



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

LIER

Revisión de indicadores de
sustentabilidad para energías renovables

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciada en Ingeniería en Energías Renovables

PRESENTA:

Brenda Ayala Morales

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Osvaldo Rodríguez Hernández



IER

Instituto de Energías
Renovables

Enero 2018



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.

Índice general

Índice general	III
1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.1.2 Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE)	7
1.1.3 Ley de Transición Energética (LTE)	8
1.1.4 Estrategia Nacional de Energía 2013-2027 (ENE 2013-2027)	8
1.1.5 Plan Nacional de desarrollo 2013-2018 (PND)	11
1.2 Justificación	12
1.3 Objetivo	13
1.4 Estructura del trabajo	13
2. Desarrollo Sustentable, un nuevo paradigma para el desarrollo humano	15
2.1 Dimensiones del Desarrollo Sustentable	21
2.2 Indicadores de Desarrollo Sustentable	23
2.3 Tipos de Indicadores	26
3. La energía eólica como impulsor del desarrollo sustentable	35
3.1 El viento	36
3.2 Recurso eólico	49
3.3 Situación Mundial de la Energía Eólica	53
3.4 Prospectiva en materia Eólica	60

4. Los indicadores como medida del progreso hacia el desarrollo sustentable	65
4.1 Marcos para el desarrollo de indicadores	67
4.2 Metodologías aplicadas por etapa en el desarrollo de indicadores . . .	71
5. Análisis	81
6. Conclusiones	97
Bibliografía	101

Resumen

A consecuencia del cambio climático derivado de la emisión de gases de efecto invernadero se han llevado a cabo una serie de acciones para contrarrestarlo, principalmente dirigidas al desarrollo sustentable. La energía renovable es considerada como una solución para mitigar el cambio climático y la contaminación del medio ambiente. Sin embargo, la aplicación de tecnologías de energías renovables requiere de una evaluación de sustentabilidad, lo cual actualmente representa un problema importante.

Con el objetivo de evaluar la sustentabilidad de dichas tecnologías, es necesario el uso de indicadores de sustentabilidad. En el presente trabajo se realiza un análisis de la revisión de los indicadores de sustentabilidad para energías renovables, así como los criterios y metodologías para su selección y cálculo. Actualmente existen indicadores de sustentabilidad para tecnologías de energías renovables, sin embargo la variedad de estos, las metodologías para seleccionarlos y los criterios establecidos, limitan el establecimiento de un conjunto de ellos para determinar la contribución de éstas al desarrollo sustentable.

Los indicadores de sustentabilidad además de evaluar todos los criterios de sustentabilidad en la implementación de energías renovables, también proporcionan resultados cuantitativos que aportan información de importancia para los tomadores de decisiones. El análisis de los indicadores se puede utilizar para un enfoque que permita una clasificación de estos a los distintos niveles en los que se aplican.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto de Energías Renovables por la privilegiada educación que me brindaron.

Al Dr. Osvaldo Rodríguez Hernández por sus enseñanzas, paciencia y motivación.

Al proyecto 272063 “Fortalecimiento del campo de Energía Eólica en el Programa de Doctorado en Ingeniería en el Campo de Conocimiento en Energía con sede en el Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México” en el marco de la convocatoria S0019-2015-06 del fondo sectorial CONACyT-SENER-Sustentabilidad Energética por su apoyo en el financiamiento del presente trabajo.

Para mis seres queridos:

Carlos y Julieta por darme la vida, por su motivación, apoyo y amor;

Para mi hermano Mauricio, por su inigualable compañía y paciencia.

Para mis abuelos, Antonio y Heriberto, gracias por complementar mi camino desde donde se encuentren;

Para Evelia y María de la Luz, por consentir mis deseos y motivarme siempre;

Para mis tíos, Alicia, Azucena y Heriberto por ser un ejemplo en mi vida;

Rodrigo, Verushka, Manuel, y Chely, por su amistad y apoyo incondicional;

Para quienes han estado, quienes se fueron y quienes siguen aquí, gracias.

1. Introducción

En los últimos años, México ha buscado el camino hacia la sustentabilidad energética con el objetivo de fortalecer el desarrollo económico y social de la población así como la preservación del ambiente. Es por ello que existe un compromiso con la inclusión de las energías renovables en la matriz energética, que permitan el cumplimiento de las metas en materia de generación y reducción de emisiones. De acuerdo a la Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030, la Energía Eólica ha tenido y tendrá un crecimiento predominante en comparación con el resto de dichas tecnologías. Lo cual involucra el beneficio de diversos sectores que forman parte de los elementos que fomentarán el desarrollo sustentable del país a largo plazo.

