Descarga radiológica anual (Bq/GWeyr)
Combustible gastado	HLR ¹	4	No considerado
Operación normal	LLW ²	100	Despreciable
Grafito reemplazable	LLW ²	200	4.4E+13
Grafito permanente	ILW ³	9	2.7E+12
B ₄ C Absorbido	ILW ³	2	1.7E+14
Barras de control activadas	ILW ³	2	4.9E+12
Total		317	2.2E+14

Tabla 8. Inventario de desechos anuales de la operación de un reactor típico de alta temperatura

¹Desechos de alto nivel

²Desechos de bajo nivel

³Desechos de nivel intermedio

1.1.1.2.10. Descripción del proceso de reformado de gas natural utilizando energía nuclear como fuente de energía primaria

El proceso de reformación de gas natural utilizando como fuente primaria el HTTR, se encuentra ilustrado en la siguiente figura:

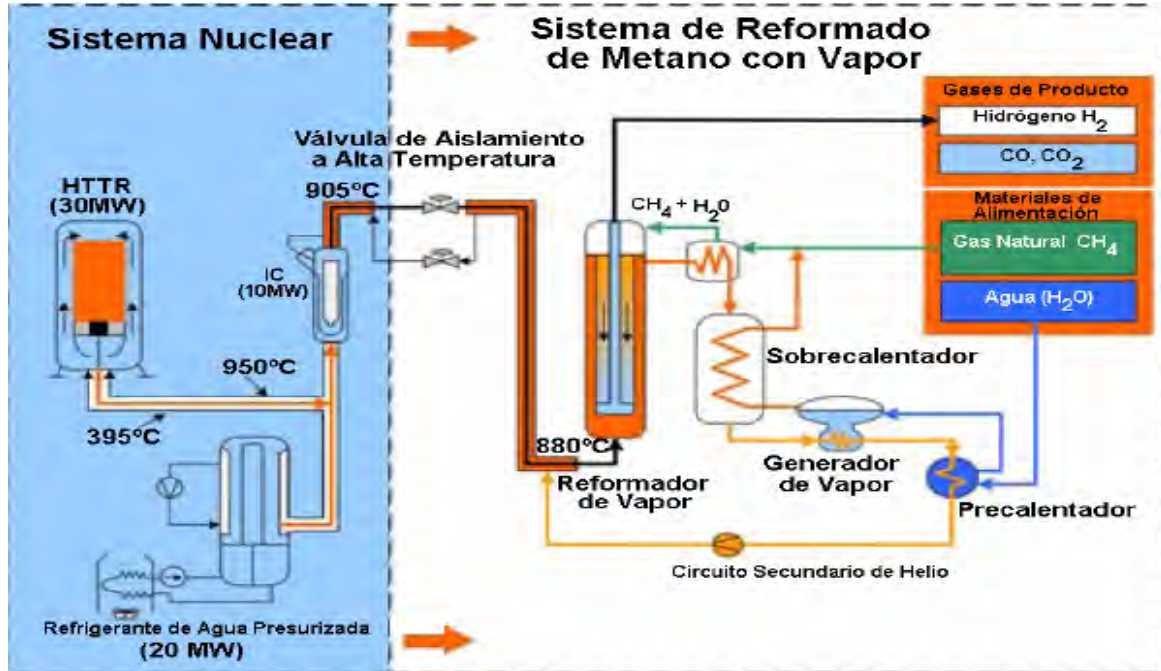


Figura 6. Diagrama de flujo del proceso acoplado del proceso SMR y el reactor nuclear de alta temperatura.

En donde se puede resaltar lo siguiente:

- A diferencia del proceso convencional de reformación de gas natural, el proceso acoplado al reactor de alta temperatura HTGR, por medio del Helio secundario proveniente del IHX, proporciona la fuente de calentamiento para la producción de hidrógeno en el reformador de gas natural.
- La temperatura de salida del Helio en el reformador de gas es de 650° C, éste es enviado al generador de vapor para alimentarlo nuevamente al intercambiador IHX.

1.1.2. Gasificación de carbón [4]

El carbón es un sólido con un alto contenido de carbono y aproximadamente 5% de hidrógeno. La conversión de carbón a gas se lleva a cabo a temperaturas cercanas a 800°C. Este proceso se lleva a cabo en dos etapas, la oxidación parcial o la reacción de pirolisis, en donde todos los constituyentes volátiles del carbón son rápidamente desprendidos, los sólidos orgánicos son convertidos a gas de síntesis (H_2+CO) con CO_2 y vapor. La conversión de H_2 puede incrementarse por medio de la conversión de CO .

Existen varios tipos de procesos de gasificación, como los procesos Lurgi, Koopers-Totzek y Tecaco. Estos procesos difieren uno de otro por el tipo de reactor, rango de temperatura y presión, tamaño y carga de carbón de alimentación, y su tiempo de residencia. La oxidación parcial de carbono pulverizado con oxígeno y vapor en el lecho fluidizado se lleva cabo a presión atmosférica, alrededor del 30-40% del carbón es transformado a CO_2 para suministrar la energía para el proceso de rompimiento de agua. La conversión de la reacción es altamente influenciada por la temperatura, comúnmente la temperatura debe estar por encima de $2000^\circ C$ y la presión cercana de 3 MPa. Las principales desventajas del proceso de gasificación de carbón son los residuos sólidos producidos como subproductos, como el CO_2 , SO_x y NO_x .

En los procesos de hidro-gasificación, el hidrógeno es adicionado para convertir el carbón en gas de síntesis (sintético), después el gas de síntesis es producido en paralelo al proceso de reformado de gas natural. Por medio de ese proceso se obtienen altos niveles de conversión con tiempos de residencia cortos.

El proceso de gasificación de carbón es uno de los más antiguos en la producción de hidrógeno. Debido a que los recursos son abundantes en la Tierra, la conversión de carbón a combustibles líquidos o gaseosos es una opción comercialmente viable.

Los procesos estudiados en esta tesis que utilizan la gasificación de carbón son los siguientes:

1. Gasificación de carbón (*Carbón*).
2. Gasificación de carbón con captura de dióxido de carbono (*Carbón-Captura CO_2*).

1.1.3. Fractura de agua por medio de electrólisis de baja temperatura [4]

Hay principalmente dos procesos de electrólisis de baja temperatura basadas en dos técnicas, la que utiliza un electrolito líquido (comúnmente hidróxido de potasio KOH) y la que utiliza una membrana polimérica de intercambio de protones (PEM). En ambos casos, la molécula de agua es disociada por medio de una corriente eléctrica.

Una celda de electrólisis alcalina contiene una solución cáustica del 20-40% de KOH o $NAOH$ y se aplica una corriente eléctrica a los dos electrodos, que están hechos de níquel o acero. El agua se descompone en el cátodo en H_2 y OH , para después emigrar al electrolito y separarse, respectivamente en el ánodo se forma O_2 .

El hidrógeno obtenido es disuelto en agua y separado en cámaras. A continuación se presenta un esquema.

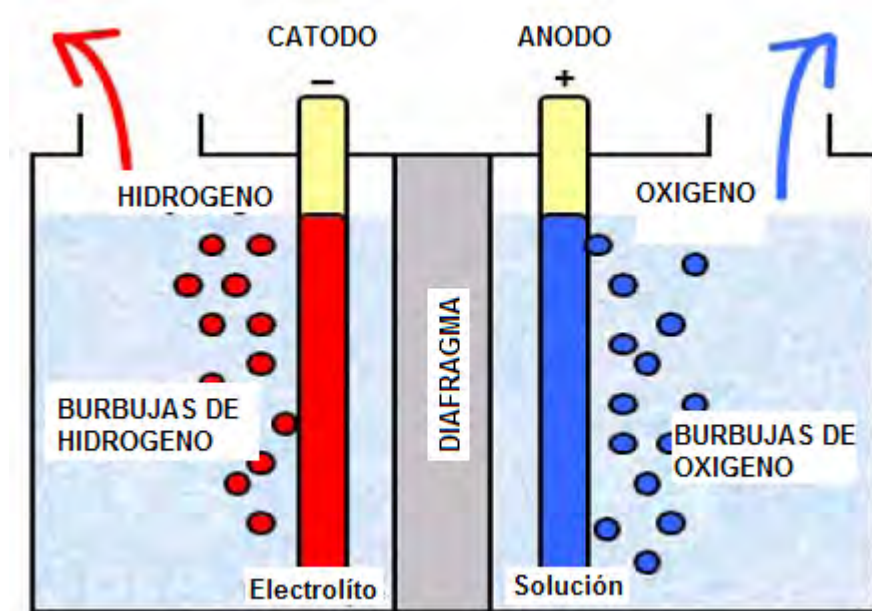
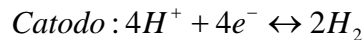
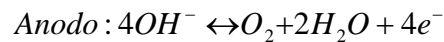
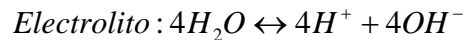


Figura 7. Diagrama de una celda de electrólisis de baja temperatura.



La temperatura de operación está en el rango de 150°C. El potencial de reversibilidad de la celda para la fractura de agua es de 1.229 V a 25°C que corresponde a una temperatura teórica de disociación de 237 kJ/mol para cubrir una producción de 3.56 kWh/Nm³. Los requerimientos de energía eléctrica están en el orden de 4 a 4.5 kWh/Nm³, para obtener una eficiencia del 80% o más elevada. Los requerimientos de agua son teóricamente de 0.81 l/Nm, en la práctica son de 1.0 l/Nm³. La electrólisis a alta presión se lleva a cabo a 3 MPa, de esta forma el hidrógeno es almacenado como un gas presurizado en líneas de tuberías, de esta forma se reduce el consumo específico de electricidad.

La electrólisis alcalina es una tecnología madura, a nivel industrial se producen cerca del 3.9% de la producción mundial de hidrógeno [4]. La primera electrolizadora alcalina fue desarrollada en Noruega por Norsk Hydro. Los electrolizadores de gran escala constan de unidades de capacidades de 485 Nm³/h (t/d) con una disponibilidad del 98% y un consumo de energía de 4.1 kWh/ Nm³. Estas unidades son operadas a presión atmosférica.

La tecnología de la electrólisis es una tecnología madura y cuenta con unidades de capacidad entre 125 MW y 1 kW. Las eficiencias dependen de las celdas.

Los procesos estudiados en esta tesis que utilizan el proceso de electrólisis son los siguientes:

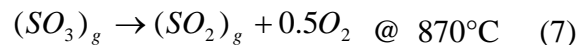
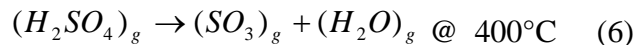
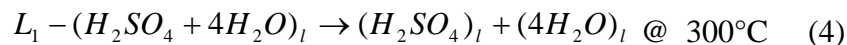
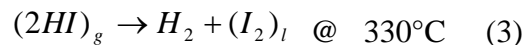
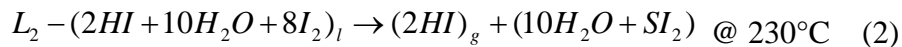
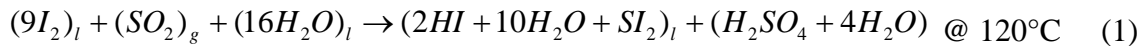
1. Electrólisis utilizando electricidad proveniente de una turbina de viento (*Turbina de viento*).
2. Electrólisis utilizando electricidad proveniente de una central nuclear (*Nuclear-Electrolisis*).
3. Electrólisis utilizando electricidad proveniente de una central hidráulica (*Electrolisis*).

1.1.4. Los ciclos termoquímicos, Termociclos [4]

Un proceso termoquímico es un proceso que consiste de una serie de etapas entre reacciones térmicas de tipo químico, en donde el agua se descompone en hidrógeno y oxígeno a temperaturas moderadas. Todas las sustancias químicas intermedias son regeneradas y recirculadas –idealmente- o bien eliminadas del sistema. Además estos ciclos tienen una mayor eficiencia que los procesos de electrólisis alcalina y reducen grandemente los costos de producción. El ciclo es llamado un ciclo híbrido. La investigación desarrollada para estos ciclos apunta a la energía nuclear y a la solar como principales fuentes de energía primaria.

1.1.4.1. El ciclo yodo-azufre

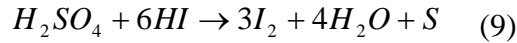
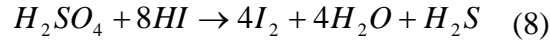
Dentro de los termociclos que han sido investigados el que ha recibido mayor prioridad es el de yodo-azufre (S-I), este proceso originalmente fue desarrollado por la compañía norteamericana General Atomic y desde entonces ha recibido múltiples modificaciones por los japoneses JAEA (Japanes Atomic Energy Agency). El proceso S-I puede concebirse por medio de las siguientes reacciones:



La temperatura de las reacciones son valores aproximados y dependen de la presión, que no necesariamente es uniforme en las diferentes etapas del ciclo.

La primera reacción es la reacción Bunsen, ésta consiste en adicionar agua al dióxido de azufre y al yodo. Los dos productos de esta reacción exotérmica son acuosos, inmiscibles, y el Ioduro de hidrógeno y el ácido sulfúrico se encuentran en una fase ácida, de éstos se obtienen H_2SO_4 y HI en fase acuosa. La siguiente reacción es una mezcla de ioduro de hidrógeno, este compuesto es conocido como HI_x . En la práctica como puede verse en la

reacción (1), es necesario un exceso tanto de agua como de yodo para separa las fases. Esto es muy importante para optimizar la tasa de reactivos de la reacción Bunsen. El exceso de estos reactivos favorece a la formación de H_2S de acuerdo a las siguientes reacciones:



De acuerdo a las reacciones (8) y (9) el ácido sulfhídrico es separado del yodo en solución acuosa. Después de los procesos de separación, purificación y concentración, los ácidos son descompuestos. En este proceso se descompone el ácido yodhídrico y se produce hidrógeno. Esta separación es la fase más crítica y difícil debido a la descomposición parcial a hidrógeno y yodo y la presencia de un azeótropo en la mezcla ternaria. De las reacciones (5) a (7), el ácido sulfúrico se descompone en dos etapas: en la primera se descompone espontáneamente entre 300-500°C en trióxido de azufre y agua y en la reacción (7) en presencia de un catalizador se descompone en dióxido de azufre y oxígeno. El dióxido de azufre, agua y yodo son recirculados en L_1 . A continuación se muestra un diagrama de flujo del proceso termoquímico S-I.

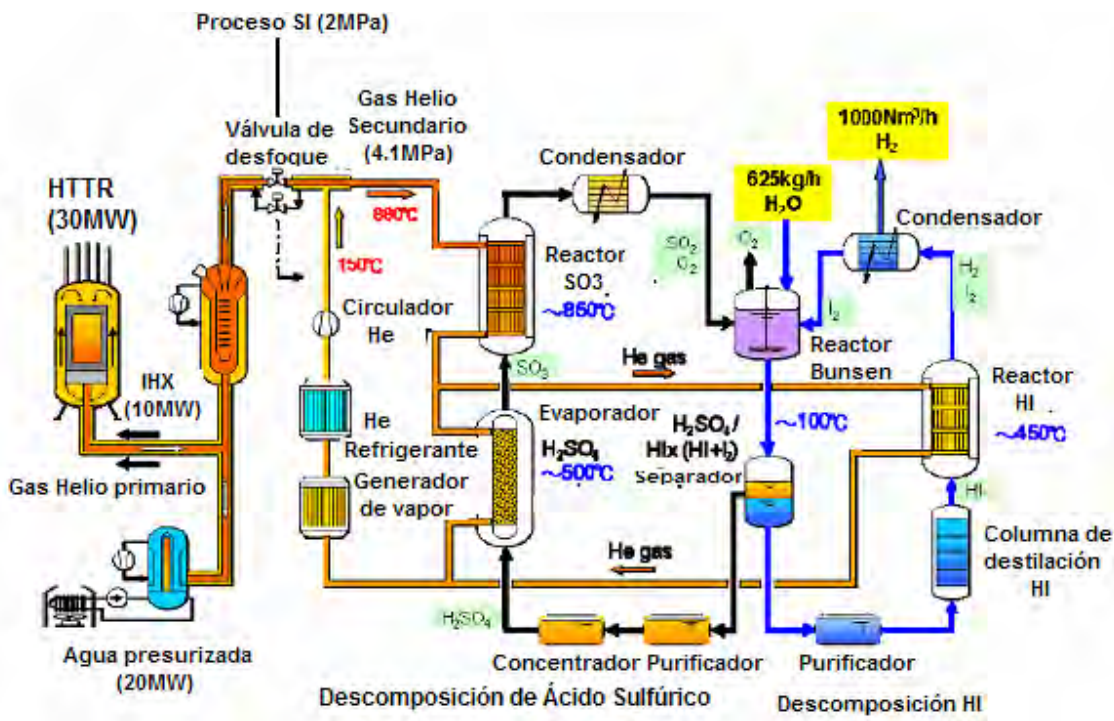


Figura 8. Diagrama de flujo del proceso de termociclos que utiliza energía nuclear como fuente de energía primaria.

El proceso de los termociclos anteriormente expuesto, será representado a lo largo de esta tesis con el sobrenombre de *Nuclear-Termociclos*.

1.1.5. Producción de hidrógeno a partir de biomasa por medio de procesos fotovoltaicos (Biomasa-Solar) [5]

Dentro de los procesos renovables, podemos ubicar la energía solar como la fuente primaria para la biomasa. Existen dos tipos de alimentación de biomasa para la obtención de hidrógeno: materiales biocombustibles y residuos poco caros como desechos orgánicos como desechos de la agricultura y comida reprocessada.

1.1.5.1. Conversión de biomasa

Las tecnologías comunes para la conversión de biomasa a hidrógeno molecular incluyen gasificación o pirolisis de biomasa acoplada a una reformación de vapor. Los principales procesos de conversión son: (1) gasificación calorífica indirecta, (2) gasificación, (3) pirolisis y (4) gasificación biológica (fermentación anaeróbica). Las plantas diseñadas para la gasificación operan a bajas presiones. Sin embargo la tecnología de la biomasa solar es cara y poco eficiente.

El proceso de producción de hidrógeno a partir de biomasa por medios de procesos fotovoltaicos, anteriormente expuesto, será representado a lo largo de esta tesis con el sobrenombre de *Biomasa-Solar*.

Referencias

1. Kirk E. y Othmer D. Enciclopedia de los procesos químicos. Ed. Wiley, 4ª ed. New York 1999.
2. Shusaku Shiozawa. *The development project of HTTR heat application system HTTR*. Department of advanced nuclear heat technology, Oarai research establishment, Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). Japan 1999.
3. Bourdeloie C. and Marimbeau P. *Determination of HTGR radioactive material inventory*. 2nd International topical meeting on high temperature reactor technology, Beijing, China, September 22-24, 2004.
4. Verondem K. *Nuclear energy for hydrogen production*. Energietechnik energy technology. Schriften des forschungszentrums julich reihe energietechnik/energy technology. Band/Volume 58. ISSN 1433-5522. ISBN 978-3-89336-468-8. 2007.
5. National Research Council y National Academy of engineering. *The hydrogen economy: opportunities, costs, barriers, and R&D needs*. ISBN: 0-309-53068-7, 2004.

Capítulo II. Metodología del desarrollo sostenible

2.1. Indicadores energéticos para el desarrollo sostenible

En este capítulo son mostrados un conjunto de indicadores que permiten evaluar el desarrollo sostenible de sistemas energéticos.

Los indicadores mostrados en este capítulo son una recopilación de diferentes referencias bibliográficas especializadas en el estudio de sistemas energéticos, tales como la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), el Departamento de las Naciones Unidas para Asuntos Sociales y Económicos (UNDESA, por sus siglas en inglés) y la Agencia Ambiental Europea (EEA, por sus siglas en inglés).

2.2. Introducción

El desarrollo sostenible ha sido bien definido por la Comisión Brundtlan como “el desarrollo que cubre las necesidades presentes sin comprometer la habilidad de cubrir las necesidades de las futuras generaciones”. Adecuar y comparar las energías utilizadas ha sido clave para el desarrollo económico y la transición energética, desde la economía de la agricultura hasta la industria moderna. La energía es un punto central del bienestar social y económico, además es indispensable para la generación comercial e industrial. No toda energía –carbón, solar, nuclear, eólica o alguna otra- es buena o mala por sí misma, y cada una de ellas es válida para alcanzar un objetivo ó fin.

Muchas de las energías comúnmente usadas, como las anteriormente mencionadas, están basadas en recursos limitados de combustibles fósiles, esto se considera ambientalmente no sostenible. No hay energía de producción o tecnología de conversión fuera del riesgo o libre de desperdicios. Algunas de las tecnologías no emiten sustancias de riesgo ambiental en su uso, pero emisiones y desperdicios pueden estar asociados con su manufactura u otras partes en su ciclo de vida. La quema de combustibles fósiles es responsable de la contaminación del aire urbano, la acidificación regional y el riesgo de los cambios climáticos inducidos por el hombre. El uso de la energía nuclear ha creado también problemas, como la producción de desechos de alto nivel radioactivo y la proliferación de armas nucleares. El uso no comercial de biomasa en algunas ciudades desarrolladas contribuye a la desertificación y pérdida de la biodiversidad.

Para alcanzar el desarrollo sostenible en una escala global se requerirá el uso responsable de recursos, tecnologías, incentivos económicos especiales y planeación de una política estratégica a niveles locales y nacionales. También se requerirá del monitoreo regulatorio de los impactos de las políticas seleccionadas, para determinar si el desarrollo es sostenible.

Cuando un combustible energético es elegido y la tecnología asociada para su producción, se deben tener en cuenta los servicios ofrecidos por la energía elegida; es esencial conocer los riesgos económicos, sociales y consecuencias ambientales. Es necesaria una política energética para medir los efectos futuros del uso de la energía sobre la salud, sociedad, aire, sol y agua. Ésta debe ser capaz de decidir cuándo un desarrollo es sostenible o no. Éste es el propósito de los indicadores de energía que se presentan un poco más adelante.

Los indicadores no son meramente datos, mejor dicho se extienden más allá de estadísticas básicas para proveer de un conocimiento más profundo y relaciones más importantes. Son herramientas para comunicar cuestiones energéticas destinadas al desarrollo sostenible, encaminadas a construir políticas energéticas que sirvan para aumentar estándares de vida. Cada conjunto de indicadores expresa aspectos o consecuencias de la producción y uso de la energía.

Los indicadores aquí presentados constituyen en conjunto una medida para cuantificar el Desarrollo Sostenible.

2.3. Dimensiones del Desarrollo Sostenible

Como ya se mencionó anteriormente, el desarrollo sostenible se divide en las dimensiones: social, ambiental, económica, política y filosófica. Las cuestiones políticas y filosóficas difícilmente pueden ser cuantificadas con indicadores, por tal motivo no serán evaluadas en esta metodología.

2.3.1. Dimensión Social

Los indicadores sociales se dividen a su vez en equidad y salud. La equidad social es uno de los principales factores del desarrollo sostenible debido a que involucra la accesibilidad de la distribución de los recursos energéticos. Que la energía esté disponible para todos a precios accesibles a la sociedad.

El uso de la energía no debe dañar a la salud, sino más bien mejorar las condiciones de vida. La producción energética puede ocasionar muchos problemas a la salud por medio de la emisión de contaminantes. Uno de los objetivos sociales es reducir estos impactos adversos. Los indicadores de salud tienen el subtema de seguridad, que incluye a los accidentes fatales ocasionados por la extracción, conversión, transmisión-distribución y uso de la energía.

FATOR SOCIAL			
Tema	Subtema	Indicador energético	Componentes
Equidad	Accesibilidad	SOCI Consumo energético per capita	-Suministro de energía primaria -Población
Salud	Seguridad	SOC 2 Fatalidades por energía producida y por tipo de combustible	-Energía producida -Tasa de mortalidad anual por uso de combustible

Tabla 9. Indicadores del desarrollo sostenible de la dimensión social

2.3.2. Dimensión Económica

La economía moderna está basada en la confiabilidad e implementación de los sistemas energéticos; el desarrollo energético es necesario para la industrialización. Todos los sectores de la economía –residencial, comercial, transporte, servicios y agricultura– demandan los servicios de energía.

Los indicadores económicos tienen dos temas a tratar, el uso de los modelos de producción y la seguridad.

Dentro de los modelos de producción son tratados los puntos de eficiencia en la conversión de energía y el suministro de energía primaria en México.

- La eficiencia de los sistemas energéticos es un punto clave en la selección de tecnología en la actualidad.
- El costo de los combustibles garantiza accesibilidad a la sociedad.
- Y por último, la seguridad energética, está estrechamente relacionada con los modelos de costo.

Dentro del tema de seguridad energética es tratado el costo de generación energética. Un sistema energético deberá en primera instancia garantizar la producción económicamente viable, por esta razón el costo de la energía garantiza seguridad.

FACTOR ECONÓMICO			
Tema	Subtema	Indicador energético	Componentes
Uso final	Eficiencias	ECO1 Eficiencia de la producción de hidrógeno por tipo de energía primaria	-Tasa de conversión para los ciclos de producción de hidrógeno
Suministro de energía	Precios	ECO 2 Costo de generación unitario de hidrógeno por ciclo de combustible	-Costo unitario de generación de hidrógeno por ciclo de combustible
	Reservas	ECO3 Seguridad energética	-Años de reservas mundiales de las energías primarias tomadas en cuenta por ciclo de combustible

Tabla 10. Indicadores del desarrollo sostenible de la dimensión económica

2.3.3. Dimensión Ambiental

La producción, distribución y uso de energía crea problemas ambientales a diferentes niveles: ciudad, región, nación, y global. Los impactos ambientales pueden depender de cómo se produce y usa la energía, el Mix energético, la estructura de los sistemas energéticos, la relación de las acciones regulatorias y los precios del combustible. Ejemplos que se pueden relacionar con impactos ambientales son los siguientes:

1. Las emisiones gaseosas que producen la contaminación atmosférica de los ciclos de producción de hidrógeno
2. La tasa de desechos sólidos generados por unidad de energía producida.
3. El uso de suelo.

Los indicadores ambientales se dividen en dos temas: atmósfera y tierra.

Los subtemas del indicador referente a la atmósfera son los cambios climáticos y la calidad del aire. Las emisiones que generan el efecto invernadero, también son problemas que se atienden en el desarrollo de problemas ambientales. Los contaminantes de aire más atendidos en este factor incluyen los óxidos sulfurosos, óxidos de nitrógeno y óxidos de carbono. Estos contaminantes pueden dañar la salud humana, ocasionar problemas respiratorios, cáncer, etc.

La Tierra es también afectada por los procesos de transformación de la energía, debido a los desechos sólidos provenientes del ciclo energético.

El uso de suelo es en la actualidad importante debido a la reducción de espacios en centros urbanos.

FACTOR AMBIENTAL			
Tema	Subtema	Indicador energético	Componentes
Atmósfera	Calidad del aire	AMB1 Emisiones de dióxido de carbono provenientes de la producción de hidrógeno.	-Emisión de dióxido de carbono por generación de energía unitaria
		AMB2 Emisiones de óxidos de azufre provenientes de la producción de hidrógeno.	-Emisión de óxidos de azufre por generación de energía unitaria

Continuación de Tabla.

Tema	Subtema	Indicador energético	Componentes
		AMB3 Emisiones de óxidos de nitrógeno provenientes de la producción de hidrógeno.	- Emisión de óxidos de nitrógeno por generación de energía unitaria
Suelo	Generación de desechos sólidos	AMB4 Tasa de desperdicios sólidos generados por unidad de producción energética.	-Tasa de desechos sólidos producidos por generación unitaria de energía por ciclo de combustible
	Generación de desechos radioactivos	AMB5 Producción de desechos radioactivos por generación energética unitaria	-Tasa de desechos radioactivos por generación unitaria de energía por ciclo de combustible
	Uso de suelo	AMB6 Densidad energética	-Potencia energética por unidad de superficie

Tabla 11. Indicadores del desarrollo sostenible de la dimensión ambiental

2.3.4. Dimensión Política

Como puede notarse, el conjunto de indicadores de desarrollo sostenible presentados en esta metodología no incluyen indicadores institucionales o bien de la dimensión política. Estos indicadores no son considerados porque es muy difícil cuantificar decisiones políticas en términos medibles.

2.4. Metodología

La metodología elaborada está diseñada para evaluar a los sistemas energéticos de producción de hidrógeno por medio de indicadores del desarrollo sostenible. Las diferentes tecnologías de producción de hidrógeno, que en esta tesis son presentadas, son juzgadas por medio de los valores obtenidos por cada uno de los indicadores que representan a las tres dimensiones del desarrollo sostenible, de tal forma que la tecnología que se encuentre mejor calificada por cada indicador recibirá la mejor calificación global de desarrollo sostenible.

2.4.1. Desarrollo de la Metodología.

La metodología elaborada para evaluar a los sistemas energéticos de producción de hidrógeno esta conformada de los siguientes puntos:

- *Estandarización de datos*
- *calificación global de los ciclos de combustible*
- *Construcción de casos: Análisis de sensibilidad y Escenario captura de CO₂*

En la siguiente figura se muestra un breve resumen de los pasos que sigue ésta metodología.

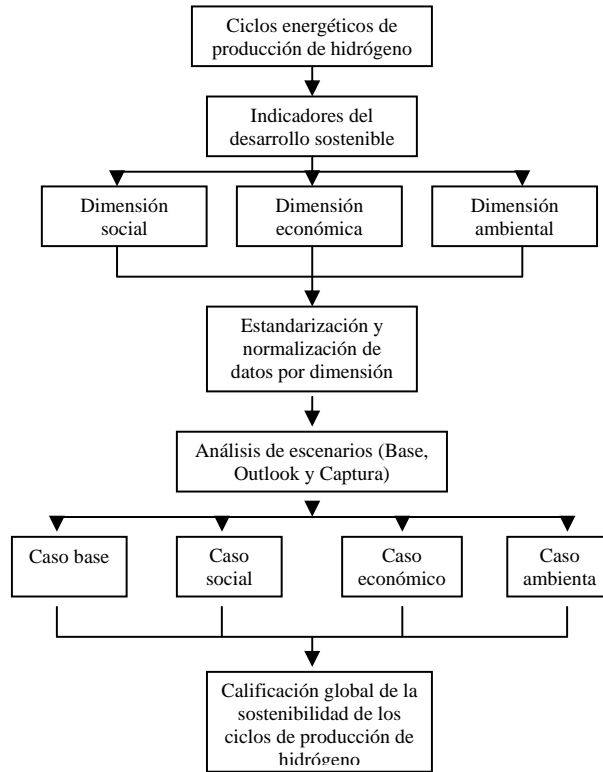


Figura 9. Diagrama de bloques de la metodología de desarrollo sostenible

2.4.1.1. Estandarización de datos.

La etapa de estandarización es necesaria debido a que cada una de las dimensiones del desarrollo sostenible cuenta con un número diferente de indicadores, y los órdenes de magnitud y las unidades, en que éstos se miden, son muy variados. La estandarización de datos permite evaluar de forma equitativa a la dimensión social, económica y ambiental, para obtener la calificación global de la sostenibilidad de los ciclos de combustible.

La base para cada indicador de los ciclos de producción de hidrógeno está dada de acuerdo a la expresión (1)

$$ValorEstandarizado(i) = \frac{\log(i) - \log(i_{menor})}{\log(i_{mayor}) - \log(i_{menor})} \quad (1)$$

En donde:

i = valor del indicador de un ciclo de combustible específico

i_{menor} = Mínimo valor del indicador dentro del grupo de ciclos de combustibles

i_{mayor} = Máximo valor del indicador dentro del grupo de ciclos de combustibles

De esta forma, el indicador mejor evaluado recibirá la calificación máxima, que de acuerdo a la expresión logarítmica es la unidad.

La calificación de cada ciclo de producción de hidrógeno, por dimensión de desarrollo sostenible, está evaluada como los valores promedio de los indicadores que componen cada dimensión. Esta calificación es obtenida por la expresión (2)

$$CCCiA = \text{Promedio} (INDA1, INDA2 \dots \dots INDA_n) \quad (2)$$

En donde:

CCCiA = Calificación del ciclo de combustible i en la dimensión del desarrollo sostenible A
A = Dimensión del desarrollo sostenible: social, económica o ambiental
INDAn = Indicador "n" de la dimensión del desarrollo sostenible A

Por último los resultados obtenidos para cada dimensión son normalizados con un modelo logarítmico en una base de uno antes de proceder a cuantificar de forma global el ciclo.

$$CCNiA = \text{Normalización } CCiA \quad (3)$$

En donde:

CCNiA = Ciclo de combustible normalizado i en la dimensión A

2.4.1.2. Calificación global de los ciclos de combustible.

La calificación global del desarrollo sustentable de los diferentes ciclos de producción de hidrógeno, está dada por la siguiente expresión:

$$SUMATORIA [CCNiA] \quad (4)$$

De forma tal que el ciclo que en la sumatoria obtenga el máximo valor, recibirá la calificación de diez puntos. A partir de este valor serán calificados los demás ciclos de producción de hidrógeno.

2.4.1.3. Construcción de casos.

Los casos nos permiten crear situaciones de ventaja para cada dimensión, esto es, si la prioridad para los ciclos de producción de hidrógeno son los factores económicos, la construcción del caso favorece a esta dimensión por encima de las otras dos dimensiones, asignándole un peso mayor a los indicadores que forman esta dimensión.

En el desarrollo de esta investigación además del caso base, en donde cada dimensión contribuye en igual medida a la calificación global de la sostenibilidad, fueron elaborados los caso sociales, económicos y ambientales.

Para crear el caso social, es necesario favorecer a los indicadores que constituyen a esta dimensión, atribuyéndoles dos terceras partes de la calificación global de la sostenibilidad, mientras que los indicadores concernientes a la dimensión económica y ambiental constituirán en partes equitativas una tercera parte de dicha calificación.

De tal forma, debemos calcular nuevamente la ecuación (3) de la siguiente manera para la dimensión social,

$$CCNiS=[Normalización\ CCiS]2/3 \quad (3')$$

En donde:

CCNiS=Ciclo de combustible normalizado i en la dimensión Social

Y para la dimensión económica y ambiental,

$$CCNiE=[Normalización\ CCiE]1/6 \quad (3'')$$

$$CCNiA=[Normalización\ CCiA]1/6 \quad (3''')$$

En donde:

CCNiE=Ciclo de combustible normalizado i en la dimensión Económica

CCNiA=Ciclo de combustible normalizado i en la dimensión Ambiental

De forma similar podemos evaluar a las tecnología de producción de hidrógeno en los casos restantes, nótese que para el caso base, como los indicadores en sus diferentes dimensiones tienen pesos equivalentes, el escenario base se reduce a llegar al segundo paso de esta metodología.

2.4.1.4. Análisis de sensibilidad.

El análisis de sensibilidad fue elaborado para indicadores que se consideraron pueden estar sujetos a cambios trascendentes en la línea del tiempo. Los indicadores que fueron elegidos para este análisis son los indicadores referentes al suministro de energía primaria per capita (*SOCI*) y el costo de generación unitario de hidrógeno (*ECO2*).

El indicador *SOCI* hace referencia al suministro de energía primaria en México, fue elegido éste indicador debido a que el crecimiento de los vectores energéticos primarios en México tienen diversas tasas de crecimiento en el futuro. Basándose en las proyecciones de los años 2020 y 2030 fueron obtenidos los datos. El análisis de sensibilidad realizado con la modificación del indicador *SOCI*, ha recibido el nombre de “*World Energy Outlook*”.

El análisis de sensibilidad para el indicador *SOC2*, fue construido basándose en la reducción de los costos de los procesos de captura de CO_2 , éste escenario fue denominado “*Escenario captura de CO_2* ”.

2.4.1.4.1. Escenario captura de CO₂

El indicador *ECOI* fue estudiado debido a la esperada reducción en los costos de captura de dióxido de carbono, producto del desarrollo tecnológico. En este escenario se ha planteado una reducción en los costos de captura del 75%.

2.4.1.4.2. El escenario “*World Energy Outlook*”

Este escenario ha sido planteado sabiendo que el suministro de energía primaria en México se verá afectado por el encarecimiento del crudo y la apertura de fuentes alternas para mitigar los impactos ambientales producto de la quema de recursos fósiles. Para este indicador fueron estudiadas las proyecciones de demanda en los años 2020 y 2030 de la energía primaria en México, que expone la Agencia Internacional de Energía por medio del *World Energy Outlook*.

Este escenario está basado en el documento expedido por la Agencia Internacional de Energía, dicho documento que lleva el mismo nombre del escenario “*World Energy Outlook*” es una recopilación de material estadístico en la que se muestran proyecciones basadas en el análisis energético.

Esta guía no pretende resolver problemas energéticos pero proporciona información indispensable desde la cual pueden plantearse algunas soluciones a corto plazo sobre el sector energético.

El contexto sobre el cual están basadas estas proyecciones es el siguiente:

- El crecimiento económico global –la demanda de energía primaria- que se asume será del 3.2% anual entre 2002-2030. En este periodo se asume que las economías de China, India y algunos países de Asia crecerán muy rápidamente.
- La población mundial se asume que crecerá de 6.2 (2002) a 8 miles de millones en 2030 –un crecimiento del 1% promedio anual-.
- Las proyecciones del *World Energy Outlook* están sujetas a un rango de incertidumbre, condiciones macroeconómicas, fuentes de consulta y desarrollo tecnológico.
- Además un escenario de política energética, como el mercado energético global que deberán adoptar los países alrededor del mundo para solucionar los impactos ambientales y garantizar una seguridad energética.

El estudio *World Energy Outlook* realizado para México arroja la siguiente información

	Tasa de crecimiento (%)	
	2002-2020 [2]	2002-2030 [2]
Plantas de generación de potencia		
Carbón	0.8	1
Petróleo	2	1.4
Gas	4.9	4.5
Nuclear	0.1	0
Hidráulica	3.6	2.3
Biomasa	11.5	10.9
Otras renovables	4.1	4.1

Tabla 12. Tasas de crecimiento de las fuentes de energía primaria en México “*World Energy Outlook*”

Esta tabla muestra la tasa de crecimiento calculada para los rangos de tiempo mostrados.

Con estos datos de crecimiento y los datos del suministro de energía primaria en México se han calculado las proyecciones de demanda energética para los años 2020 y 2030. Estos datos son mostrados en la siguiente tabla.

	2006 [PJ] (Balance nacional de energía 2006)	2020 [PJ]	2030 [PJ]
Energía Primaria	919.91	1469.04	2005.19
Carbón	58.91	65.86	74.79
Petróleo	498.00	657.11	695.26
Gas	294.12	574.62	845.89
Nuclear	19.43	19.71	19.43
Hidráulica	49.39	81.02	85.23
Biomasa	0.0001	0.0004	0.001
Turbina de viento	0.07	0.13	0.19

Tabla 13. Proyecciones del 2020 y 2030 para las fuentes de energía primaria en México

Estos datos serán utilizados para el suministro de energía primaria en México para los años 2020 y 2030. En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo correspondiente a la metodología para la evaluación de los sistemas de producción de hidrógeno.

2.5. Descripción de los indicadores

En esta sección se presenta una descripción más amplia de los indicadores utilizados en la metodología preparada para cuantificar el desarrollo sostenible de las diversas opciones para la producción de hidrógeno.

Son considerados los siguientes puntos como temas clave para la justificación de cada indicador.

- a) Propósito
- b) Relevancia al desarrollo sostenible
- c) Convenciones Internacionales
- d) Ligas con otros indicadores
- e) Definiciones y conceptos
- f) Métodos de medición
- g) Límites del indicador
- h) Datos necesarios
- i) Fuentes de consulta

SOCI. Consumo energético per capita

Definición	Uso energético per capita
Unidades	PJ/capita
Agenda 21	Capítulo 4: Modelos de consumo y producción

Tabla 14. Descripción del indicador SOC1.

- (a) Propósito: Este indicador mide la cantidad de energía per capita.
- (b) Relevancia al desarrollo sostenible: La energía es un factor clave en el desarrollo económico y provee de servicios de calidad para el bienestar humano. El primer indicador de la dimensión social toma en cuenta la participación de las diferentes fuentes en el suministro de energía primaria en México. Las fuentes de energía primaria que mayor participación tienen en el suministro de energía primaria en México porque son las fuentes que podrían iniciar la transición energética para el uso de este combustible
- (c) Convenciones internacionales: En la actualidad no hay convenciones que limiten el uso energético per capita. Sin embargo han llamado a hacer uso racional de este recurso en la Comunidad Europea, mejorar la eficiencia de los sistemas energéticos en el Protocolo de Energía sobre Eficiencia Energética y Aspectos relativos al Ambiente. La Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) y el Protocolo de Kyoto han llamado a limitar las emisiones de gases de efecto invernadero y la generación de desechos y mejorar la calidad del aire.

- (d) Ligas con otros indicadores: Este indicador está ligado con otros indicadores económicos, como el uso de energía por grosor doméstico de producción, los precios energéticos, intensidades energéticas netas por importaciones; con la dimensión ambiental por la emisión de gases de efecto invernadero, calidad del aire y generación de desechos; y con la dimensión social en indicadores como el consumo de energía por grupo social.
- (e) Definiciones y conceptos: Consumo de energía total primaria (TPES) -carbón, petróleo, gas natural, hidráulica y otras fuentes renovables-. Importaciones y exportaciones.
 - Suministro de energía primaria. Este concepto se refiere al consumo anual de energía del sector energético mexicano por ciclo de combustible; nuclear, carbón, gas natural, etc.
- (f) Métodos de medición: Este indicador calcula la tasa del uso de la energía total. Se expresa como el suministro de la energía per capita.
- (g) Límites del indicador: Los datos de producción y uso de energía (balances de energía) de algunos energéticos como la biomasa, que no cuentan con una fuente de consulta precisa, son estimados.
- (h) Datos necesarios. Consumo energético anual y número de habitantes.
- (i) Fuentes de consulta: [3] y [4].

SOC 2. Fatalidades por energía producida y por tipo de combustible

Definición	Número de fatalidades por tipo de combustible por unidad de energía.
Unidades	Fatalidades/PJ
Agenda 21	Capítulo 6. Protección y promoción de la salud humana

Tabla 15. Descripción del indicador SOC2.

- (a) Propósitos. Este indicador muestra el número de fatalidades por energía producida en sistemas y actividades energéticas. El indicador es usado para evaluar el riesgo a la salud humana de los sistemas energéticos, y en particular de fatalidades por energía producida.
- (b) Relevancia al desarrollo sostenible. Los sistemas energéticos (en el ciclo de combustible completo) son asociados a diversos factores que constituyen riesgos a la salud humana.
- (c) Convenciones internacionales. No existe.
- (d) Ligas con otros indicadores. Este indicador está ligado a algunos indicadores económicos, como el uso y producción de energía, etc., y algunos otros indicadores de la dimensión social.
- (e) Conceptos y definiciones. Para calcular el indicador es necesario identificar los accidentes que ocasionan fatalidad que se llevan a cabo a lo largo del ciclo de combustible que desee estudiarse.

(f) Métodos de medición. A continuación se presentan algunos accidentes que se llevan a cabo en la industria energética.

- Carbón. Explosiones o incendios en minas de carbón.
- Petróleo. Explosiones o incendios debido a fallas en transporte, plataformas, refinadoras, etc.
- Sector de potencia. Fallas en el equipo de generación eléctrica, transporte y distribución.

(g) Limitaciones del indicador. No se cuenta con la suficiente información para todos los sectores energéticos para calcular este indicador.

(h) Datos necesarios. Número de fatalidades por unidad de energía producida de las diversas alternativas energéticas y las diversas plantas de potencia.

(i) Fuentes de consulta. [5] y [6]

Dimensión económica

ECO1. Eficiencia de la producción de hidrógeno por tipo de energía primaria

Definición	La eficiencia de la producción de hidrógeno por tipo de tecnología
Unidades	Porcentaje (%)
Agenda 21	Capítulo 4: Modelos de consumo y producción

Tabla 16. Descripción del indicador ECO1.

(a) Propósitos: Este indicador mide la eficiencia de la conversión energética para la producción de hidrógeno por ciclo de combustible.

(b) Relevancia al desarrollo sostenible: Maximizar la eficiencia de los sistemas energéticos y reducir las pérdidas durante los procesos de conversión y transporte de energías son objetivos de primer interés del desarrollo sostenible.

(c) Convenciones internacionales: La agenda 21 habla de incrementar las eficiencias energéticas y reducir pérdidas durante los procesos de conversión y distribución de acuerdo al ciclo de combustible.

(d) Ligas con otros indicadores: Este indicador está relacionado con otros indicadores de la dimensión ambiental y económica, incluyendo el uso energético, intensidades energéticas, emisión de gases de efecto invernadero y contaminación de aire y suelo.

(e) Definiciones y conceptos. Ciclo de combustible está referido a cada una de las etapas de transformación en las tecnologías de producción de hidrógeno, desde la extracción, minería, conversión, construcción de la planta hasta la etapa de producción de hidrógeno

(f) Métodos de medición: La eficiencia termodinámica para las diferentes tecnologías de producción de hidrógeno.

(g) Limitaciones del indicador: Los datos de eficiencia de conversión de energía no están siempre disponibles.

- (h) Datos necesarios: Son necesarios los datos de las eficiencias de conversión de energía primaria a hidrógeno para cada ciclo de combustible analizado.
- (i) Fuentes de consulta: [7] y [8]

ECO 2. Costo de generación unitario de hidrógeno por ciclo de combustible

Definición	Se define como el costo de generación unitario de hidrógeno por tipo de combustible.
Unidades	\$/tH ₂
Agenda 21	Capítulo 4: Modelo de consumo y producción

Tabla 17. Descripción del indicador ECO2.

- (a) Propósitos: Evaluar el costo por generación de hidrógeno, tratando de favorecer a las tecnologías que compitan económicamente para garantizar la producción sostenible porque éstas son las fuentes que podrían garantizar una mayor accesibilidad para la producción del combustible.
- (b) Relevancia al desarrollo sostenible. Los costos de producción de hidrógeno están estrechamente relacionados con la accesibilidad, si los costos de producción son elevados para un ciclo de combustible, la tecnología será inaccesible.
- (c) Ligas con otros indicadores: Este indicador está ligado a los indicadores de producción energía, uso energético, precios y recursos
- (d) Definiciones y conceptos. Es el costo unitario de la generación de hidrógeno.
- (e) Métodos de medición. Los métodos de medición del costo, utilizan variables como el costo de la planta, los costos anuales de generación y la tasa de producción de hidrógeno.
- (f) Limitaciones del indicador: Los modelos de costo involucran costos de inversión. Estos costos están sujetos a oportunidades de inversión provistas por políticas energéticas y éstas no ofrecen siempre oportunidades equitativas a todos los ciclos de combustible.
- (g) Datos necesarios. Son necesarios los costos de generación energía unitaria de hidrógeno de cada uno de los ciclos de combustible estudiados.
- (h) Fuentes de consulta: [8]

ECO3. Seguridad energética

Definición	Se define como las reservas de los combustibles primarios que encabezan cada ciclo de producción de hidrógeno (carbón, gas natural, uranio, etc.)
Unidades	Años
Agenda 21	Capítulo 4: Modelo de consumo y producción

Tabla 18. Descripción del indicador ECO3.

- (a) Propósitos. El propósito de este indicador es cuantificar la disponibilidad de las reservas correspondientes a las energías primarias de los ciclos de producción de hidrógeno estudiados.
- (b) Relevancia al desarrollo sostenible. El suministro de energía es un aspecto clave de la sostenibilidad. Este indicador genera las bases para estimar la disponibilidad de los recursos en el futuro.
- (c) Convenciones internacionales: -
- (d) Ligas con otros indicadores: Este indicador está ligado a los indicadores de producción de energía, uso energético, precios y recursos
- (e) Definiciones y conceptos. Los años de reserva de los combustibles están relacionados con las características geográficas de cada región y los espacios explorados.
- (f) Métodos de medición. Los datos representativos de este indicador están basados en información geológica.
- (g) Limitaciones del indicador. Los datos reportados algunas veces son especulativos, como la información concerniente al carbón, gas natural y el uranio.
- (h) Datos necesarios. Son necesarios los recursos estimados en años de combustibles primarios para la generación de hidrógeno.
- (i) Fuentes de consulta: [9]

Dimensión Ambiental

AMB1. Emisiones de dióxido de carbono provenientes de la producción de hidrógeno.

Definición	Emisiones a la atmósfera de CO ₂ (kg) por unidad de energía.
Unidades	Kg CO ₂ /PJ
Agenda 21	Capítulo 9. Protección a la atmósfera

Tabla 19. Descripción del indicador AMB1.

- (a) Propósito. Este indicador mide el total de las emisiones de dióxido de carbono por unidad de energía de hidrógeno generado.
- (b) Relevancia al desarrollo sostenible. Durante el siglo XX, la temperatura de la Tierra se incrementó en 0.6°C y esto se debe a las concentraciones de GHG's en la atmósfera. El contenido de CO₂ se incrementó el 30% y el contenido de NO, NO₂, CO [5].
- (c) Convenciones internacionales. La United Framwork Convention of Climate Change (UNFCCC) celebrada en 1994 y el Protocolo de Kyoto
- (d) Ligas con otros indicadores. Este indicador está estrechamente ligado a los indicadores que cuantifican las emisiones atmosféricas.
- (e) Definiciones y conceptos. Los gases de efecto invernadero contribuyen en gran medida al calentamiento global.
- (f) Métodos de medición. Las emisiones de CO₂ por la combustión de combustible se calcula multiplicando el uso de la energía para cada tipo de combustible por un coeficiente de emisión de CO₂ asociado. También pueden calcularse las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG's) directamente de la fuente de uso de energía.

- (g) Limitaciones del indicador. Sólo son medidas las emisiones de GHG's que emanan del uso y producción de energía.
- (h) Datos necesarios. Son necesarias las emisiones de CO₂ en kilogramos por unidad de energía producida
- (j) Fuentes de consulta: Externe [5], [6]

AMB2. Emisiones de óxidos de azufre provenientes de la producción de hidrógeno.

Definición	Emisiones a la atmósfera de SO _x (kg) por unidad de energía.
Unidades	kg SO _x /PJ
Agenda 21	Capítulo 9. Protección a la atmósfera

Tabla 20. Descripción del indicador AMB2.

- (a) Propósito: Este indicador mide el total de las emisiones de óxidos de azufre por unidad de energía generada.
- (b) Relevancia al desarrollo sostenible. Debido al creciente uso de la energía, la contaminación del aire también se ha incrementado. Esta última depende en gran medida de los ciclos de combustible usados para la generación energética. Este indicador cuantifica las emisiones de óxidos de azufre a la atmósfera, estos compuestos ocasionan daños a salud y provocan acidificación en suelo y aire.
- (c) Convenciones internacionales. Con respecto a la emisión de contaminantes acidificantes hay diversos organismos: United Nations Commission for Europe (UNECE) la convención sobre Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP) Génova 1979 y el protocolo para reducir las emisiones de azufre (Helsinki 1985, Oslo 1994, Gothenburg 1979)
- (d) Ligas con otros indicadores. Energía anual per capita
- (e) Conceptos y definiciones. Contaminantes del aire por gases, partículas aerotransportadas en exceso son dañinas para la salud humana. La emisión de contaminantes del aire desde las actividades antropogénicas son relacionadas directamente a la combustión de fósiles.
- (f) Métodos de medición. En algunos casos las emisiones pueden medirse por medio del balance de masa en sistemas energéticos. En muchos casos también pueden calcularse con la ayuda de factores de emisión, que representan la cantidad relativa de contaminantes emitidos a la atmósfera y su relación con alguna actividad energética asociado. Estos factores se expresan como el peso del contaminante dividido entre volumen, distancia o duración de la actividad emitida de contaminantes (por ejemplo, kilogramos de partículas emitidas por tonelada de carbón quemado).
- (g) Limitaciones del indicador. Sólo son medidas las emisiones de GHG's que emanan del uso y producción de energía.
- (h) Datos necesarios. Cantidad de emisiones de óxidos de azufre al aire debido a la producción de hidrógeno y los ciclos de combustible asociados.
- (i) Fuentes de consulta: Externe [5], [6]

AMB3. Emisiones de óxidos de nitrógeno provenientes de la producción de hidrógeno.

Definición	Emisiones a la atmósfera de NO _x (kg) por unidad de energía.
Unidades	kg NO _x /PJ
Agenda 21	Capítulo 9. Protección a la atmósfera

Tabla 21. Descripción del indicador AMB3.

- (a) Propósito: Este indicador mide el total de las emisiones de óxidos de nitrógeno por unidad de energía de hidrógeno generado.
- (b) Relevancia al desarrollo sostenible. Este indicador puede ser usado para estimar las emisiones de óxidos de nitrógeno a la atmósfera. Estos compuestos ocasionan serios impactos sobre la salud y el ambiente: Los compuestos de azufre y nitrógeno son una fuente de acidificación ambiental. El nitrógeno antropogénico es principalmente emitido como NO_x. Los contaminantes aéreos son asociados a problemas respiratorios y mortalidad humana. En presencia de la luz solar el NO_x reacciona con compuestos orgánicos volátiles (VOC's, por sus siglas en inglés) para formar ozono antropogénico y otros agentes químicos que son tóxicos. El NO_x es precursor de ácido en agua de lluvia y deteriora organismos acuáticos, agricultura y su hábitat. La fijación atmosférica de NO_x puede contribuir a la eutrofización.
- (c) Convenciones internacionales. Con respecto a la emisión de contaminantes acidificantes hay diversos organismos United Nations Commission for Europe (UNECE) la convención sobre Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP) Génova 1979 y el Protocolo para reducir las emisiones de azufre (Helsinki 1985, Oslo 1994, Gothenburg 1979) y NO_x (Sofia 1988, Gothenburg 1999) dos protocolos para reducir metales pesados (Arabux 1998) y compuestos orgánicos no volátiles (VOC's) (Génova 1991)
- (d) Ligas con otros indicadores. Energía anual per capita
- (e) Conceptos y definiciones. Contaminantes del aire por gases, partículas aerotransportadas en exceso son dañinas para la salud humana. La emisión de contaminantes del aire desde las actividades antropogénicas son relacionadas directamente a la combustión de fósiles, las fuentes de energía sin carbón tiene algunos contaminantes significantes NMVOC's.
- (f) Métodos de medición. En algunos casos las emisiones pueden medirse por medio del balance de masa en sistemas energéticos. En muchos casos también pueden calcularse con la ayuda de factores de emisión, que representan la cantidad relativa de contaminantes emitidos a la atmósfera y su relación con alguna actividad energética asociada.
- (g) Ligas con otros indicadores. Éste indicador se encuentra ligado a los indicadores *AMBI* y *AMB2* que también describen emisiones a la atmósfera.
- (h) Datos necesarios. Cantidad de emisiones de óxidos de nitrógeno al aire debido a la producción de hidrógeno y los ciclos de combustible asociados
- (i) Fuentes de consulta: Externe [5], [6]

AMB4. Tasa de desperdicios sólidos provenientes de la producción de hidrógeno.

Definición	Cantidad de desperdicios sólidos (excluyendo desperdicios radioactivos) producidos por unidad de energía producida.
Unidades	Kg/PJ
Agenda 21	Capítulo 21: Buen manejo ambiental de desperdicios sólidos Capítulo 4: Modelo de consumo

Tabla 22. Descripción del indicador AMB4.

- (a) Propósito: El principal propósito de este indicador es proveer de información con respecto al contenido y tipo de desperdicios generados por unidad de energía de hidrógeno producida.
- (b) Relevancia al Desarrollo Sostenible: Desde la extracción de energía hasta el uso final, el sector energético genera diversos tipos de desperdicios.
- (c) Convenciones Internacionales: Agenda 21
- (d) Ligas con otros indicadores: El indicador está ligado a otros indicadores ambientales y económicos, incluyendo los que hablan de producción, uso, intensidades, eficiencia y mix energético, además de la cantidad de desperdicios sólidos, etc.
- (e) Conceptos y definiciones: La tasa de desechos sólidos por ciclo de combustible destinado a la producción de hidrógeno.
- (f) Métodos de medición: Los desperdicios son cuantificados en términos absolutos (kg) y en términos de cantidad de energía producida (PJ).
- (g) Limitaciones del indicador. Los datos obtenidos para este indicador fueron obtenidos de los reportes de “*ExternE*”, sin embargo fueron tomados como modelos de ciclos de combustible típicos para cada proceso.
- (h) Datos necesarios. Cantidad de desechos sólidos proveniente de actividades energéticas.
- (i) Fuente de consulta: [9]

AMB5. Producción de desechos radioactivos por generación energética unitaria

Definición	Cantidad de desperdicios radioactivos producidos por unidad de energía producida.
Unidades	kg/PJ
Agenda 21	Capítulo 21: Buen manejo ambiental de desperdicios sólidos Capítulo 4: Modelo de consumo

Tabla 23. Descripción del indicador AMB5.

- (a) Propósito: El principal propósito de este indicador es proveer de información con respecto al contenido y tipo de desperdicios radioactivos generados por unidad de energía de hidrógeno producida.

- (b) Relevancia al Desarrollo Sostenible: Desde la extracción de energía hasta el uso final, el sector nuclear, principalmente, genera diversos tipos de desperdicios radioactivos.
- (c) Convenciones Internacionales: Agenda 21
- (d) Ligas con otros indicadores: El indicador está ligado a otros indicadores ambientales y económicos, incluyendo los que hablan de producción, uso, intensidades, eficiencia y mix energético, además de la cantidad de desperdicios radioactivos, etc.
- (e) Conceptos y definiciones: La tasa de desechos radioactivos por ciclo de combustible destinado a la producción de hidrógeno.
- (f) Métodos de medición: Para el sector energético, la cantidad de desperdicio normal puede medirse más fácilmente por el peso. La generación de desperdicio podría presentarse en términos absolutos (kg) y por cantidad de energía producida que puede expresarse en Petajoules (PJ).
- (g) Limitaciones del indicador. Este indicador sólo toma en cuenta los desperdicios radioactivos de los ciclos de producción de hidrógeno que utilizan energía nuclear. En realidad la energía nuclear no es la única fuente de energía que los genera –por decir algo las baterías para el almacenamiento de electricidad también los generan- pero si es la única fuente que los reporta.
- (h) Datos necesarios. Los datos recopilados para este indicador son de reactores de alta temperatura, sin embargo el inventario de desechos radioactivos se puede considerar como genérico para un reactor nuclear.
- (i) Fuente de consulta: [9].

AMB6. Densidad energética

Definición	Se define como la capacidad de la instalación para la producción de hidrógeno por unidad de superficie que ocupa,
Unidades	MWH ₂ /km ²
Agenda 21	Capítulo 4: Modelo de consumo y producción

Tabla 24. Descripción del indicador AMB5.

- (a) Propósitos. Cuantificar la generación de hidrógeno por unidad de uso de suelo.
- (b) Relevancia al desarrollo sostenible: El uso de suelo es un factor importante en el desarrollo sostenible. La industria energética actual demanda sistemas modulares y compactos de alta densidad energética
- (c) Convenciones internacionales: -
- (d) Ligas con otros indicadores: Este indicador está ligado a los indicadores de producción anual de energía y el uso anual energético.
- (e) Definiciones y conceptos: La densidad energética es el área necesaria de suelo necesaria para la producción de hidrógeno.
- (f) Métodos de medición: El área necesaria depende principalmente de la fuente de energía primaria y de la tecnología.
- (g) Limitaciones del indicador. Los datos de densidad energética son valores promedio para las plantas de producción de hidrógeno. No existen datos precisos del área necesaria

para la producción de hidrógeno para cada ciclo de combustible. Estos datos fueron obtenidos de una investigación realizada en Inglaterra [8].

- (h) Datos necesarios: Son necesarios los datos de capacidad de la instalación para producir hidrógeno, por uso de suelo en km^2 , para cada ciclo de producción de hidrógeno.
- (i) Fuentes de consulta: [8]

Referencias

1. UNDESA (United Nations Commission on Sustainable Development).
<http://www.un.org/esa/desa.htm>
2. *World Energy Outlook 2004*. International Energy Agency. 9 Rue de le Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France.
3. *Balance Nacional de Energía 2005*. Subsecretaria de Planeación y Desarrollo Tecnológico, Dirección General de Información y Estudios Energéticos. ISBN 968-874-196-5.
4. INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Historia), www.inegi.org.mx.
5. IER, *Externe National Implementation Germany*. The European Commission Contract JOS3-CTS3-CT95-0010, November 1997.
6. Sieverts N. *Externe National Implementation Denmark*. European Commission. Lotte Sheleisner, Technical University of Denmark, Contract JOS3-CT95-0010, December 1997.
7. National Research Council y National Academy of engineering. *The hydrogen economy: opportunities, costs, barriers, and R&D needs*. ISBN: 0-309-53068-7, 2004.
8. Ewan B. y Allen R. *A figure of merit assessment of the routes to hydrogen*. Department of Chemical & Process Engineering. University of Sheffield. International Journal of Hydrogen Energy 30 p. 809-819, 2005.
9. ILK. *Statement on sustainability evaluation of nuclear energy and other electricity supply technologies*. Internationale Landerkommission Kerntechnik. Enero 2004. No.: ILK-16 E.

Capítulo III. Recopilación de datos

En este capítulo se muestra la forma en que se han obtenido los datos necesarios para cuantificar cada uno de los indicadores presentados en la metodología de evaluación del desarrollo sostenible de la producción de hidrógeno.

Los datos que aquí son presentados se clasifican en dos partes: los datos que fueron calculados son mostrados con los métodos utilizados para su obtención, éstos se encuentran en el apartado 3.1. El otro conjunto de datos fue tomado de las fuentes bibliográficas y se presenta en el apartado 3.2.

3.1 Números calculados

Los datos que fueron calculados fueron los números concernientes a los procesos que utilizan el proceso SMR para la obtención de hidrógeno.

3.1.1. Balances de masa

Uno de los más importantes logros de la teoría de la relatividad es la formulación de los principios de conservación de masa y energía. Una expresión precisa del principio de conservación de la masa y la energía requiere de definir cuidadosamente algunos términos. En primer lugar, se entiende que un sistema se refiere a una porción del universo aislado para su estudio. La masa m del sistema se refiere a la cantidad de materia cuya velocidad relativa es cero con respecto a un punto de referencia seleccionado (algunas veces se llama masa en reposo). La energía E del sistema se refiere a energía en todas sus formas posibles. Finalmente, se entiende que una cantidad se conserva si no puede crearse ni destruirse. De ese modo, es posible contabilizar todos los cambios en el total de la cantidad conservada que se encuentra dentro del sistema, midiendo las transferencias del sistema hacia los alrededores y de los alrededores al sistema que cruzan las fronteras del mismo.

Llamemos $(d/dt)(m+E)_s$ a la razón de cambio de masa y energía del sistema con respecto al tiempo, a un determinado instante. Llamemos además $(m+E)_1$ y $(m+E)_0$ respectivamente las razones de entrada y salida de masa y energía desde y hacia el sistema. Bajo estos términos el principio de conservación de masa y energía se reduce a la expresión:

$$\frac{d}{dt}(m+E)_s = (m+E)_1 - (m+E)_0$$

En ausencia de las reacciones nucleares o velocidades cercanas a la luz la intervención entre materia y energía es despreciable. Por lo tanto se pueden separar de la ecuación de conservación las siguientes expresiones:

$$\frac{d}{dt}m_s = m_1 - m_0$$

$$\frac{d}{dt}E_s = E_1 - E_0$$

A la primera ecuación se le llama el principio de conservación de la materia y a la segunda, el principio de conservación de la energía.

Estequiometría química

En la mayoría de los cálculos de balance, no es suficiente manejar a las mezclas en base a la masa total. Particularmente en los sistemas en los que intervienen reacciones químicas, es necesario considerar las especies químicas individuales que componen la mezcla.

Moléculas y reacciones. De acuerdo a la teoría atómica de la materia, los compuestos químicos están formados de agregados entre sí llamados moléculas, que consisten de átomos de 1 a más de 103 tipos de constituyentes químicos llamados elementos. Cada molécula contiene un número entero de átomos de sus elementos constituyentes y puede por lo tanto caracterizarse por el número y tipo de sus átomos. Esta información se expresa convenientemente por medio de estructura llamada fórmula molecular, que tiene la forma general $A_aB_bC_c$ donde cada letra mayúscula representa el símbolo del elemento químico específico y el subíndice indica el número de átomos de ese elemento por cada molécula del compuesto químico.

La reacción química de dos sustancias para formar una o más sustancias nuevas especies es un proceso en el cual se reordenan las moléculas reaccionantes, redistribuyéndose sus elementos constitutivos para formar las moléculas de los productos deseados. Este proceso ocurre de modo que se conserva la identidad de los átomos de los diferentes elementos.

Ecuaciones estequiométricas. Como los átomos se conservan y las moléculas de los productos contienen también el número de átomos de los elementos presentes en las moléculas de los reactivos, se concluye que las moléculas de los reactivos deberán combinarse para formar las moléculas de los productos en razones que corresponden a números enteros o fraccionarios simples. Una manera sencilla para expresar tanto las razones por las cuales se combinan compuestos específicos para dar productos específicos, como las fórmulas moleculares de los mismos compuestos, es la *ecuación estequiométrica de reacción*.

Variables del balance de materia

Los primeros pasos para definir un problema de balance de material incluye seleccionar las fronteras del sistema, identificar todas las corrientes de entrada y salida, es decir todos los flujos que atraviesan las fronteras del sistema e identificar las sustancias químicas que contiene cada corriente. Para llevar un control preciso de todos los materiales que entran y salen del sistema, se deberán conocer el flujo de cada una de las sustancias que están presentes en las corrientes. Existen diversas maneras, equivalentes entre sí para representar esta información.

En primer lugar debemos asociar a cada sustancia j de cada corriente, el flujo de la sustancia N_j (moles de j por unidad de tiempo) o F_j (masa por unidad de tiempo).

El flujo total de la corriente ya sea en moles, o en unidades de masa, estará dado mediante la suma de los flujos individuales por sustancia j que estén presentes en la corriente, de la siguiente forma:

$$N = \sum_j N_j$$

$$F = \sum_j F_j$$

Por lo tanto si se conocen todos los flujos independientes de cada sustancia el flujo total es una variable independiente.

Otra manera de representar una corriente es proporcionar el flujo total, en moles o en unidades de masa, junto con la composición de la corriente. Las dos medidas de composición de la sustancia j , que por conveniencia se usan más en los cálculos de balance de masa, son la fracción masa (fracción peso) o la fracción molar. Partiendo de la definición, la suma de las fracciones másicas y molares de cada corriente serán igual a uno:

$$\sum_{j=1}^s w_j = 1$$

$$\sum_{j=1}^s x_j = 1$$

Realizando un análisis de los flujos de entrada y salida de una frontera, podemos de acuerdo a las relaciones anteriores, obtener la siguiente ecuación:

$$\sum_{i=\text{corrientes entrada}} F^i w_j^i = \sum_{i=\text{corrientes salida}} F^i w_j^i$$

Esta ecuación se conoce como la ecuación general de balance en sistemas no reaccionantes.

Balances de masa en sistemas reaccionantes

Para el estudio de los balances de masa en sistemas reaccionantes es importante definir el concepto de velocidad de reacción. Aunque es posible la formulación de las ecuaciones de balance en términos de la razón de producción de una sustancia de referencia, resulta preferible definir una medida de la razón de producción a través de una razón dada, que sea independiente de la sustancia elegida como referencia.

A esta cantidad independiente se le conoce como velocidad de reacción y depende solamente de la reacción química dentro del sistema de estudio. La ecuación general de balance para sistemas reaccionantes se puede escribir de la siguiente forma:

$$\sum_{i=\text{corrientes entrada}} F^i w_j^i = \sum_{i=\text{corrientes salida}} F^i w_j^i + \sigma^i$$

En donde σ , representa el coeficiente estequiométrico de la sustancia s en la reacción, y r es la velocidad de reacción.

Información del balance de materia

Un problema de balance de materia consiste de los siguientes elementos:

1. El sistema seleccionado, con sus corrientes de entrada y salida
2. Las variables de las corrientes que describen los flujos y composiciones de cada corriente.
3. El sistema de ecuaciones de balance de materia, de los cuales son independientes no más de S ecuaciones, siendo S el número total de componentes que aparecen en cada corriente.
4. La base de cálculo seleccionada.

3.1.2. Análisis de grados de libertad

El análisis de grados de libertad representa una herramienta matemática para conocer si las variables con las que contamos para resolver un proceso limitado por una frontera está correctamente especificado, sobre-especificado ó deficientemente especificado. Las variables que este proceso involucra se resumen en la siguiente tabla de análisis de grados de libertad.

VARIABLES
<i>NTVCC</i> (Número total de variables de corrientes de proceso)
<i>NTR</i> (Número total de reacciones)
<i>NTEBI</i> (Número total de ecuaciones de balance independientes)
<i>NTVCIE</i> (Número total de variables de corrientes de proceso especificadas)
<i>X</i> (Composiciones)
<i>F</i> (Flujos)
<i>RA</i> (Relaciones auxiliares)
<i>GL</i> (Grados de libertad)

Tabla 25. Descripción de la tabla de análisis de grados de libertad.

Dentro de esta tabla se encuentran todas las variables que deben conocerse de un proceso para saber si puede resolverse o no. El *NTVCC* y *NTR*, representan las ecuaciones totales del balance de masa y el *NTVCIE*, *X*, *F*, *RA*, son las variables totales.

Cuando de la resta entre ecuaciones y variables obtenemos grados de libertad mayores a cero significa que tenemos más ecuaciones que variables y el problema no está correctamente especificado, cuando tenemos grados de libertad mayores a cero, significa que tenemos más variables que ecuaciones y tendremos que utilizar tantas ecuaciones como variables para especificar correctamente el problema. Cuando tenemos grados de libertad igual a cero, significa que tenemos un problema de balance de materiales correctamente especificado y entonces la información con la que contamos es suficiente para resolver el balance de masa.

3.1.3. El proceso SMR

Para cuantificar las emisiones asociadas a la producción de hidrógeno por medio del proceso de reformado de gas natural, fue necesario resolver el balance de materiales del proceso. Los pasos desarrollados fueron los siguientes:

1. Recopilación de información. La información recopilada para resolver el proceso se obtuvo de la descripción del proceso, composiciones de corrientes de proceso, flujos de corrientes, temperaturas, presiones, reacciones químicas y conversiones.
2. Análisis de grados de libertad. Una vez recopilada la información, se desarrolló la tabla de análisis de grados de libertad. Esta tabla nos dio la pauta para resolver el proceso ya que como se indicó anteriormente, nos dice si el proceso tiene la información suficiente para resolverlo. De acuerdo al análisis de grados de libertad el proceso está correctamente especificado.
3. Solución del balance de materiales. Sabiendo que el proceso estaba correctamente especificado, se resolvieron los sistemas de ecuaciones del proceso SMR.
4. Resultados y conclusiones. Los resultados del balance se encuentran reportados por corrientes de proceso en la siguiente tabla.

Los procesos estudiados que utilizan el proceso de reformado de gas natural son los siguientes:

1. Autoreformado de gas natural (*SMR*)
2. Autoreformado de gas natural con secuestro de dióxido de carbono (*SMR-Captura CO₂*)
3. Reformado de gas natural con energía nuclear como fuente primaria de energía (*Nuclear-SMR*).
4. Reformado de gas natural con energía nuclear como fuente primaria de energía con secuestro de dióxido de carbono (*Nuclear-SMR-Captura CO₂*)

Para estos procesos es necesario cuantificar las emisiones provenientes del ciclo. Las emisiones del ciclo serán las emisiones de la generación de energía primaria adicionada a las emisiones del proceso SMR. Éste proceso se ilustra en la siguiente Figura.

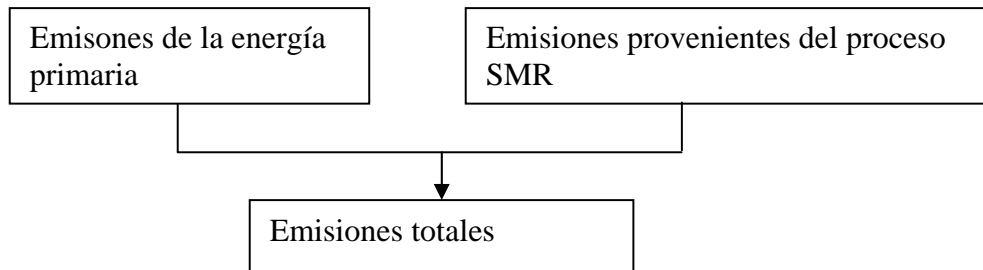


Figura10. Descripción del cálculo de emisiones para los ciclos de combustible para la producción de hidrógeno.

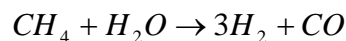
El indicador ambiental referente a las emisiones de gases de efecto invernadero, AMB 1, AMB 2 y AMB 3, cuantifica las emisiones por GJ de energía primaria utilizada para la producción de hidrógeno.

1. Emisiones de la fuente primaria

En realidad, a nivel mundial son pocos los datos que existen de la cuantificación de las externalidades para los ciclos de combustible de energía. La comunidad europea cuenta con un proyecto para cuantificar dichas externalidades por medio del proyecto Externe, en éste proyecto participan Alemania, España, Dinamarca, Grecia, Francia, Irlanda, Italia y el Reino Unido. Las emisiones provenientes de la fuente primaria fueron tomadas del reporte de Externe de Alemania, Fué tomado el reporte elaborado por los alemanes, debido a que es el reporte más completo que existe para la cuantificación de impactos elaborado por la comunidad europea, éstos datos se encuentran en el apéndice de este trabajo.

2. Emisiones del proceso SMR

Por tal motivo es necesario conocer la energía de la fuente primaria necesaria para obtener hidrógeno. Esta información la proporciona el calor de reacción. Para el proceso SMR, la reacción de obtención de hidrógeno es la siguiente:



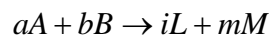
El calor de reacción. Las reacciones térmicas están siempre acompañadas de transferencia de calor o por variaciones de temperatura durante el proceso químico. Estos efectos son manifestaciones de las diferencias en la estructura molecular y por lo tanto, en la estructura de productos y reactivos. El calor asociado con una reacción química depende de la temperatura de los reactivos y de los productos. Una base consistente (estándar) para el

tratamiento de los efectos térmicos de una reacción se obtiene cuando los productos de una reacción y reactivos están a la misma temperatura.

Para cuantificar cambios de energía, de acuerdo a la primera ley (cuando el cambio de volumen es cero).

$$\Delta U = \Delta H = Q$$

Para el análisis de los calores de reacción, tenemos que el término de trabajo de la primera ley se elimina por no realizarse ningún trabajo del sistema hacia los alrededores y por eso no aparece en la ecuación anterior. Para una reacción química, por ejemplo:



El calor estándar de una reacción se define como el cambio de la temperatura cuando a moles de A y b moles de B en sus estados estándar de temperatura T , reaccionan para formar l moles de L y m moles de M en sus estados estándar a la misma temperatura T . Esto es:

$$\Delta H(T)_{reacción} = \sum \Delta H(T)_{productos} - \sum \Delta H(T)_{reactivos}$$

Para la reacción del reformador primario del proceso SMR, tenemos los siguientes datos.

<i>Especie química</i>	<i>Entalpías estándar H°_f (J/kgmol)</i>
CH_4	$-7.45E+04$
CO	$-2.86E+05$
H_2	0
H_2O	$-1.11E+05$

Tabla 26. Entalpías de formación.

De acuerdo a la expresión anterior, el calor de reacción estándar a 298 K es $2.5E5\text{ J/Kgmol}$. Sin embargo esta reacción se lleva a cabo a 1123 K ; el calor de reacción debe corregirse a esta temperatura.

Dependencia del calor de reacción con la temperatura. La entalpía es una función de estado que depende de la temperatura, para obtener el calor de reacción a una temperatura distinta a la temperatura de estándar, debemos aplicar la siguiente expresión.

$$\Delta H^0 = \Delta H_o^0 + R \int_{T_o}^T \frac{\Delta C_p}{R} dt$$

En donde:

$\Delta H^0 [=]$ Entalpía de reacción a la temperatura T .

$\Delta H^0_o [=]$ Entalpía estándar de reacción.

$R [=]$ Constante de los gases ideales.

$\Delta Cp [=]$ Calor específico dependiente de la temperatura T . Está en función de las constantes A , B , C y D .

Y la integral del segundo término es:

$$\int_{298}^{1173} \frac{\Delta Cp}{R} = (\Delta A)T_0(\tau - 1) + \frac{\Delta B}{2}T_0^2(\tau^2 - 1) + \frac{\Delta C}{3}T_0^3(\tau^3 - 1) + \frac{\Delta D}{T_0}\left(\frac{\tau - 1}{\tau}\right)$$

En donde:

$\tau [=]$ Es la relación entre la temperatura a la cual se calculará la reacción y la temperatura estándar $[T/T_0]$.

A , B , C y $D [=]$ Constantes de las capacidades caloríficas que dependen de las temperaturas.

Los datos requeridos para hacer la corrección a la temperatura del calor de reacción son los siguientes:

Especie química	A	B(1E-3)	C(1E-6)	D(1E5)
CH_4	1.7020	9.0810	-2.1640	0.0000
CO	3.3760	0.5570	0.0000	-0.0310
H_2	3.2490	0.4220	0.0000	0.0830
H_2O	3.4700	1.4500	0.0000	0.1210

Tabla 27. Constantes para el cálculo de calores específico.

Con estos datos el calor de reacción a $850^\circ C$ o $1123 K$ es de $2.7 \times 10^5 J/Kgmol$, que representa a la cantidad de energía necesaria para obtener 3 moles de H_2 .

3.1.4. Cálculo de las emisiones totales

El resultado de los balances de masa para el proceso SMR se muestra en la siguiente tabla. Los números de la parte superior horizontal representan al número de corrientes de proceso que incluye el proceso de reformado de gas natural. De acuerdo a la figura 2 del capítulo I.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
F(mol/d)	100	4.5	1	100	91.861	375.6	338.6	714.3	625.5	89.34	625.5	11.259	648.06	11.37	10.3	12.3	1.08
XCH ₄	0.967	-	-	0.967	-	0.0135	-	0.007	0.002	-	0.018	-	-	-	-	1	-
XCO ₂	0.024	-	-	0.033	-	0.0088	-	0.004	0.002	-	-	-	-	-	0.105	-	1
XCS ₂	0.009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
XH ₂ O	-	1	-	-	1	-	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
XH ₂ S	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
XH ₂	-	-	-	-	-	0.7333	-	0.86	0.982	-	0.982	-	1	-	-	-	-
XCO	-	-	-	-	-	0.2444	-	0.129	0.015	1	0	-	-	1	0.895	-	-
P(psia)	D	D	D	D	D	100-700	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
T(°C)	290-370	D	D	D	D	850-1000	D	200-215	D	D	D	D	D	D	D	D	D

Tabla 28. Balance de masa y energía para el proceso SMR.
D Datos desconocidos.

En la siguiente tabla se muestra información técnica necesaria para realizar los cálculos de las emisiones provenientes de los ciclos estudiados.

<i>Datos Técnicos por ciclos</i>		
<i>Ciclo</i>	<i>Eficiencias de conversión a Hidrógeno(%)</i>	<i>Tasa de captura de CO2(%)</i>
<i>Nuclear/SMR</i>	<i>0.7</i>	<i>0</i>
<i>Nuclear-SMR-Captura CO2</i>	<i>0.7</i>	<i>0.3562</i>
<i>SMR</i>	<i>0.76</i>	<i>0</i>
<i>SMR -Captura CO2</i>	<i>0.76</i>	<i>0.3343</i>

Tabla 29. Datos técnicos de los procesos SMR.

Los resultados obtenidos por fuente de energía primaria, proceso SMR y ciclo de combustible completo se encuentran tabulados en la siguiente tabla:

CICLOS DE COMBUSTIBLE	Emisiones Energía por energía primaria (kg/GJ)			Emisiones SMR por energía primaria (kg/GJ)			Emisiones totales por energía primaria (kg/GJ)		
	CO2	SOx	NOx	CO2	CO	SOx	CO2	SOx	NOx
Nuclear/SMR	5.4722	0.0089	0.0194	49.4398	4.2960	0.4039	59.2080174	0.4603	0.0194
Nuclear-SMR-Captura CO2	5.4722	0.0089	0.0194	49.4398	4.2960	0.4039	23.8544707	0.4603	0.0194
SMR	100.7778	0.0009	0.0770	53.6775	4.6642	0.4385	159.119498	0.4910	0.0770
SMR -Captura CO2	100.7778	0.0009	0.0770	53.6775	4.6642	0.4385	56.3003057	0.4910	0.0770

Tabla 30. Resumen de las emisiones a la atmosféricas provenientes de los ciclos de combustible SMR.

3.2 Recopilación de datos

3.2.1. SOCI. Consumo energético per capita

Los valores obtenidos para el indicador *SOCI* fueron obtenidos de las fuentes de consulta citadas en el *Capítulo II* y estandarizados de acuerdo a la metodología descrita en el mismo capítulo. Estos datos se muestran a continuación.

<i>CICLO</i>	<i>Consumo energético per capita (PJ/capita)</i>	<i>Estandarizado</i>	<i>Fuente</i>
<i>Carbón</i>	3.68	0.7616	[1]
<i>Carbón-Captura</i>	3.68	0.7616	[1]
<i>Turbina de viento-Electrolisis</i>	0.01	0	[1]
<i>Nuclear-SMR-Captura CO₂</i>	1.14	0.6106	[1]
<i>SMR -Captura CO₂</i>	23.38	1	[1]
<i>Nuclear-SMR</i>	1.14	0.6106	[1]
<i>SMR</i>	23.38	1	[1]
<i>Nuclear-Electrólisis</i>	1.14	0.6106	[1]
<i>Hidroelectricidad-Electrolisis</i>	2.7	0.7217	[1]
<i>Biomasa-Solar</i>	3.4	0.7514	[1]
<i>Nuclear-Termociclos</i>	1.14	0.6106	[1]

Tabla 31. Reporte de resultados para el indicador SOC1.

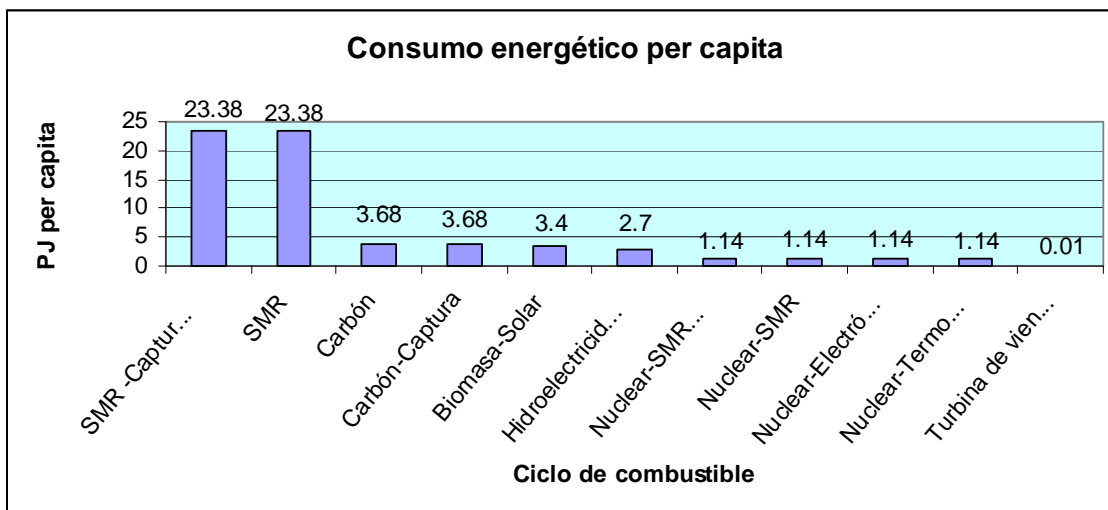


Figura 11. Gráfico del indicador SOC1.

3.2.2. SOC2. Fatalidades por energía producida y por tipo de combustible

Los valores obtenidos para el indicador *SOC1* fueron obtenidos de las fuentes de consulta citadas en el *Capítulo II* y estandarizados de acuerdo a la metodología descrita en el mismo capítulo. Estos datos se muestran a continuación.

<i>CICLO</i>	<i>Fatalidades (Muertes/PJ)</i>	<i>Estandarizado</i>	<i>Fuente</i>
<i>Carbón</i>	<i>2.29E-02</i>	<i>0.3415</i>	<i>[2]</i>
<i>Carbón-Captura</i>	<i>2.29E-02</i>	<i>0.3415</i>	<i>[2]</i>
<i>Turbina de viento-Electrolisis</i>	<i>3.06E-06</i>	<i>1.0000</i>	<i>[3]</i>
<i>Nuclear-SMR-Captura CO₂</i>	<i>2.14E-03</i>	<i>0.5165</i>	<i>[2]</i>
<i>SMR -Captura CO₂</i>	<i>2.34E+00</i>	<i>0.0000</i>	<i>[2]</i>
<i>Nuclear-SMR</i>	<i>2.14E-03</i>	<i>0.5165</i>	<i>[2]</i>
<i>SMR</i>	<i>2.34E+00</i>	<i>0.0000</i>	<i>[2]</i>
<i>Nuclear-Electrólisis</i>	<i>2.14E-03</i>	<i>0.5165</i>	<i>[2]</i>
<i>Hidroelectricidad-Electrolisis</i>	<i>9.44E-05</i>	<i>0.7469</i>	<i>[3]</i>
<i>Biomasa-Solar</i>	<i>1.64E-03</i>	<i>0.5362</i>	<i>[2]</i>
<i>Nuclear-Termociclos</i>	<i>2.14E-03</i>	<i>0.5165</i>	<i>[2]</i>

Tabla 32. Reporte de resultados para el indicador SOC2.

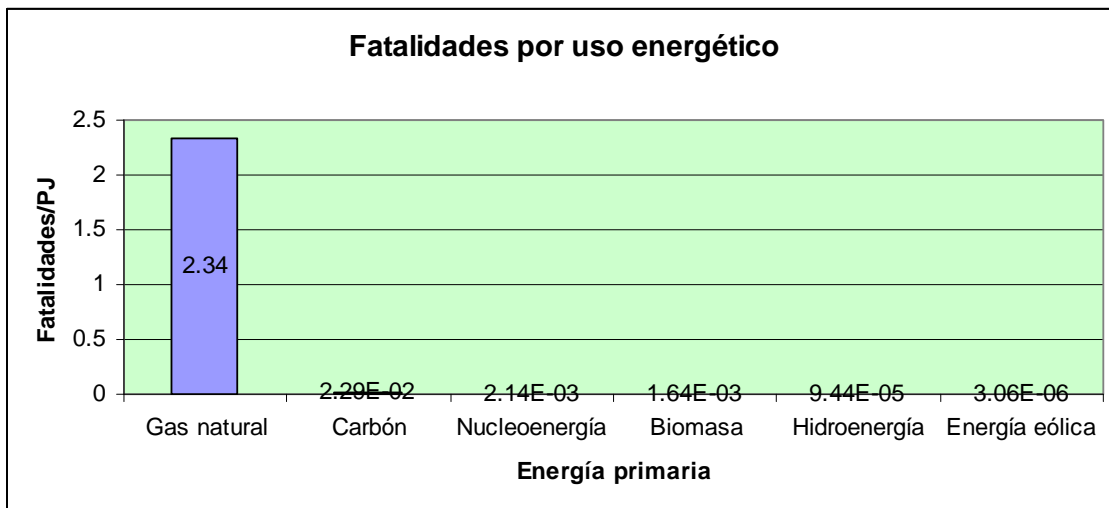


Figura 12. Gráfico del indicador SOC2.

3.2.3. ECO1. Eficiencia de la producción de hidrógeno por tipo de energía primaria

Los valores obtenidos para el indicador *SOCI* fueron obtenidos de las fuentes de consulta citadas en el *Capítulo II* y estandarizados de acuerdo a la metodología descrita en el mismo capítulo. Estos datos se muestran a continuación.

<i>CICLO</i>	<i>Eficiencia (%)</i>	<i>Estandarizado</i>	<i>Fuente</i>
<i>Carbón</i>	<i>0.59</i>	<i>0.9560</i>	<i>[4]</i>
<i>Carbón-Captura</i>	<i>0.59</i>	<i>0.9560</i>	<i>[4]</i>
<i>Turbina de viento-Electrolisis</i>	<i>0.7</i>	<i>0.9857</i>	<i>[4]</i>
<i>Nuclear-SMR-Captura CO₂</i>	<i>0.6</i>	<i>0.9589</i>	<i>[4]</i>
<i>SMR -Captura CO₂</i>	<i>0.76</i>	<i>1</i>	<i>[4]</i>
<i>Nuclear-SMR</i>	<i>0.6</i>	<i>0.9589</i>	<i>[5]</i>
<i>SMR</i>	<i>0.76</i>	<i>1</i>	<i>[4]</i>
<i>Nuclear-Electrólisis</i>	<i>0.4</i>	<i>0.8885</i>	<i>[4]</i>
<i>Hidroelectricidad-Electrolisis</i>	<i>0.7</i>	<i>0.9857</i>	<i>[4]</i>
<i>Biomasa-Solar</i>	<i>0.0024</i>	<i>0</i>	<i>[4]</i>
<i>Nuclear-Termociclos</i>	<i>0.5</i>	<i>0.9273</i>	<i>[4]</i>

Tabla 33. Reporte de resultados para el indicador ECO1.

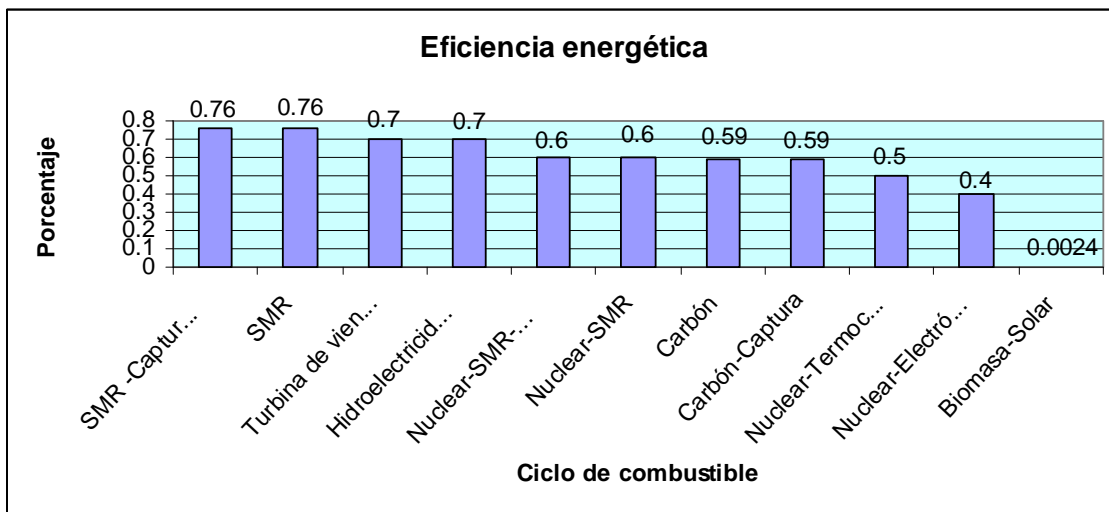


Figura 13. Gráfico del indicador ECO1.

3.2.4. ECO2. Costo de generación unitario de hidrógeno por ciclo de combustible

Los valores obtenidos para el indicador *SOCI* fueron obtenidos de las fuentes de consulta citadas en el *Capítulo II* y estandarizados de acuerdo a la metodología descrita en el mismo capítulo. Estos datos se muestran a continuación.

<i>CICLO</i>	<i>Costo de generación (\$/tH₂)</i>	<i>Estandarizado</i>	<i>Fuente</i>
<i>Carbón</i>	1621	0.6225	[4]
<i>Carbón-Captura</i>	3114	0.3151	[4]
<i>Turbina de viento-Electrolisis</i>	6081	0	[4]
<i>Nuclear-SMR-Captura CO₂</i>	1320	0.7192	[4]
<i>SMR -Captura CO₂</i>	1575	0.6360	[4]
<i>Nuclear-SMR</i>	727	1	[4]
<i>SMR</i>	982	0.8584	[4]
<i>Nuclear-Electrólisis</i>	5197	0.0740	[4]
<i>Hidroelectricidad-Electrolisis</i>	4725	0.1188	[4]
<i>Biomasa-Solar</i>	5160	0.0773	[4]
<i>Nuclear-Termociclos</i>	1270	0.7374	[4]

Tabla 34. Reporte de resultados para el indicador ECO2.

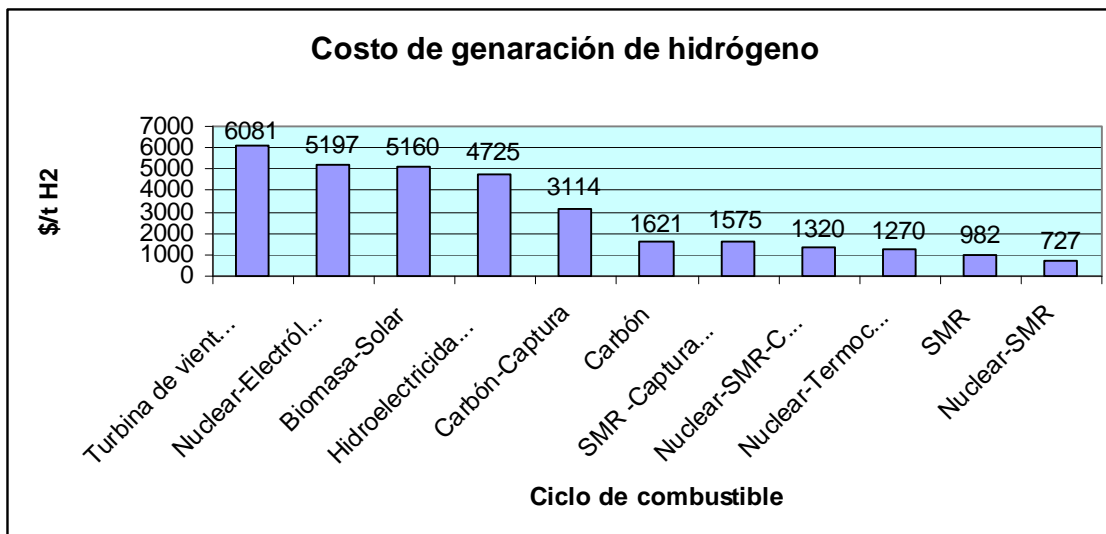


Figura 14. Gráfico del indicador ECO2.

3.2.5 ECO3. Seguridad energética

Los valores obtenidos para el indicador *SOCI* fueron obtenidos de las fuentes de consulta citadas en el *Capítulo II* y estandarizados de acuerdo a la metodología descrita en el mismo capítulo. Estos datos se muestran a continuación.

<i>CICLO</i>	<i>Años de reserva (Años)</i>	<i>Estandarizado</i>	<i>Fuente</i>
<i>Carbón</i>	1230	0.6240	[7]
<i>Carbón-Captura</i>	1230	0.6240	[7]
<i>Turbina de viento-Electrolisis</i>	5000*	1	[7]
<i>Nuclear-SMR-Captura CO₂</i>	260	0.2073	[7]
<i>SMR -Captura CO₂</i>	120	0	[7]
<i>Nuclear-SMR</i>	260	0.2073	[7]
<i>SMR</i>	120	0	[7]
<i>Nuclear-Electrólisis</i>	260	0.2073	[7]
<i>Hidroelectricidad-Electrolisis</i>	2500*	0.8142	[7]
<i>Biomasa-Solar</i>	5000*	1	[7]
<i>Nuclear-Termociclos</i>	260	0.2073	[7]

Tabla 35. Reporte de resultados para el indicador ECO3.

*Valores supuestos.

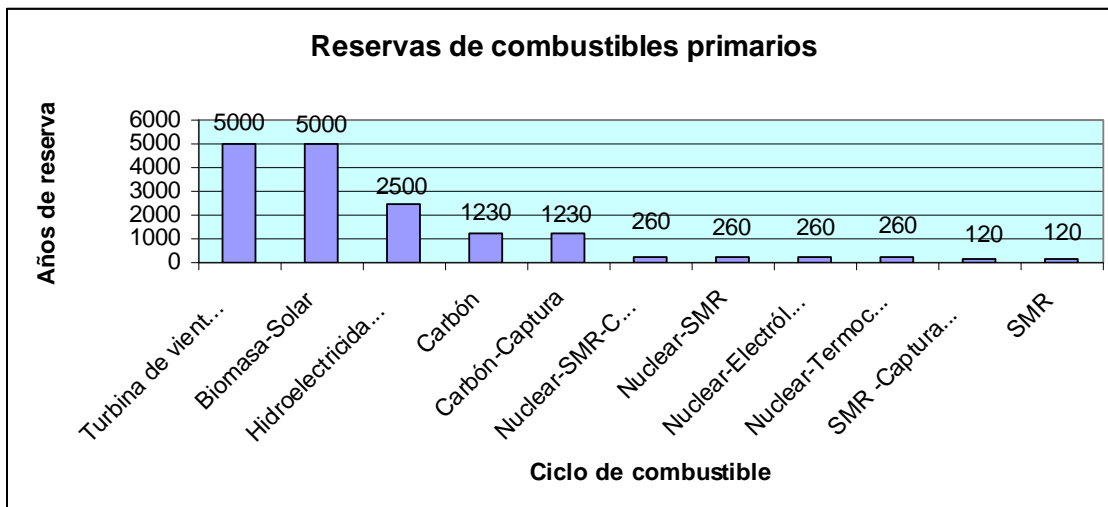


Figura 15. Gráfico del indicador ECO3.

3.2.6 AMB1. Emisiones de dióxido de carbono provenientes de la producción de hidrógeno.

Los valores obtenidos para el indicador *SOCI* fueron obtenidos de las fuentes de consulta citadas en el *Capítulo II* y estandarizados de acuerdo a la metodología descrita en el mismo capítulo. Estos datos se muestran a continuación.

<i>CICLO</i>	<i>Emisiones de CO₂ (kg/PJ)</i>	<i>Estandarizado</i>	<i>Fuente</i>
<i>Carbón</i>	226.3889	0.2279	[2]
<i>Carbón-Captura</i>	70.1889	0.3465	[2]
<i>Turbina de viento-Electrolisis</i>	6.4233	0.5889	[3]
<i>Nuclear-SMR-Captura CO₂</i>	13.8941	0.5107	[2]
<i>SMR -Captura CO₂</i>	109.3602	0.3016	[2]
<i>Nuclear-SMR</i>	29.1173	0.4357	[2]
<i>SMR</i>	126.4496	0.2869	[2]
<i>Nuclear-Electrólisis</i>	5.4722	0.6051	[2]
<i>Hidroelectricidad-Electrolisis</i>	0.1111	1	[3]
<i>Biomasa-Solar</i>	2144.8149	0	[2]
<i>Nuclear-Termociclos</i>	5.4722	0.60510	[2]

Tabla 36. Reporte de resultados para el indicador AMB1.

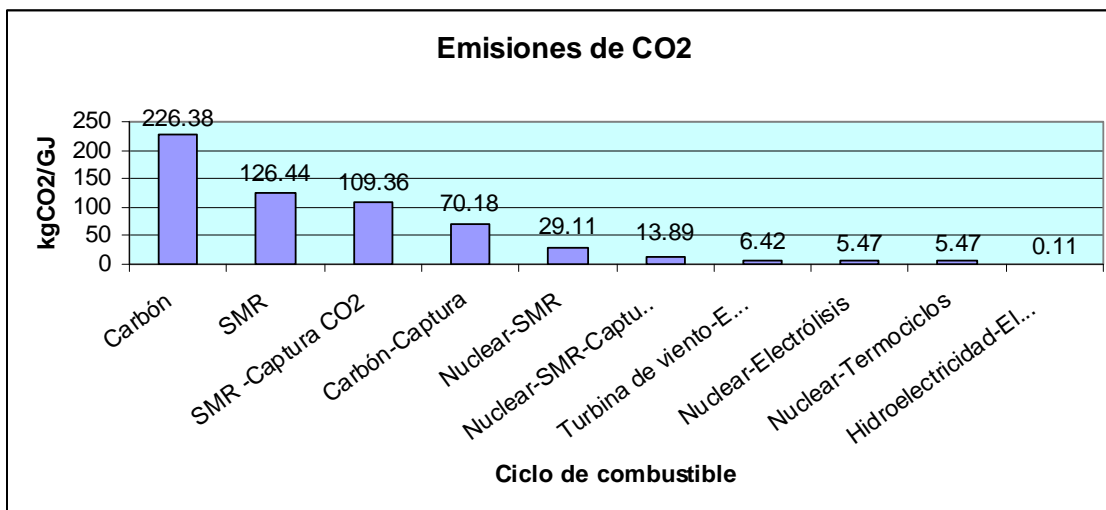


Figura 16. Gráfico del indicador AMB1.

3.2.7. AMB2. Emisiones de óxidos de azufre provenientes de la producción de hidrógeno.

Los valores obtenidos para el indicador *SOCI* fueron obtenidos de las fuentes de consulta citadas en el *Capítulo II* y estandarizados de acuerdo a la metodología descrita en el mismo capítulo. Estos datos se muestran a continuación.

CICLO	Emisiones de SO _x (kg/PJ)	Estandarizado	Fuente
Carbón	0.0906	0.3008	[2]
Carbón-Captura	0.0906	0.3008	[2]
Turbina de viento-Electrólisis	0.0244	0.6957	[3]
Nuclear-SMR-Captura CO ₂	0.0089	1	[2]
SMR -Captura CO ₂	0.2460	0	[2]
Nuclear-SMR	0.0089	1	[2]
SMR	0.2460	0	[2]
Nuclear-Electrólisis	0.0089	1	[2]
Hidroelectricidad-Electrolisis	0.2222	0.0306	[3]
Biomasa-Solar	0.0811	0.3341	[2]
Nuclear-Termociclos	0.0089	1	[2]

Tabla 37. Reporte de resultados para el indicador AMB2.

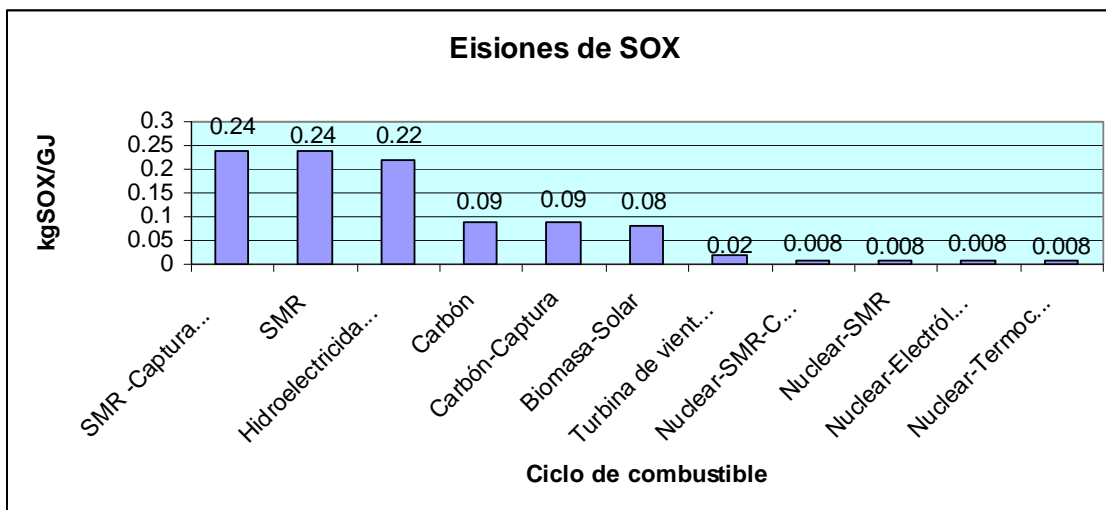


Figura 17. Gráfico del indicador AMB2.

3.2.8. AMB3. Emisiones de óxidos de nitrógeno provenientes de la producción de hidrógeno.

Los valores obtenidos para el indicador *SOCI* fueron obtenidos de las fuentes de consulta citadas en el *Capítulo II* y estandarizados de acuerdo a la metodología descrita en el mismo capítulo. Estos datos se muestran a continuación.

<i>CICLO</i>	<i>Emisiones de NO_x (kg/PJ)</i>	<i>Estandarizado</i>	<i>Fuente</i>
<i>Carbón</i>	0.1557	0.4918	[2]
<i>Carbón-Captura</i>	0.1557	0.4918	[2]
<i>Turbina de viento-Electrolisis</i>	0.0099	1	[3]
<i>Nuclear-SMR-Captura CO₂</i>	0.0194	0.8753	[2]
<i>SMR -Captura CO₂</i>	0.0770	0.6215	[2]
<i>Nuclear-SMR</i>	0.0194	0.8753	[2]
<i>SMR</i>	0.0770	0.6215	[2]
<i>Nuclear-Electrólisis</i>	0.0194	0.8753	[2]
<i>Hidroelectricidad-Electrolisis</i>	0.0419	0.7338	[3]
<i>Biomasa-Solar</i>	2.2426	0	[2]
<i>Nuclear-Termociclos</i>	0.0194	0.8753	[2]

Tabla 38. Reporte de resultados para el indicador AMB3.

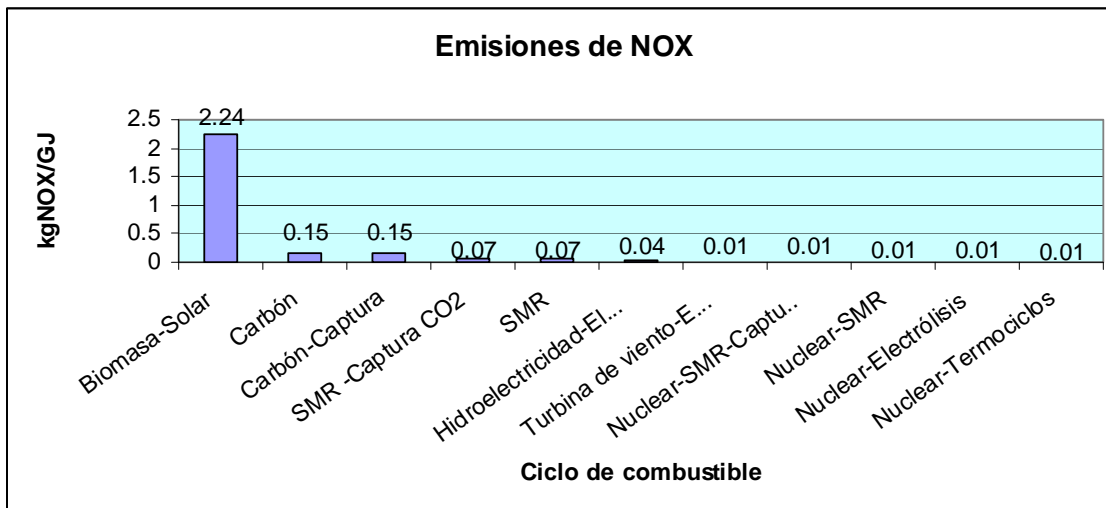


Figura 18. Gráfico del indicador AMB3.

3.2.9. AMB4. Tasa de desperdicios sólidos generados por unidad de producción energética.

Los valores obtenidos para el indicador *SOCI* fueron obtenidos de las fuentes de consulta citadas en el *Capítulo II* y estandarizados de acuerdo a la metodología descrita en el mismo capítulo. Estos datos se muestran a continuación.

<i>CICLO</i>	<i>Desechos sólidos producidos (kg/PJ)</i>	<i>Estandarizado</i>	<i>Fuente</i>
<i>Carbón</i>	50000000	0	[6]
<i>Carbón-Captura</i>	50000000	0	[6]
<i>Turbina de viento-Electrolisis</i>	6388888.89	0.4572	[6]
<i>Nuclear-SMR-Captura CO₂</i>	4166666.67	0.5522	[6]
<i>SMR -Captura CO₂</i>	55555.556	1	[6]
<i>Nuclear-SMR</i>	4166666.67	0.55222	[6]
<i>SMR</i>	55555.556	1	[6]
<i>Nuclear-Electrólisis</i>	4166666.67	0.5522	[6]
<i>Hidroelectricidad-Electrolisis</i>	6666666.67	0.4478	[6]
<i>Biomasa-Solar</i>	90555.556	0.8914	[6]
<i>Nuclear-Termociclos</i>	4166666.67	0.5522	[6]

Tabla 39. Reporte de resultados para el indicador AMB4.

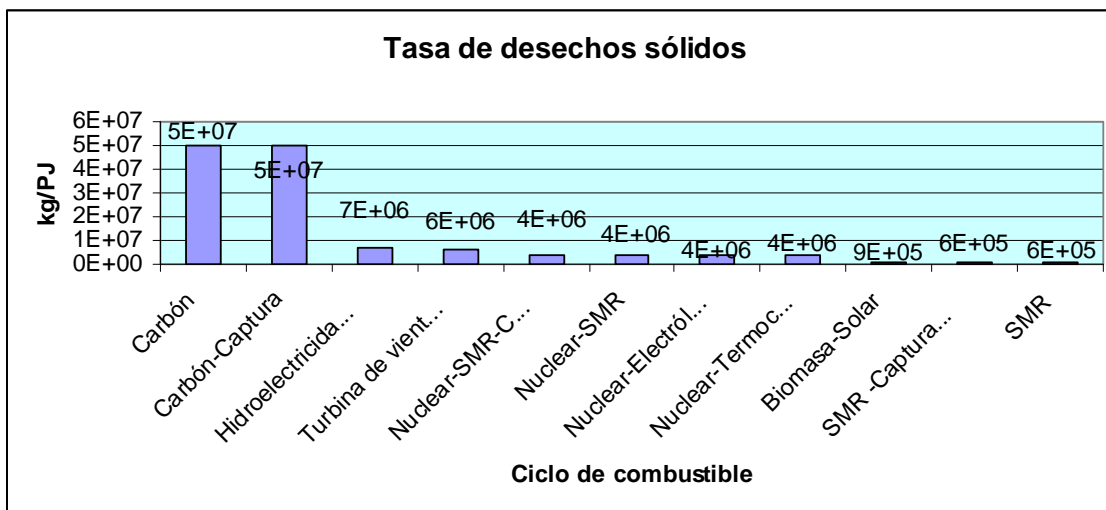


Figura 19. Gráfico del indicador AMB4.

3.2.10. AMB5. Producción de desechos radioactivos por generación energética unitaria

Los valores obtenidos para el indicador *SOCI* fueron obtenidos de las fuentes de consulta citadas en el *Capítulo II* y estandarizados de acuerdo a la metodología descrita en el mismo capítulo. Estos datos se muestran a continuación.

<i>CICLO</i>	<i>Desechos radioactivos producidos (m3/GWh)</i>	<i>Estandarizado</i>	<i>Fuente</i>
<i>Carbón</i>	0.165	0.5533	[7]
<i>Carbón-Captura</i>	0.165	0.5533	[7]
<i>Turbina de viento-Electrolisis</i>	0.008	0.9612	[7]
<i>Nuclear-SMR-Captura CO₂</i>	10	0	[7]
<i>SMR -Captura CO₂</i>	0.04	0.7443	[7]
<i>Nuclear-SMR</i>	10	0	[7]
<i>SMR</i>	0.04	0.7443	[7]
<i>Nuclear-Electrólisis</i>	10	0	[7]
<i>Hidroelectricidad-Electrolisis</i>	0.006	1	[7]
<i>Biomasa-Solar</i>	0.006	1	[7]
<i>Nuclear-Termociclos</i>	10	0	[7]

Tabla 40. Reporte de resultados para el indicador AMB5.

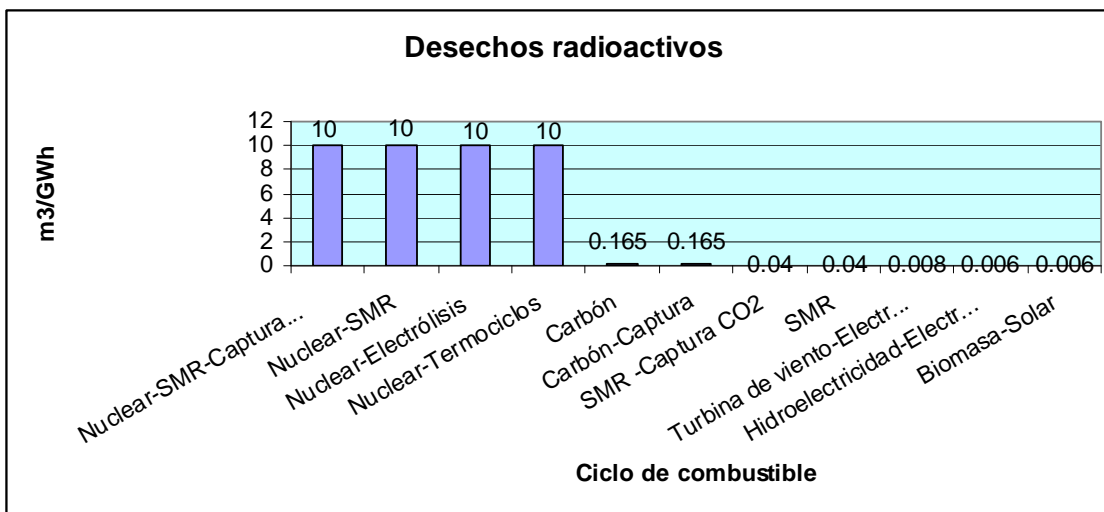


Figura 20. Gráfico del indicador AMB5.

3.2.11. AMB6. Sistemas de elevada densidad energética

Los valores obtenidos para el indicador *SOCI* fueron obtenidos de las fuentes de consulta citadas en el *Capítulo II* y estandarizados de acuerdo a la metodología descrita en el mismo capítulo. Estos datos se muestran a continuación.

CICLO	Densidad de potencia* (MW/Km ²)	Estandarizado	Fuente
Carbón	588	1	[4]
Carbón-Captura	588	1	[4]
Turbina de viento-Electrolisis	7	0.3249	[4]
Nuclear-SMR-Captura CO ₂	588	1	[4]
SMR -Captura CO ₂	588	1	[4]
Nuclear-SMR	588	1	[4]
SMR	588	1	[4]
Nuclear-Electrólisis	588	1	[4]
Hidroelectricidad-Electrolisis	0.83	0	[4]
Biomasa-Solar	7	0.3249	[4]
Nuclear-Termociclos	588	1	[4]

Tabla 41. Reporte de resultados para el indicador AMB6.

*La densidad de potencia es un valor promedio de la capacidad de generación de hidrógeno por unidad de área para cada ciclo de combustible [4].

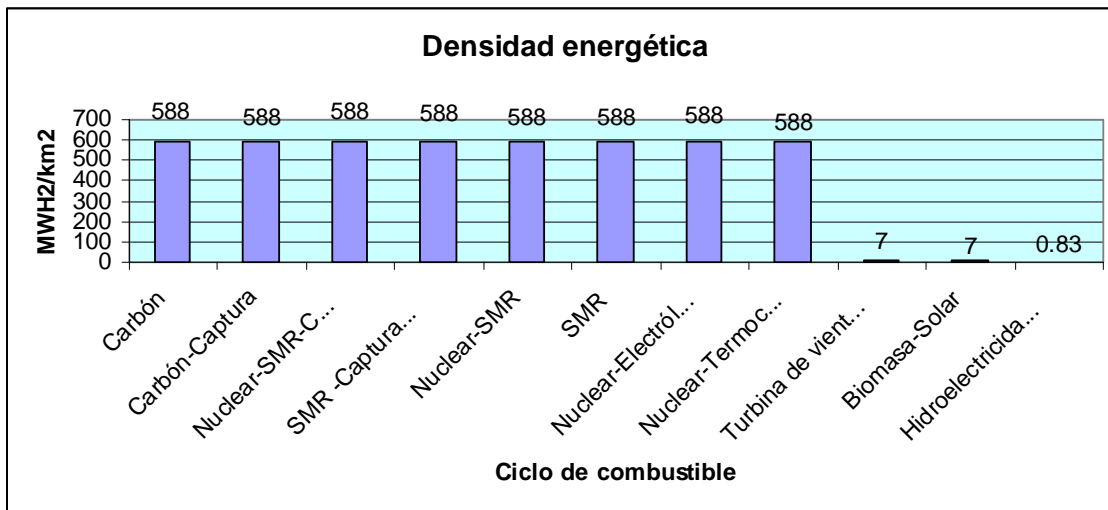


Figura 21. Gráfico del indicador AMB6.

Referencias

1. Secretaría de energía, *Balance Nacional de Energía 2005*, México D.F., 2006.
2. IER. *Externe National Implementation Germany*. The European Commission Contract JOS3-CTS3-CT95-0010, November 1997.
3. Sieverts Nielsen. *Externe National Implementation Denmark*. European Commission. Lotte Sheleisner, Technical University of Denmark, Contract JOS3-CT95-0010, December 1997.
4. Ewan B, Allen R. *A figure of merit assessment of the routes to hydrogen*, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. **30**, p. 809-819, 2005.
5. National Research Council, National Academy of Engineering, *Hydrogen economy, opportunities, costs, barriers and R&D needs*. The National Academy press, Washington D.C. 2004.
6. Martín del Campo C. y Francois J.L., “*Desarrollo de una metodología para evaluar la sustentabilidad de fuentes de generación eléctrica*”, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2006.
7. Baden-Wuttemberg, Bayern-Hessen. *ILK Statement on sustainability evaluation of nuclear energy and other electricity supply technologies*. Internationale Landerkommission Kerntechnik. No.: ILK-16 E. January 2004.

Capítulo IV. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para cada caso y escenario analizado, utilizando la metodología y los datos presentados en los capítulos anteriores.

4.1. Escenario base

CICLO	CASO BASE	CASO SOC	CASO ECO	CASO AMB
Carbón	8.82	8.19	9.52	7.66
Carbón-captura	8.41	8.00	8.59	7.62
Turbina de viento	9.53	8.16	9.34	9.93
Nuclear-SMR-Captura CO ₂	9.60	8.65	9.13	9.84
SMR -Captura CO ₂	8.61	7.72	8.06	9.01
Nuclear-SMR	10.00	8.84	10.00	9.94
SMR	8.97	7.89	8.77	9.16
Nuclear-electrólisis	8.48	8.12	6.88	9.43
Hidroelectricidad	9.85	10.00	9.33	9.00
Biomasa-solar	7.38	8.17	6.12	6.94
Nuclear-termociclos	9.66	8.68	9.13	10.00

Tabla 42. Resultados obtenidos de los ciclos de producción de hidrógeno para el escenario base.

4.1.1. Análisis de resultados

4.1.1.1. *Caso base.* De acuerdo a la metodología de Desarrollo Sostenible desarrollada en este trabajo, en el escenario de pesos equivalentes, el ciclo de combustible de reformado de gas natural que utiliza energía nuclear como fuente primaria (Nuclear-SMR) es la alternativa que cumple con los parámetros más elevados de las dimensiones Social, Económica y Ambiental. En la siguiente figura se muestra la evaluación de cada uno de los ciclos en forma de una gráfica de barras.

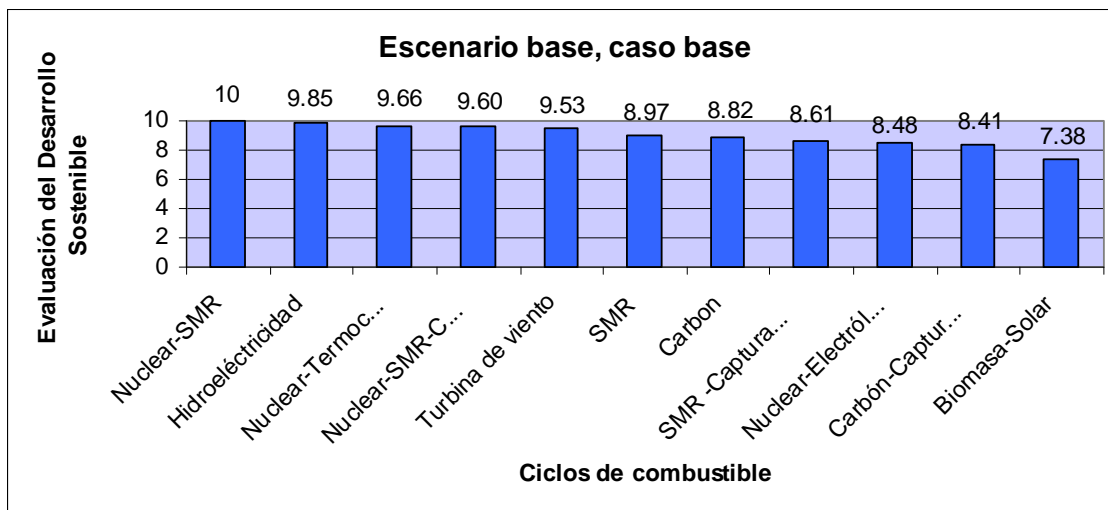


Figura 22. Gráfica de resultados para el caso base.

4.1.1.2. *Caso social.* En el caso social, el proceso de electrólisis que utiliza a la energía hidráulica como fuente de energía primaria, es el proceso mejor calificado. Cabe resaltar que con los indicadores sociales como prioridad en este escenario, la energía hidráulica sobresale con respecto a las demás por la seguridad en cuanto a la operación de la planta, así como por su participación en el sector energético mexicano. Dentro de las energías renovables es la fuente de energía con más participación.

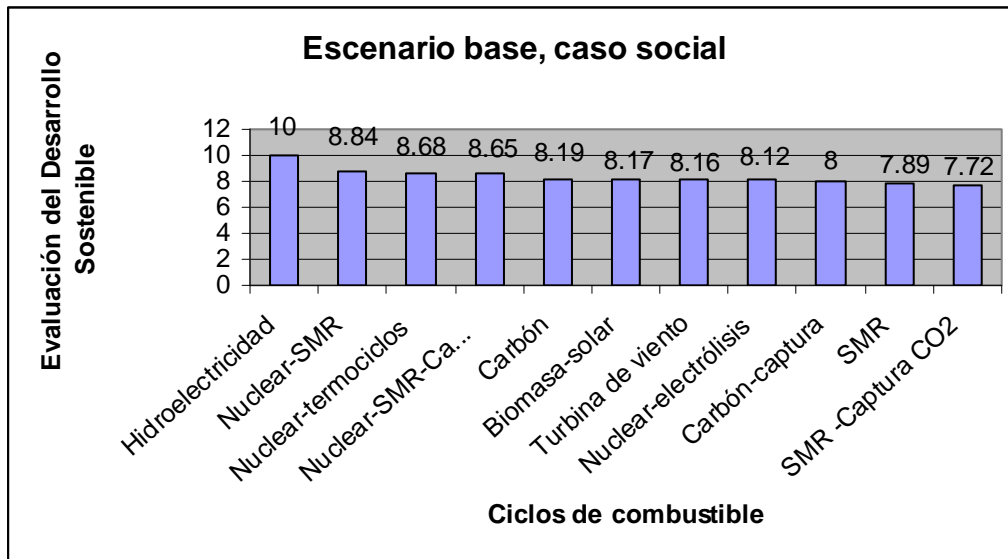


Figura 23. Gráfica de resultados para el caso social.

4.1.1.3. *Caso Económico.* Dentro de la evaluación del desarrollo sostenible, en el caso económico, el ciclo de combustible Nuclear-SMR, es la opción más viable. Dentro de los principales motivos se encuentran los bajos costos de generación de hidrógeno y la alta densidad energética de la fuente primaria.

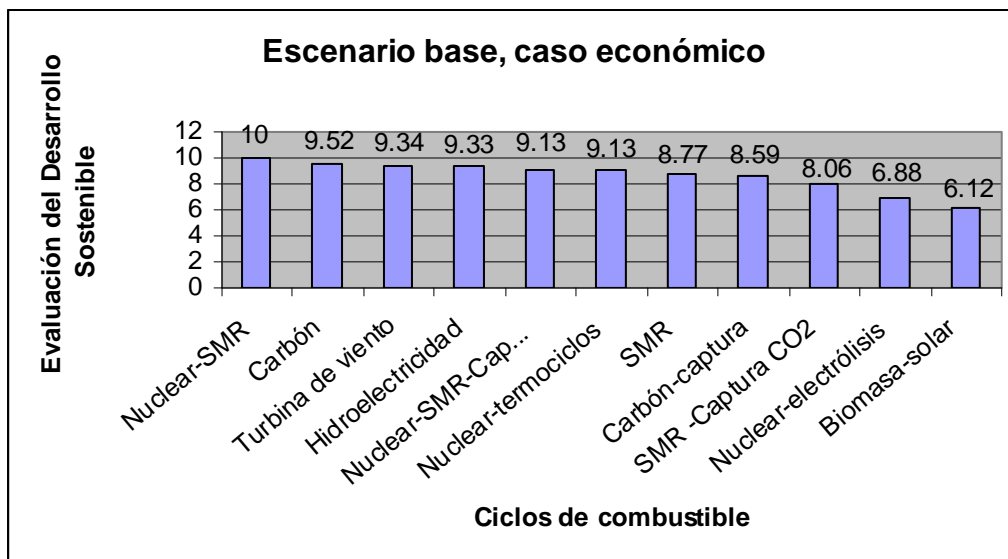


Figura 24. Gráfica de resultados para el caso económico.

4.1.1.4. *Caso ambiental.* Por último, los resultados obtenidos para el caso ambiental, el proceso de los termociclos que utiliza energía nuclear como fuente de energía primaria, es el ciclo de combustible mejor evaluado, debido a su baja emisión de gases de efecto invernadero a lo largo del ciclo de combustible.

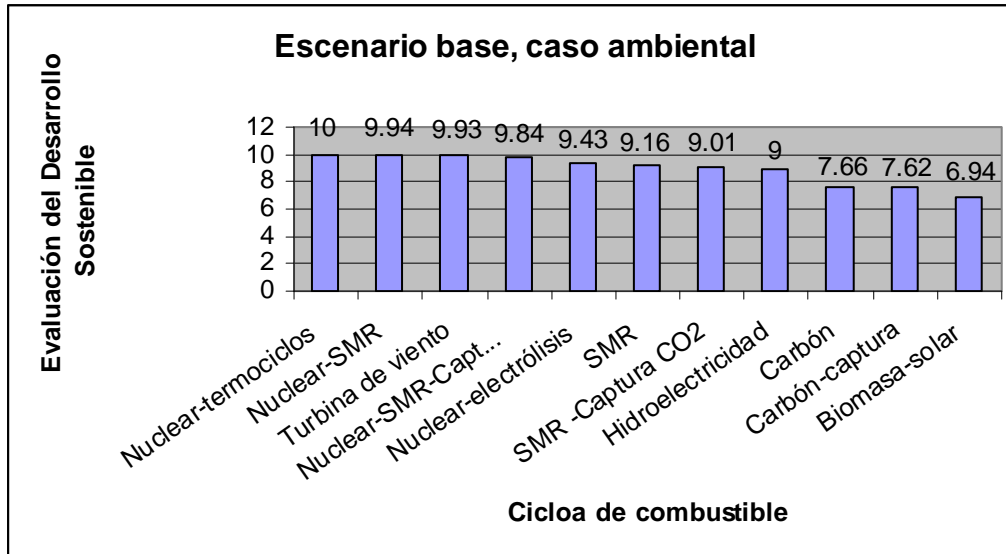


Figura 25. Gráfica de resultados para el caso ambiental.

4.2. Escenario captura de dióxido de carbono

Para la construcción de este escenario, como se ha explicado anteriormente, se han reducido los costos del proceso de captura de dióxido de carbono en un 75%, suponiendo que la tecnología de este proceso madurará con el tiempo y tendrá costos más competitivos. Por tal motivo, se espera que los procesos que utilizan la captura de CO₂, se vean beneficiados en los costos de generación de hidrógeno.

CICLO	CASO BASE	CASO SOC	CASO ECO	CASO AMB
Carbón	8.22	8.35	9.14	7.11
Carbón-Captura	8.13	8.30	8.71	7.26
Turbina de viento	9.80	9.10	9.50	9.98
Nuclear-SMR-Captura CO ₂	9.88	9.50	9.58	9.87
SMR -Captura CO ₂	8.95	8.54	8.50	9.10
Nuclear-SMR	10.00	9.58	10.00	9.80
SMR	9.10	8.64	8.85	9.13
Nuclear-Electrólisis	8.84	8.82	7.21	9.63
Hidroelectricidad	9.22	10.00	9.05	8.49
Biomasa-Solar	6.87	7.98	5.97	6.57
Nuclear-Termociclos	9.83	9.46	9.26	10.00

Tabla 43. Resultados obtenidos de los ciclos de producción de hidrógeno para el escenario reducción en los costos de captura.

4.2.1. Análisis de resultados

4.2.1.1. *Caso base.* Tomando en cuenta que las calificaciones por dimensiones del desarrollo sostenible es equitativa (pesos equivalentes), la evaluación del desarrollo sostenible para el caso base, encuentra la combinación energía nuclear y reformado de gas natural como la fuente mejor calificada. Cabe resaltar que el proceso similar que utiliza captura de dióxido de carbono (Nuclear-SMR-Captura CO₂) subió considerablemente con respecto al escenario base al igual que el proceso de reformado de gas natural con captura de carbono (SMR -Captura CO₂). Sin embargo tomando en cuenta los demás indicadores de la metodología, aún siguen siendo una segunda alternativa debido a las emisiones atmosféricas asociadas a su ciclo de combustible.

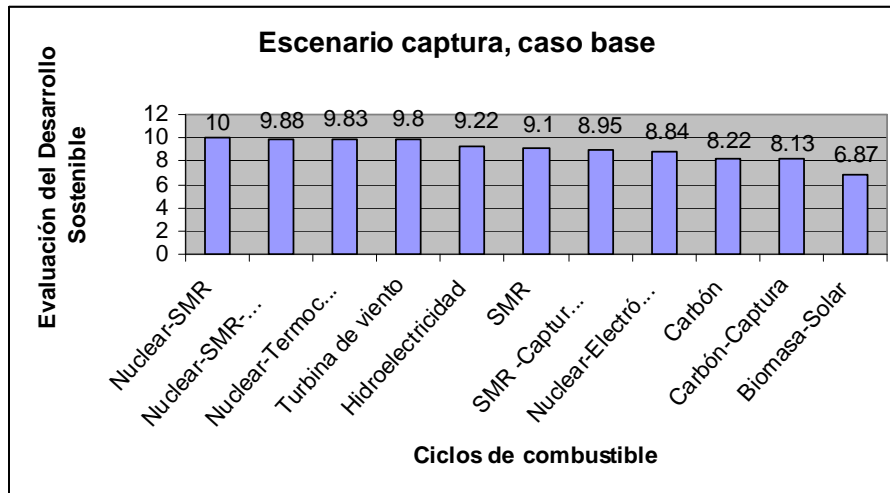


Figura 26. Gráfica de resultados para el escenario captura de dióxido de carbono, caso base.

4.2.1.2. *Caso social.* En este caso, la tecnología mejor evaluada sigue siendo la hidroelectricidad, pero cabe resaltar que con el descuento aplicado a los procesos de captura de dióxido de carbono, éstos se vuelven más competitivos.

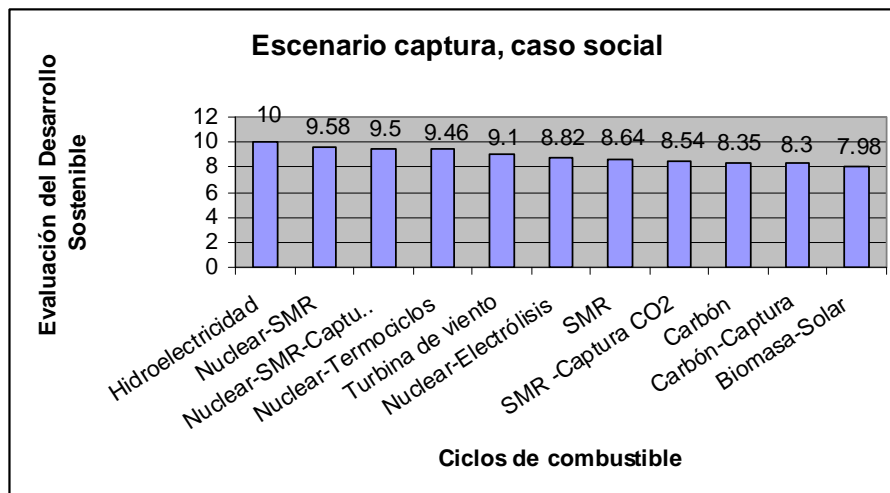


Figura 27. Gráfica de resultados para el escenario captura de dióxido de carbono, caso social

4.2.1.3. *Caso económico.* En el caso en que tienen prioridad los indicadores de la dimensión económica, el binomio energía nuclear-reformado de gas es la mejor opción.

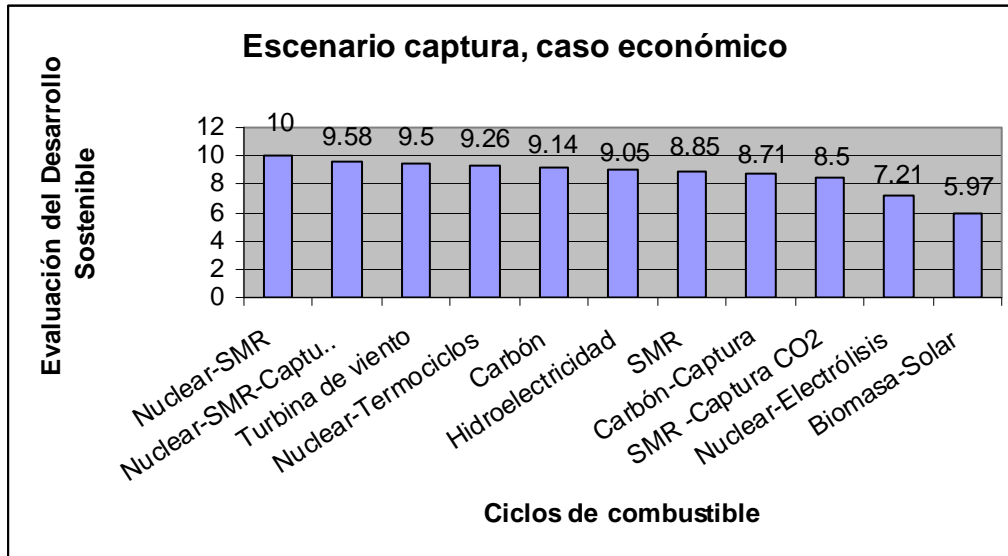


Figura 28. Gráfica de resultados para el escenario captura de dióxido de carbono, caso económico.

4.2.1.4. *Caso ambiental.* En este caso la reducción del costo de captura de carbono no expone avances significativos con respecto al caso base, el proceso de los termociclos que utilizan tecnología nuclear como fuente de energía primaria es la mejor opción y sólo puede compararse con la energía eólica-electrólisis. Aunque la turbina de viento es el ciclo de combustible que menos contamina. De la gama de procesos estudiados, haciendo un análisis global con las tres dimensiones del desarrollo sostenible, es considerada todavía como una segunda opción, sólo un poco por debajo de los termociclos.

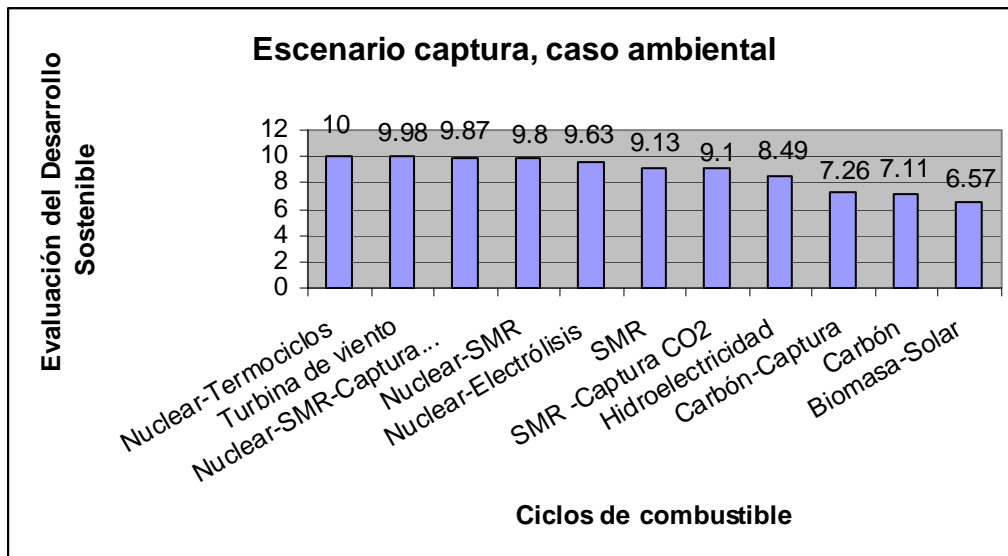


Figura 29. Gráfica de resultados para el escenario captura de dióxido de carbono, caso ambiental.

4.3. Escenario Outlook 2020

En este escenario se tomaron las referencias del *World Energy Outlook* publicado por la Agencia Internacional de Energía. En este documento se presentan una serie de proyecciones a futuro de crecimiento energético en México y otros países. Es importante decir que tanto el escenario Outlook 2020 y 2030 están sujetos a políticas energéticas y modelos de producción propios de un país.

CICLO	CASO BASE	CASO SOC	CASO ECO	CASO AMB
Carbón	8.04	7.96	9.45	7.49
Carbón-Captura	7.79	7.80	8.56	7.46
Turbina de viento	10.00	9.35	9.70	10.00
Nuclear-SMR-Captura CO ₂	9.58	8.66	9.18	9.61
SMR -Captura CO ₂	8.50	7.09	7.91	8.59
Nuclear-SMR	9.85	8.81	10.00	9.69
SMR	8.78	7.23	8.59	8.74
Nuclear-Electrólisis	8.74	8.23	7.04	9.23
Hidroelectricidad	9.09	10.00	9.44	8.90
Biomasa-Solar	5.62	4.13	5.10	5.71
Nuclear-Termociclos	9.68	8.68	9.17	9.75

Tabla 44. Resultados obtenidos de los ciclos de producción de hidrógeno para el escenario Outlook 2020.

4.3.1. Análisis de resultados

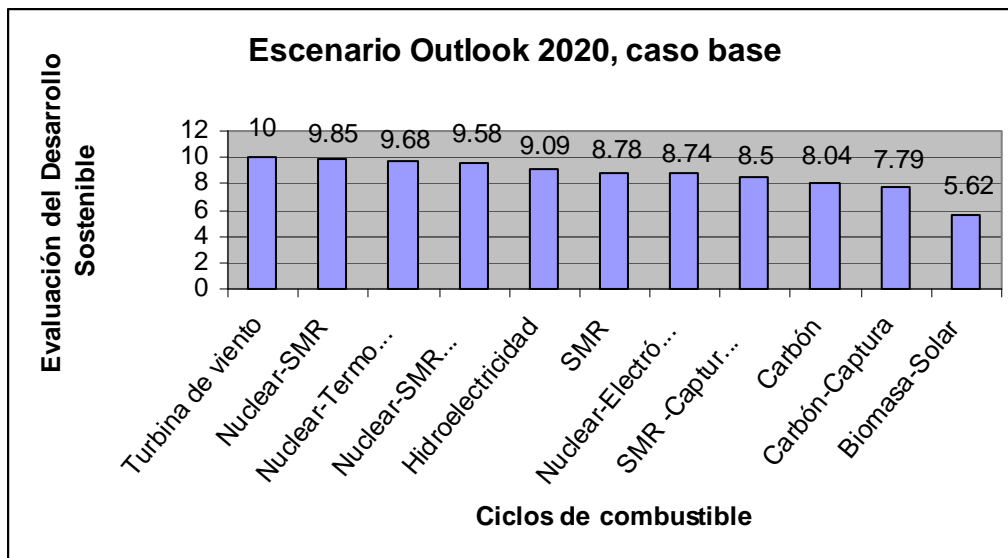


Figura 30. Gráfica de resultados para el escenario Outlook 2020, caso base.

4.3.1.1. *Caso base.* De acuerdo a las proyecciones mostradas en el *World Energy Outlook* para el año 2020, el ciclo de combustible mejor evaluado es el de la electrólisis que

utiliza energía eólica como fuente energética primaria. En el documento expedido por la Agencia Internacional de Energía se prevé que hasta el 2020, la energía eólica crecerá a una tasa de 4.1% en México.

4.3.1.2. *Caso social.* De acuerdo a las proyecciones de crecimiento de la Agencia Internacional de Energía, para el año 2020, el proceso que utiliza energía hidráulica como fuente primaria es la tecnología mejor evaluada. A pesar de que la biomasa y el gas natural crecerán aceleradamente, a una tasa de 4.9 y 11.5%, respectivamente, la mejor opción sigue siendo la energía hidráulica.

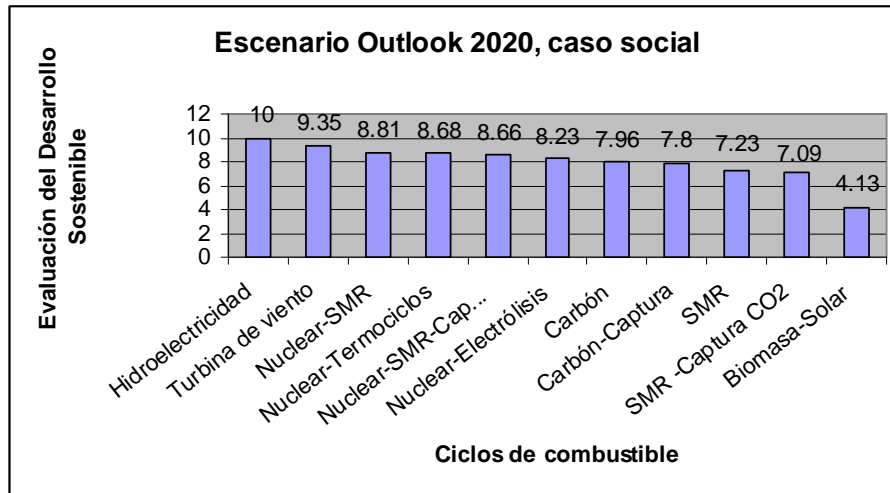


Figura 31. Gráfica de resultados para el escenario Outlook 2020, caso social.

4.3.1.3. *Caso económico.* Al igual que el caso base estudiado, dentro de la evaluación que enfatiza más los indicadores económicos, la energía nuclear en combinación con el proceso de reformado de gas natural es la mejor opción. A pesar de que en el documento expedido por la Agencia Internacional de Energía se prevé un crecimiento del 0.1% para la energía nuclear, este ciclo de combustible resulta ser el mejor evaluado.

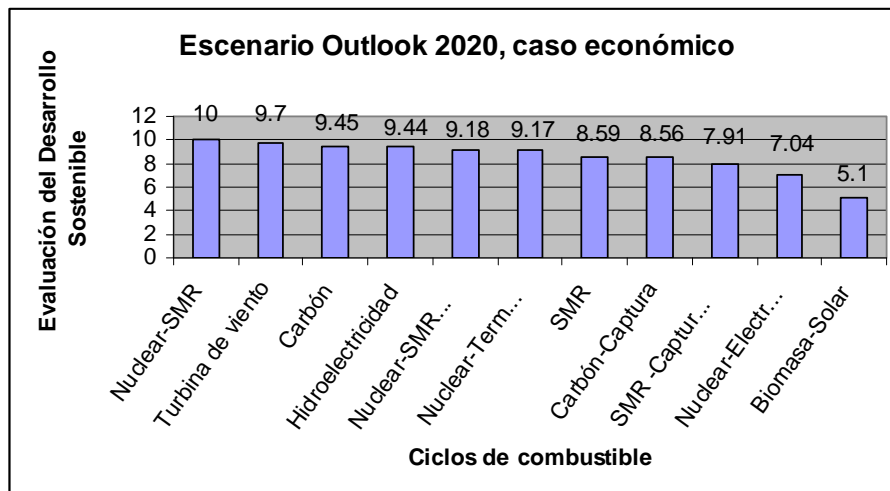


Figura 32. Gráfica de resultados para el escenario Outlook 2020, caso económico.

4.3.1.4. *Caso ambiental.* Para este caso se encuentra que la combinación electrólisis-energía eólica es la opción mejor evaluada, debido principalmente a la tasa de crecimiento estimada para el 2020 de la energía eólica.

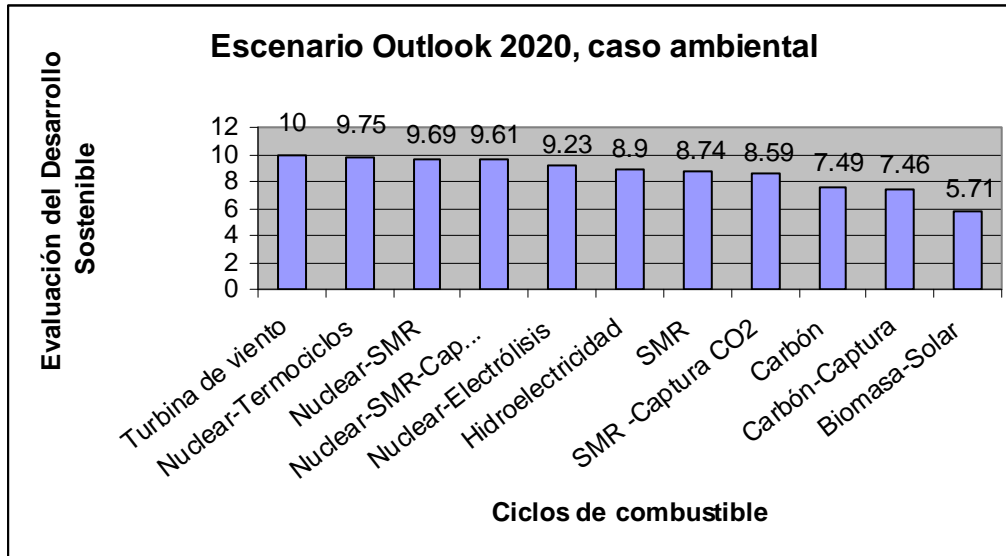


Figura 33. Gráfica de resultados para el escenario Outlook 2020, caso ambiental.

4.4. Escenario Outlook 2030

CICLO	CASO BASE	CASO SOC	CASO ECO	CASO AMB
Carbon	8.03	7.97	9.47	7.48
Carbón-Captura	7.78	7.81	8.57	7.45
Turbina de viento	10.00	9.39	9.71	10.00
Nuclear-SMR-Captura CO ₂	9.55	8.62	9.17	9.58
SMR -Captura CO ₂	8.53	7.22	7.96	8.62
Nuclear-SMR	9.83	8.78	10.00	9.67
SMR	8.81	7.37	8.64	8.77
Nuclear-Electrólisis	8.71	8.17	7.00	9.20
Hidroelectricidad	9.08	10.00	9.43	8.89
Biomasa-Solar	5.63	4.22	5.13	5.73
Nuclear-Termociclos	9.66	8.64	9.16	9.73

Tabla 45. Resultados obtenidos de los ciclos de producción de hidrógeno para el escenario Outlook 2030.

4.4.1. Análisis de resultados

4.4.1.1. *Caso base.* Con un crecimiento porcentual de 4.1%, al año 2030, la tecnología mejor evaluada es el proceso de producción de hidrógeno que utiliza energía eólica.

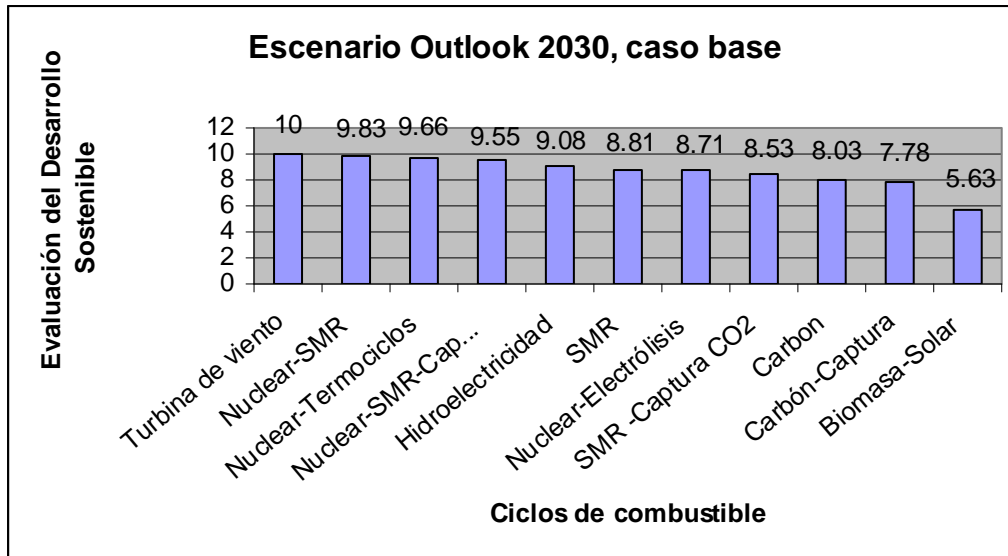


Figura 34. Gráfica de resultados para el escenario Outlook 2030, caso base.

4.4.1.2. *Caso social.* Considerando un crecimiento porcentual del 2.6% de crecimiento anual al año 2030, la energía hidráulica es el ciclo de combustible mejor evaluado.

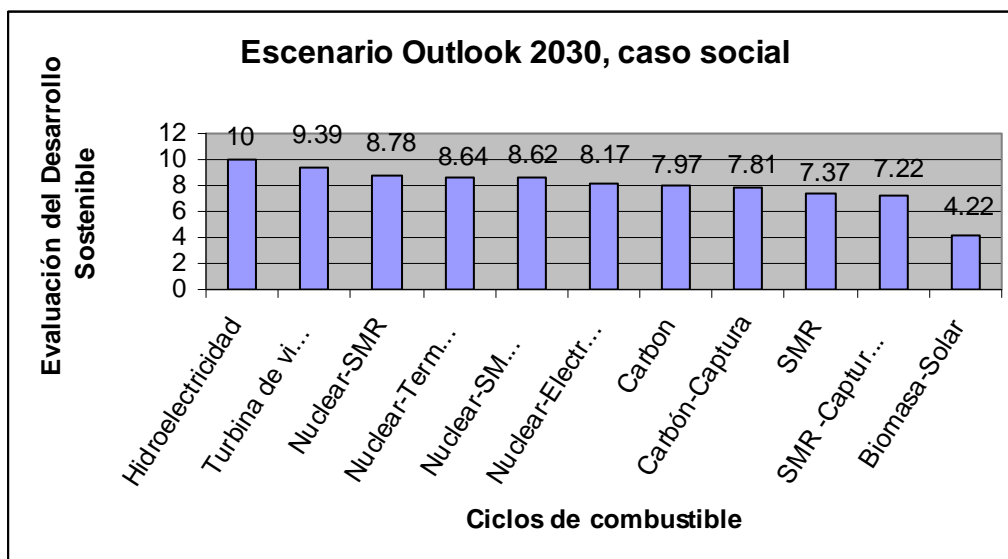


Figura 35. Gráfica de resultados para el escenario Outlook 2030, caso social.

4.4.1.3. *Caso económico.* A pesar de que en el World Outlook Energy pronostican que no habrá crecimiento en el suministro de energía nuclear, permanecerá constante con 19.427 Mtoe (Mega toneladas equivalentes de petróleo), el proceso Nuclear-SMR, continúa siendo la mejor opción para la producción de hidrógeno.

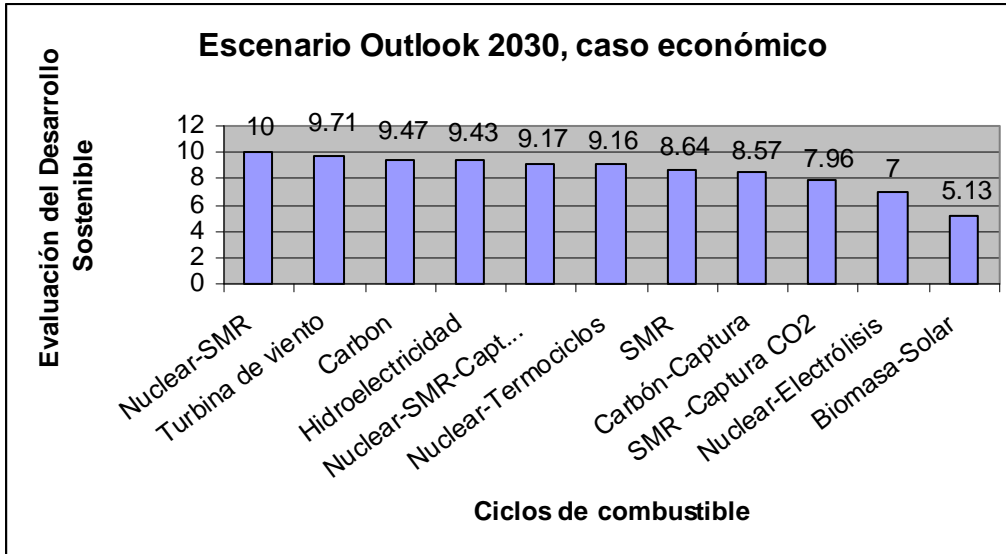


Figura 36. Gráfica de resultados para el escenario Outlook 2030, caso económico.

4.4.1.4. *Caso ambiental.* De acuerdo a un crecimiento anual del 4.1% hasta el año 2030 especulado por la Agencia Internacional de Energía, la energía eólica es la mejor opción para la producción de hidrógeno en este caso.

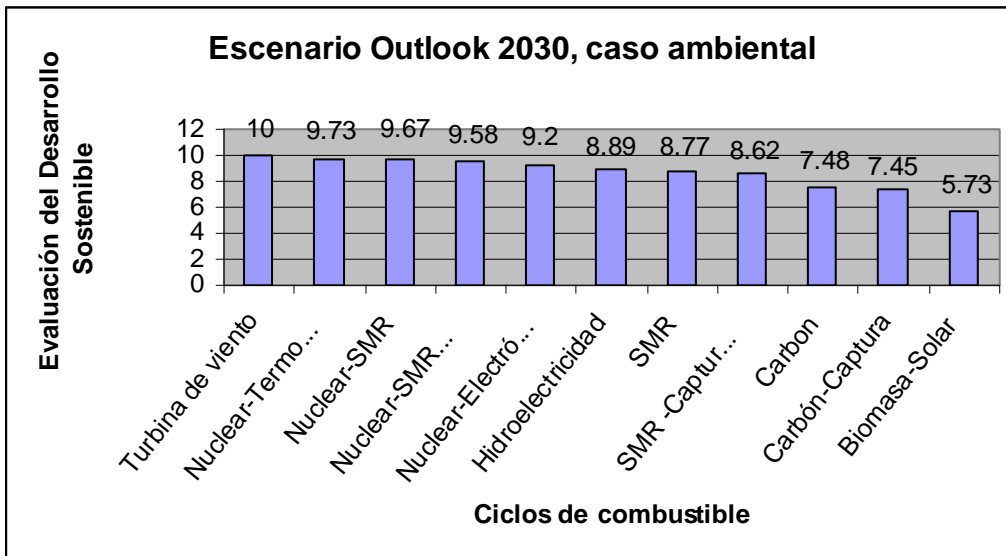


Figura 37. Gráfica de resultados para el escenario Outlook 2030, caso ambiental.

CONCLUSIONES

Con base en la metodología aplicada podemos realizar tres conclusiones muy importantes. La primera basada en un escenario actual, la segunda fundamentada en la reducción de los costos de los procesos de captura de CO₂ en 75% y por último, una proyección a los años 2020 y 2030.

Con base a datos actuales podemos comentar las siguientes conclusiones:

- Cuando los indicadores fueron evaluados con pesos equivalentes (Caso base). El ciclo de producción mejor evaluado para la producción de hidrógeno es el proceso de reformado de gas natural que utiliza energía nuclear como fuente de energía primaria.
- Cuando los indicadores sociales son prioridad (Caso social). El ciclo mejor evaluado es la electrólisis que utiliza energía eléctrica proveniente de una central hidráulica.
- Cuando los indicadores económicos son prioridad (Caso económico). Nuevamente el proceso mejor evaluado es la combinación nuclear-reformado de gas natural.
- Mientras que cuando los indicadores de la dimensión ambiental son prioridad (Caso ambiental), el ciclo mejor evaluado es el proceso de los termociclos que utiliza energía nuclear como fuente de energía primaria.

Para el escenario de reducción de los costos de captura de dióxido de carbono, los procesos mejor evaluados son los siguientes:

Con los indicadores equivalentes y para el caso económico, la tecnología mejor calificada es el ciclo energía nuclear-reformado de gas. Mientras que cuando la prioridad fueron los indicadores de la dimensión social, la combinación hidráulica-electrólisis es la mejor opción. Para el caso ambiental, la tecnología mejor evaluada es el proceso de los termociclos.

Escenario de proyecciones. De acuerdo a las proyecciones de los años 2020 y 2030, tenemos las siguientes conclusiones:

- Cuando los indicadores fueron evaluados con pesos equivalentes, la fuente mejor calificada es la electrólisis que utiliza energía eléctrica proveniente de un parque eólico, esto se debe principalmente a que las tasas de crecimiento estimadas para las fuentes renovables en el año 2030, la energía eólica crecerá en un porcentaje anual del 4.3% en México desde 2005.
- Cuando los indicadores sociales son prioridad, la electrólisis que utiliza electricidad proveniente de una central hidráulica es el ciclo mejor evaluado.
- Cuando los indicadores económicos son prioridad, el proceso de reformado de gas natural que utiliza energía nuclear es el ciclo mejor evaluado.
- Cuando los indicadores ambientales son prioridad, el proceso mejor evaluado por la metodología del desarrollo sostenible, es la combinación de electrólisis-energía eólica

nuevamente, por diferentes razones: es un proceso de los más limpios en cuanto a externalidades ambientales y por las altas tasas de crecimiento de la energía eólica en nuestro país.

El futuro de la producción de hidrógeno debe estar basado en los ciclos de combustible sostenibles.

Para los ciclos de combustible aquí analizados se tienen los siguientes comentarios.

Energías renovables

Las energías renovables como la solar y la eólica, ofrecen grandes ventajas para la reducción de externalidades ambientales, sin embargo la investigación y desarrollo deberá estar centrada en la competitividad económica y el incremento en las eficiencias de conversión de energía. También estas energías renovables tienen la limitante de estar sujetas a condiciones geográficas como áreas de velocidad de viento favorable (eólica) y de irradiación solar.

En cuanto a la producción de hidrógeno por medio de fuentes renovables, sólo podrían cubrirse necesidades residenciales.

Hidrocarburos

En un futuro inmediato, la gasificación de carbón y el proceso de autoreformado de gas natural son las fuentes convencionales de producción de hidrógeno. Sin embargo las externalidades ambientales asociadas a estos ciclos han motivado la investigación en ciclos de combustible que los suplan por tecnologías más limpias.

La investigación y desarrollo de los ciclos que utilizan hidrocarburos están enfocados al incremento en las tasas de secuestro de carbón y la reducción en sus costos.

Energía nuclear

Los procesos basados en energía nuclear son los ciclos en los cuales se ha considerado la fuente de energía primaria óptima para la producción centralizada comercial e industrial. Esto se debe a que las plantas de energía nuclear podrían cubrir necesidades energéticas mayores a las de energía solar y eólica, además las externalidades ambientales asociadas cumplen rigurosos estándares de manejo y disposición final de desechos radioactivos; en los últimos años se ha demostrado que la energía nuclear no representa un peligro social. Países como Francia, Suiza y Japón utilizan uranio y plutonio dentro de su canasta de combustibles.

Energía nuclear-reformado de gas. Este ciclo de combustible comparte, con los procesos que utilizan hidrocarburos, la investigación sobre las técnicas para reducir los costos e

incrementar las eficiencias de los procesos de captura de carbono. Además para evitar graves repercusiones en el mercado energético debe evitarse saturar el mercado de gas natural. México es un país importador de este recurso.

Energía nuclear-electrólisis. La electrólisis alcalina es un ciclo de combustible muy prometedor en México para incrementar los niveles de producción de hidrógeno y generar escenarios de transición energética a la economía de este combustible. Sin embargo en México sólo contamos con un reactor nuclear y debido a la demanda del sector eléctrico es muy difícil pensar en que pueda destinarse parte de la electricidad generada en “Laguna Verde” para un proceso de electrólisis. En países como Canadá se han propuesto proyectos para aprovechar las curvas de demanda eléctrica durante el día, y así producir hidrógeno cuando ésta disminuye.

Como alternativa a los procesos de fractura de la molécula de agua, la investigación y desarrollo está enfocada a la electrólisis de alta temperatura. Para este proceso los reactores nucleares de cuarta generación son considerados como fuente de energía primaria.

- El proyecto de generación cuatro “GIF-IV” (por sus siglas en inglés) cuenta con un manifiesto de desarrollo sostenible en donde son presentadas las bondades de estos reactores.
- Para generar un combustible limpio es necesario el ciclo de combustible más limpio posible. Para la generación a gran escala de hidrógeno la energía nuclear es quien cuenta con un programa de disposición integral de desechos, sólidos y radioactivos. Utilizan ciclos de combustible cerrados para el manejo de uranio, esto incrementa el aprovechamiento del mineral y reduce los desechos radioactivos generados.
- La tecnología de altas temperaturas puede cubrirse por medio de los reactores de generación cuatro.

Ciclos termoquímicos

El proceso de termociclos es uno de los procesos mejor evaluados dentro de esta tesis. Como se ha enunciado a lo largo del trabajo ofrece muchas bondades ambientales, económicas y sociales. Sin embargo, el proceso aún se encuentra en la fase de escalamiento de la planta, y la investigación y desarrollo está basado en el desarrollo de materiales que resistan las condiciones corrosivas de los ácidos sulfúrico y yodhídrico.

Finalmente, como una extensión de la tesis, podrían considerarse los siguientes puntos para mejorar la investigación en un futuro.

- Cuando exista la información suficiente, anexar el proceso de electrólisis de alta temperatura a la evaluación de los ciclos de combustible.
- Actualizar los datos de las externalidades de las fuentes de energía con datos provenientes de México en donde la contabilización de estos impactos no es realizada de forma rigurosa; los datos utilizados en esta tesis fueron tomados de reportes emitidos por la comunidad europea.

APENDICES

A. Energía Nuclear (fuente: Externe Alemania)

Definición del ciclo de combustible

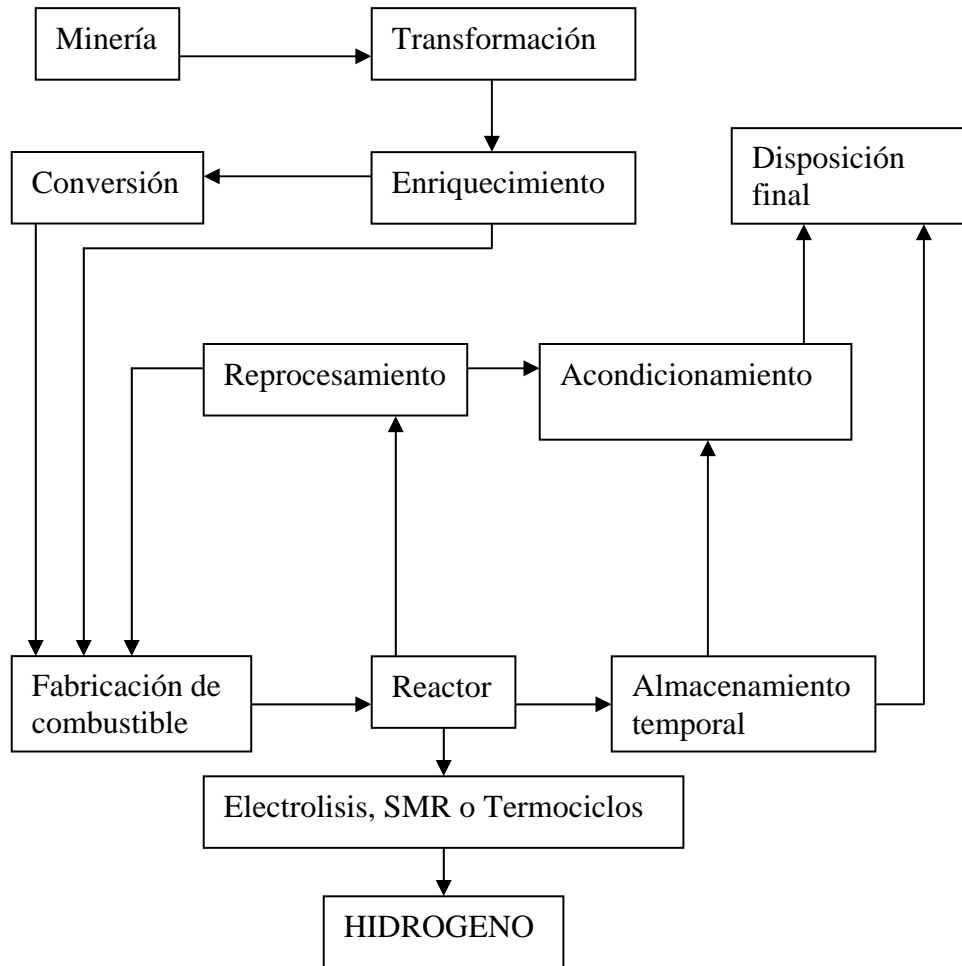


Figura 38. Ciclo de combustible de los procesos que utilizan energía nuclear

Externalidades asociadas al ciclo de combustible nuclear.

En la siguiente tabla se encuentran datos relacionados con las etapas del ciclo de combustible de energía nuclear y sus externalidades. Esta información fue tomada del estudio Externe de Alemania.

Etapa	Parámetros	Valor
1. Mina	Requerimientos de potencia de la planta	
	Uranio	23.7 t/TWh
2. Conversión	Origen del uranio: Canadá	
	Operado por COMHUREX, Francia	
	Conversión a UF4	
	Ubicación: Malvesi, Francia	
	Capacidad	11000 t/año
	Conversión a UF6	
	Ubicación	Pierrelatte, Francia
	Capacidad	8700 t/año
	Requerimientos de potencia	
	UF6	20.03 t/TWh
3. Enriquecimiento	Difusión gaseosa	
	Operado por EURODIF, Francia	
	Ubicación	Pierrelatte, Francia
	Uso eléctrico	Planta de potencia nuclear Tricastin, Francia
4. Fabricación de combustible	UO2	
	Operado por: FBFC	
	Ubicación	Pierrelatte, Francia
	Capacidad	600 Tuo2/AÑO
	Requerimientos de potencia	2.29 t/TWh(24.6t/año)
5. Generación de potencia	Combustible	UO2
	Tecnología	PWR
	Ubicación	Sureste de Alemania
	Potencia instalada	1400 MWe
	Factor de Planta	89%
	Quemado de combustible	50 MWd/kg

Continuación de tabla.

6. Reprocesamiento	Operado por: COGEMA
	Ubicación La Hague, Francia
	Procedimiento PUREX
	Capacidad de UP3 800 t/año
	Requerimientos de potencia 2.29 t/TWh(24.6t/año)
7. Depósito de desechos	Subterráneos
8. Transporte	Carretera, ferrocarril

Tabla 46. Etapas del ciclo de combustible nuclear

Daños en salud ocupacional del ciclo de combustible

Etapas	Parámetros	Valor
1. Mina	Salud ocupacional	
	Accidentes-fatalidades	3.1E-4/TWh
	Accidentes-riesgo mayor	6.8E-3/TWh
	Accidentes-riesgo menor	1.4E-1/TWh
2. Conversión	Salud ocupacional	
	Accidentes-fatalidades	1.3E-4/TWh
	Accidentes-riesgo mayor	1.7/TWh
	Accidentes-riesgo menor	5.0E-2/TWh
3. Enriquecimiento	Salud ocupacional	
	Accidentes-fatalidades	2.6E-4/TWh
	Accidentes-riesgo mayor	3.6E-3/TWh
	Accidentes-riesgo menor	1.0E-1/TWh
4.Fabricación de combustible	Salud ocupacional	
	Accidentes-fatalidades	1.3E-4/TWh
	Accidentes-riesgo mayor	1.7E-3/TWh
	Accidentes-riesgo menor	5.0E-2/TWh

Continuación de tabla.

Etapa	Parámetros	Valor
5. Generación de potencia	Salud ocupacional	
	Accidentes-fatalidades	7.8E-4/TWh
	Accidentes-riesgo mayor	1.7E-3/TWh
	Accidentes-riesgo menor	8.1E-1/TWh
6. Reprocesamiento	Salud ocupacional	
	Accidentes-fatalidades	4.0E-4/TWh
	Accidentes-riesgo mayor	5.4E-3/TWh
	Accidentes-riesgo menor	1.4E-2/TWh
7. Depósito de desechos	Salud ocupacional	
	Accidentes-fatalidades	n.c.*
	Accidentes-riesgo mayor	n.c.*
	Accidentes-riesgo menor	n.c.*
8. Transporte	Salud ocupacional	
	Accidentes-fatalidades	n.c.*
	Accidentes-riesgo mayor	n.c.*
	Accidentes-riesgo menor	n.c.*
9. Construcción y desmantelamiento	Salud ocupacional	
	Accidentes-fatalidades	5.7E-3/TWh
	Accidentes-riesgo mayor	1.6E-1/TWh
	Accidentes-riesgo menor	6.5/TWh
Todas las etapas	Emisiones no radioactivas	
	SO ₂	32 g/MWh
	NO _x	70 g/MWh
	PM ₁₀	7 g/MWh
	CO ₂	19700 g/MWh

Tabla 47. Externalidades asociadas del ciclo de combustible nuclear

*n.c. No cuantificado

B. Gas Natural (fuente: Externe Alemania)

Definición del ciclo de combustible

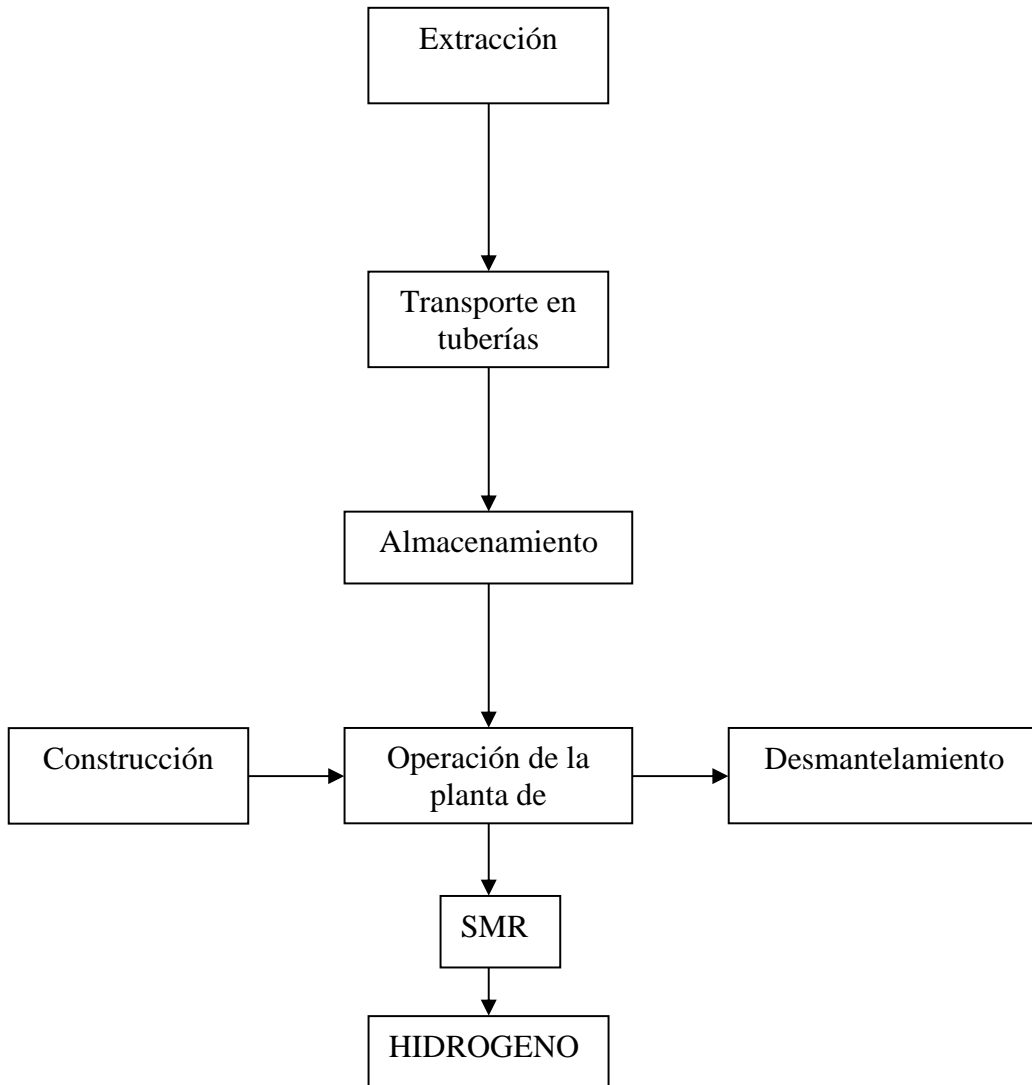


Figura 39. Ciclo de combustible de los procesos que utilizan gas natural

Definición del ciclo

de combustible

En la siguiente tabla se encuentran datos relacionados con las etapas del ciclo de combustible del gas natural y sus externalidades. Esta información fue tomada del estudio Externe de Alemania.

Etapa	Parámetros	Valor	
Propiedades del combustible	Valor calorífico		
	MJ/kg	43.6	
1. Extracción del gas	Composición		
	S	0%	
	Ubicación	15% Alemania, 22% Netherlands (NL), 28% Norway (N), 32% GUS, 2.5% Denmark, 0.5% UK	
	Producción de gas	No especificada	
	Composición del gas		
	Metano	86.6/86.6/92.8/96%	
	Etano	1.1/3.0/4.6/1.7%	
	Propano	0.9/0.5/0.6/0.6%	
	Butano	0.6/0.1/0.2/0.2%	
	Nitrógeno	3.5/8.7/0.9/1.0%	
	Dióxido de carbono	3.9/1.0/1.0/0.1/	
	Sulfuro de hidrógeno	3.6/0.0/0.0/0.5%	
	Valor calorífico	41/42/48/49 MJ/kg	
	2. Transporte del gas	Modo de transporte	Tubería
		Distancia de tubería	Alemania 250 km Netherlands 600 km Norway 1700 km GUS 7000 km
Diámetro de tubería		n.e.*	
Volumen de gas transportado		n.e.*	
Emisiones al aire			
NOX		6690 kg/año	
CH4		58 t/año	
CO2		1130 t/año	
Continuación de tabla...			
Etapa		Parámetros	Valor
	Horas totales	675 h/año	
	Tiempo de vida	35 años	
	Control de	Ninguna	

contaminación	
Tamaño de la planta	
Área de tierra requerida	0.5 ha
Sistema de enfriamiento	
Altura	170 m
Diámetro	6 m
Emisiones al aire	
Volumen de	
gas	1681592 Nm ³ /h
Temperatura de	
gas	433 K
CO ₂	604 g/kWh
TSP	n.e.*
SO ₂	n.e.*
NO _x	n.e.*

Tabla 48. Etapas del ciclo del gas natural
 *n.e. No especificado

Daños en salud ocupacional producto del ciclo de combustible

Etapa	Quemado	Cantidad
1. Extracción del gas	Salud ocupacional	
	Accidentes-fatalidades	3.1E-5/Mm ³
	Accidentes-daño mayor	3.7E-4/Mm ³
	Accidentes-daño menor	3.4E-3/Mm ³
	Emisiones al aire	
		14.0
	CO ₂	kg/MWh
	SO ₂	5.6 g/MWh
		52.2
	NO _x	g/MWh
	30.1	
	PM10	g/MWh
		2257
	CH ₄	g/MWh

Continuación de tabla...

Etapa	Quemado	Cantidad
2. Transporte de gas	Salud ocupacional	
	Accidentes-fatalidades	n.c.*

	Accidentes-daño mayor	n.c.*
	Accidentes-daño menor	n.c.*
	Emisiones al aire	
		11.5
	CO2	kg/MWh
	SO2	0.1 g/MWh
		68.0
	NOX	g/MWh
	PM10	0.9 g/MWh
		584.8
	CH4	g/MWh
5. Construcción	Salud ocupacional	
	Accidentes-fatalidades	0.0020/TWh
	Accidentes-daño mayor	0.060/TWh
	Accidentes-daño menor	2.4/TWh
	Emisiones al aire	
	CO2	n.c.*
	SO2	n.c.*
	NOX	n.c.*
	PM10	n.c.*
	CH4	n.c.*
6. Demolición	Salud ocupacional	
	Accidentes-fatalidades	9.5E-5/TWh
	Accidentes-daño mayor	0.0023/TWh
	Accidentes-daño menor	0.086/TWh

Tabla 49. Externalidades asociadas del ciclo de combustible del gas natural

*n.c. No cuantificado

Mm³ Millones de metros cúbicos

C. Carbón (fuente: Externe Alemania)

Definición del ciclo de combustible

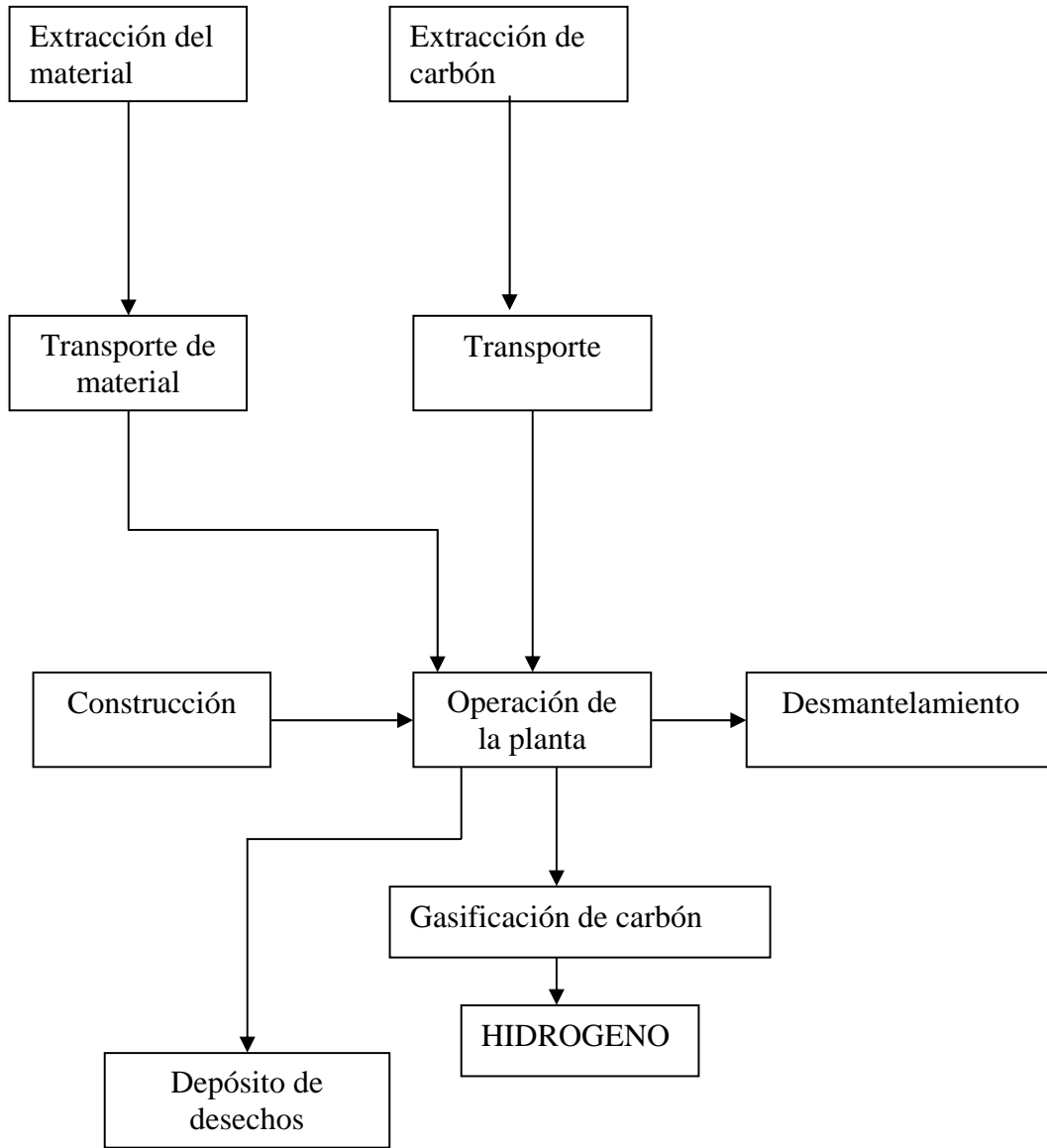


Figura 40. Ciclo de combustible de los procesos que utilizan carbón

Definición del ciclo de combustible

En la siguiente tabla se encuentran datos relacionados con las etapas del ciclo de combustible del carbón y sus externalidades. Esta información fue tomada del estudio Externe de Alemania.

Etapa	Parámetro	Valor
1. Minería	Ubicación	Ruhrgebiet & Saarland Germany
	Tipo de mina	Subterránea
	Valor calorífico	29.2 MJ/kg
	Control de la calidad	n.e.*
	Control de emisiones de metano	n.e.*
	Composición del carbón	
	Agua	n.e.*
	Trazas	7%
	Carbón	74.30%
	Oxígeno	3-9%
	Azufre	0.90%
	Hidrógeno	4.5-5.6%
	Cloro	0.005-0.3%
	Nitrógeno	0.8-2%
	2. Transporte de Carbón	
	Distancia a la estación de potencia	300 km
	Modo de transporte	33% tren, 66% camión
3. Limpieza del carbón		n.e.*
4. Extracción del mineral		n.e.*
5. Transporte del mineral		
	Distancia a la estación de potencia	200 km
	Modo de transporte	Carretera
6. Transporte de desechos		
	Lugar	No especificado
	Distancia de traslado	200 km
	Modo de transporte	Camión
7. Deposito de desechos		Landfil
8. Construcción de la planta de potencia		
	Demanda de materiales	168000 t
		Concreto 48000t

Tabla 50. Etapas del ciclo del carbón

*n.e. No especificado

Daños en salud ocupacional producto del ciclo de combustible

Etapa	Parámetros	Valor
1. Minería		
	Salud ocupacional	
	Accidentes- fatalidades	0.55/Mt
	Emisiones al aire	
		31.1
	CO2	kg/MWh
	SO2	35.1G/MWh
	NOX	20.5g/MWh
	PM10	2.9 g/Mt
	CH4	328 g/MWh
2. Transporte		
	Salud ocupacional	
	Accidentes- fatalidades	0.081/Mt
	Emisiones al aire	
		2.9
	CO2	kg/MWh
	SO2	3 g/MWh
		23.8
	NOX	g/MWh
	PM10	0.6 g/MWh
	CH4	n.r.
3. Limpieza del carbón		
		n.r.
4. Extracción		
	Salud ocupacional	
	Accidentes- fatalidades	0.010/Mt
	Accidentes-daño mayor	0.21/Mt
	Accidentes-daño menor	5.6/Mt
	Emisiones al aire	
	CO2	n.c*
	SO2	n.c*
	NOX	n.c*

Continuación de tabla...

Etapa	Parámetros	Valor
5. Transporte de Materiales		
	Salud ocupacional	0.0049/Mt
	Accidentes- fatalidades	0.061/Mt
	Emisiones al aire	
	CO2	n.r.**
	SO2	n.r.**
	NOX	n.r.**
	PM10	n.r.**
	CH4	n.r.**

Tabla 51. Externalidades asociadas del ciclo del carbón

*n.c. No cuantificado

**n.r. No reportado

D. Energía Eólica (fuente: Externe Dinamarca)

Definición del ciclo de combustible

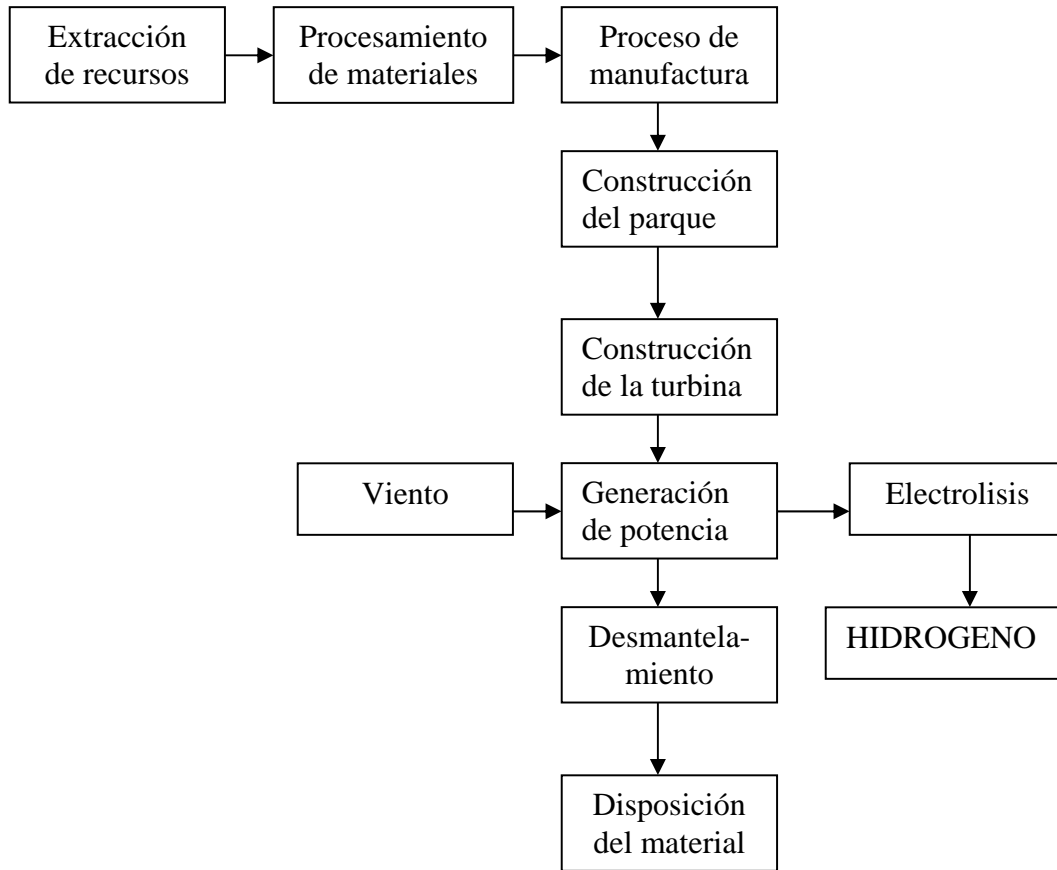


Figura 41. Ciclo de combustible de los procesos que utilizan energía eólica

En la siguiente tabla se encuentran datos relacionados con las etapas del ciclo de combustible de la energía eólica y sus externalidades. Esta información fue tomada del estudio Externe de Dinamarca.

Características de potencia de la planta de estudio	
Parque de generación	Fjaldane wind farm
Lugar	Dinamarca
Capacidad	9 MW
Número de turbinas de viento	18
Producción eléctrica por año	19800 MWh
Otras etapas del ciclo de combustible	

Continuación de la tabla...

Características de potencia de la planta de estudio	
S	0.628t/año
NOX	0.961t/año
CO	0.177t/año
Emisión de partículas	2.6t/año
CO2	288t/año

Tabla 52. Descripción del parque eólico considerado para el estudio de las externalidades asociadas al ciclo de combustible

Daños en salud ocupacional producto del ciclo de combustible

1. Generación de potencia	
Salud ocupacional	
Accidentes-fatalidades	n.c.*
Accidentes-daño mayor	n.c.*
Accidentes-daño menor	n.c.*
2. Transmisión	
3. Construcción	
	Casos/MWh
Salud ocupacional	
Accidentes-fatalidades	2.00E-05
Accidentes-daño mayor	5.00E-03
Accidentes-daño menor	1.70E-02

Tabla 53. Descripción de las externalidades asociadas al ciclo de combustible

*n.c. No cuantificado

E. Biomasa (fuente: Externe Alemania)

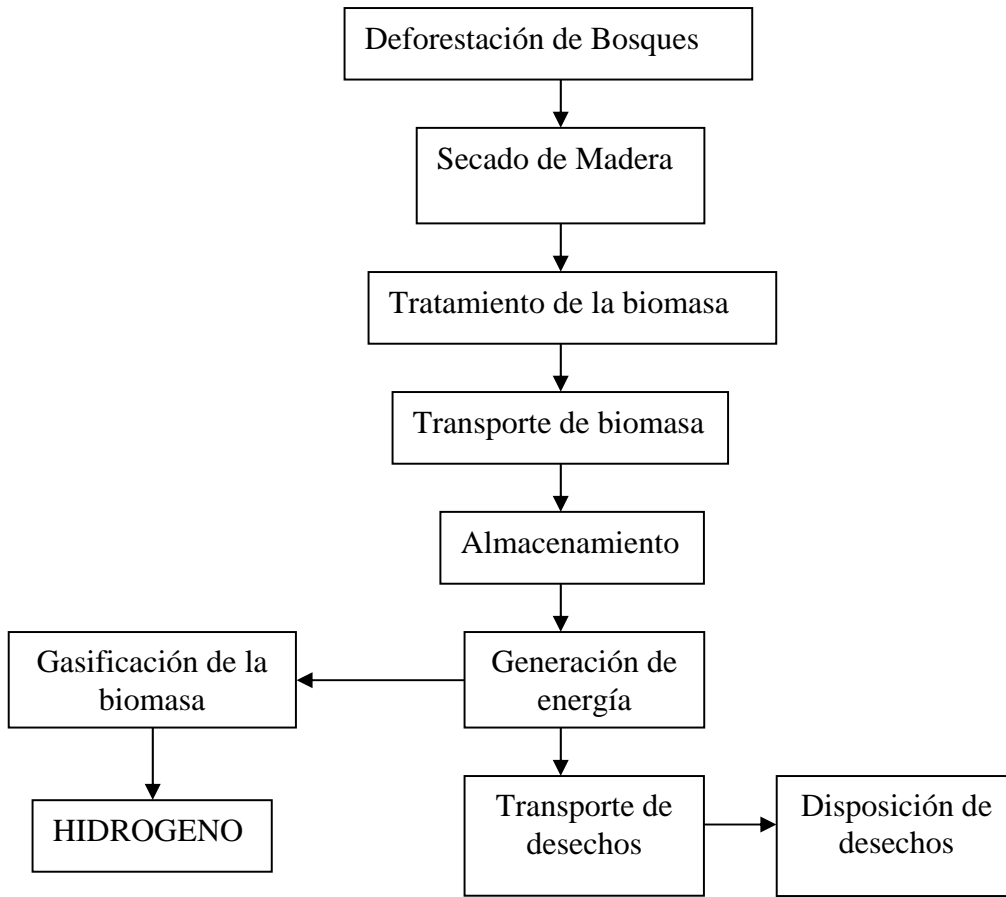


Figura 42. Ciclo de combustible de los procesos que utilizan biomasa

En la siguiente tabla se encuentran datos relacionados con las etapas del ciclo de combustible de la biomasa y sus externalidades. Esta información fue tomada del estudio Externe de Alemania.

Etapa	Parámetros	Valor
Propiedades del combustible		
	Especie de árboles	Norway SpruceKaltschmitt, Reinhart (1997)
	Valor Calorífico	18.7 MJ/kg, húmedo 10.2 MJ/kg seco
	Composición	
	C	50.90%
	H	6.60%
	O	42.00%
	N	0.20%
	S	0.01%

2. Transporte de biomasa

Distancia a la planta de potencia 20 km

Continuación de la tabla...

Etapa	Parámetros	Valor
3. Almacenamiento		
	Capacidad de almacenamiento	1 semana
4. Generación energética		
	Combustible	Madera
	Tipo de planta	Cogeneración
	Ubicación	Tubingen, Alemania
	Capacidad de la planta de generación	
	Calor	12.8 MWth
	Electricidad net	3.6 MWe
	Eficiencia térmica	64%
	Eficiencia eléctrica	18%
	Eficiencia total	85%
	Carga total	3000 h/año
	Energía producida	
	Térmica (GJ/año)	138%
	Eléctrica (GWh/año)	11%
	Tiempo de vida	30%
	Características de la planta	
	Altura	40 m
	Diámetro	4 m
	Temperatura de gas (K)	373.15
	Volumen(Nm ³ /h)	23.73
5. Transporte de desechos		
	Distancia a la generación de energía	20 km
	Modo de transporte	Camión
	Cantidad transportada al año	35 t/año

Tabla 54. Etapas del ciclo de la biomasa

Daños en salud ocupacional producto del ciclo de combustible

<u>Etapa</u>	<u>Quemado</u>	<u>Cantidad</u>	
1. Conversión del bosque	Salud ocupacional		
	Accidentes-fatalidades	0.32 /Mm ³	
	Accidentes-daño mayor	8.6/ Mm ³	
	Accidentes-daño menor	160/ Mm ³	
	Emisiones al aire		
	CO ₂	53.2 t/año	
	CO	193.2 kg/año	
	SO ₂	16.7 kg/año	
	NOX	552.1 kg/año	
	Partículas	0 kg/año	
	Diesel	49.2 kg/año	
	CH ₄	2.1 kg/año	
	NMHC	87.8 kg/año	
	Benceno	1.7 kg/año	
	N ₂ O	2.4 kg/año	
	NH ₃	1.9 kg/año	
	HCl	0.3 kg/año	
	Formaldehido	7.1 kg/año	
	2. Tala de bosque	Salud ocupacional	
		Accidentes-fatalidades	
Accidentes-daño mayor			
Accidentes-daño menor			
Emisiones al aire			
CO ₂		201.2 t/año	
CO		355 kg/año	
SO ₂		63 kg/año	
NOX		2210 kg/año	
Partículas		0	
Diesel		143 kg/año	
CH ₄		5.6 kg/año	
NMHC	231 kg/año		

Continuación de tabla.

Etapa	Quemado	Cantidad
	Benceno	4.4 kg/año
	N2O	9.1 kg/año
	NH3	7.4 kg/año
	HCl	1.2 kg/año
	Formaldehido	18.8 kg/año
3. Transporte de masa	Salud ocupacional	
	Accidentes-fatalidades	0.867/Gt
	Accidentes-daño mayor	10.9/Gt
	Accidentes-daño menor	345/Gt
	Emisiones al aire	
	CO2	32.2 t/año
		101.5
	CO	kg/año
		10.1k
	SO2	g/año
		405.9
	NOX	kg/año
	Partículas	0
		22.3
	Diesel	kg/año
	CH4	1.2 kg/año
		50.7
	NMHC	kg/año
	Benceno	1 kg/año
	N2O	1.5 kg/año
	NH3	1.2 kg/año
	HCl	0.2 kg/año
	Formaldehido	4.1 kg/año
4. Almacenamiento	Emisiones al aire	
	CO2	3.9 t/año
		14.2
	CO	kg/año
	SO2	1.2 kg/año
		40.5
	NOX	kg/año
	Partículas	0

Continuación de tabla.

Etapa	Quemado	Cantidad
	Diesel	3.6 kg/año
	CH4	0.2 kg/año
	NMHC	6.5 kg/año
	Benceno	0.1 kg/año
	N2O	0.2 kg/año
	NH3	0.1 kg/año
	HCl	0
	Formaldehido	0.5 kg/año
5. Transporte de desechos	Emisiones al aire	
	CO2	0.1 t/año
	CO	0.3 kg/año
	SO2	0
	NOX	1.0 kg/año
	Partículas	0
	Diesel	0.1 kg/año

Tabla 55. Externalidades asociadas del ciclo de combustible de la biomasa

BIBLIOGRAFIA

1. Kirk E. y Othmer D. Enciclopedia de los procesos químicos. Ed. Wiley, 4ª ed. New York 1999.
2. Shusaku Shiozawa. *The development project of HTTR heat application system HTTR*. Department of advanced nuclear heat technology, Oarai research establishment, Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). Japan 1999.
3. Bourdeloie C. and Marimbeau P. *Determination of HTGR radioactive material inventory*. 2nd International topical meeting on high temperature reactor technology, Beijing, China, September 22-24, 2004.
4. Verondem K. *Nuclear energy for hydrogen production*. Energietechnik energy technology. Schriften des forschungszentrums julich reihe energietechnik/energy technology. Band/Volume 58. ISSN 1433-5522. ISBN 978-3-89336-468-8. 2007.
5. National Research Council y National Academy of engineering. *The hydrogen economy: opportunities, costs, barriers, and R&D needs*. ISBN: 0-309-53068-7, 2004.
6. UNDESA (United Nations Commission on Sustainable Development).
<http://www.un.org/esa/desa.htm>
7. *World Energy Outlook 2004*. International Energy Agency. 9 Rue de le Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France.
8. *Balance Nacional de Energía 2005*. Subsecretaria de Planeación y Desarrollo Tecnológico, Dirección General de Información y Estudios Energéticos. ISBN 968-874-196-5.
9. INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Historia), www.inegi.org.mx.
10. IER, *Externe National Implementation Germany*. The European Commission Contract JOS3-CTS3-CT95-0010, November 1997.
11. Sieverts N. *Externe National Implementation Denmark*. European Commission. Lotte Sheleisner, Technical University of Denmark, Contract JOS3-CT95-0010, December 1997.
12. Ewan B. y Allen R. *A figure of merit assessment of the routes to hydrogen*. Department of Chemical & Process Engineering. University of Sheffield. International Journal of Hydrogen Energy 30 p. 809-819, 2005.
13. ILK. *Statement on sustainability evaluation of nuclear energy and other electricity supply technologies*. Internationale Landerkommission Kerntechnik. Enero 2004. No.: ILK-16 E.
14. Martín del Campo C. y Francois J.L., “*Desarrollo de una metodología para evaluar la sustentabilidad de fuentes de generación eléctrica*”, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2006.
15. Baden-Wuttemberg, Bayern-Hessen. *ILK Statement on sustainability evaluation of nuclear energy and other electricity supply technologies*. Internationale Landerkommission Kerntechnik. No.: ILK-16 E. January 2004.