Lo anterior requiere de herramientas que permitan medir el progreso hacia el desarrollo sustentable y a su vez aseguren el cumplimiento de las metas y objetivos. Es por ello que el trabajo aquí presentado investiga el estado del arte en materia de la energía eólica en particular y realiza una revisión literaria de los indicadores de sustentabilidad energética, contemplando las metodologías más importantes y los diversos casos de estudio que culminan en el análisis y la identificación de áreas de oportunidad que promuevan el éxito de los mismos.

1.1 Antecedentes

Las actividades humanas han incrementado sustancialmente las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) y sus efectos. Como resultado, vivimos un calentamiento adicional a la superficie y atmósfera de la Tierra, afectando así los

ecosistemas naturales y a la humanidad [5]. Los cambios del clima en la Tierra y sus efectos son una preocupación común de toda la humanidad, es por ello que en 1992 se llevó a cabo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

El objetivo de la CMNUCC es estabilizar las concentraciones de GEI en la atmósfera e impedir que las actividades antropógenas interfieran negativamente en el sistema climático, entendiéndose por la totalidad de la atmósfera, la hidrósfera, la biósfera y sus interacciones. Logrando que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurando la producción de alimentos y permitiendo que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible ¹ [5].

De acuerdo con dicha Convención, se define Cambio Climático como: un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad del clima observada durante períodos de tiempos comparables [5].

Para entender el origen del cambio climático, es importante saber que la principal causa es la presencia en determinados niveles de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) que son: el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (NO_2), los hidrofluorcarbonos (HFC), los perfluorocarbono (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF_2). El CO_2 es el principal gas causante del Efecto Invernadero emitido por la actividad humana [21]. En el periodo de 1970 a 2010, las emisiones antropógenas de GEI totales han continuado en aumento y durante los últimos 10 años de este periodo se produjeron las emisiones más altas en la historia de la humanidad llegando a 49 Gt CO_2 eq/año en 2010 [11]

¹RAE, Sostenible: Especialmente en ecología y economía, que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar grave daño al medio ambiente. Desarrollo, economía sostenible.

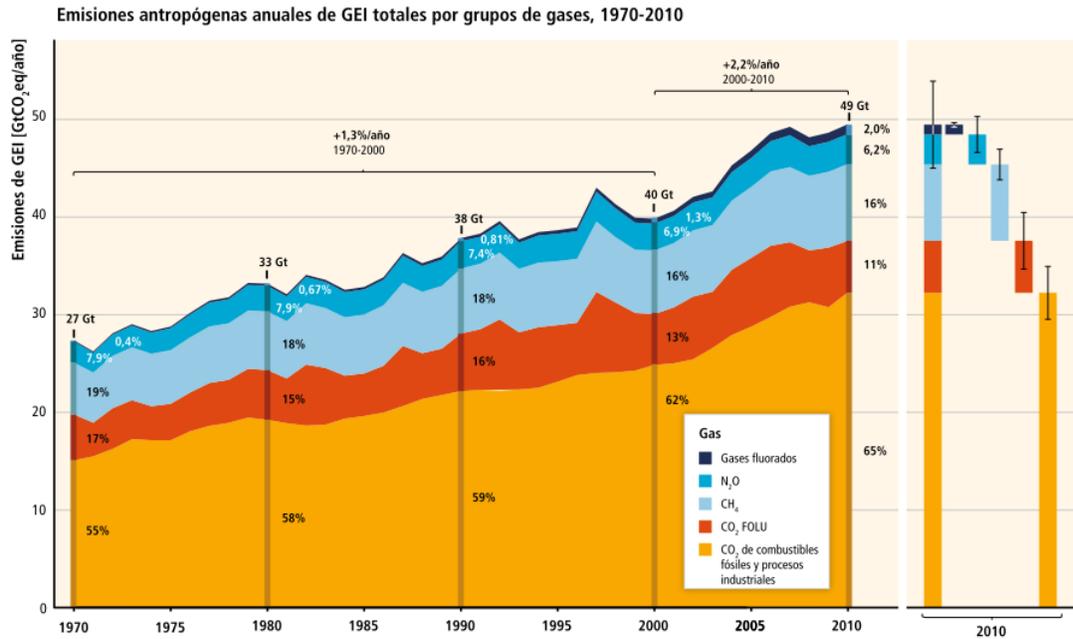


Figura 1: Emisiones antropógenas de GEI totales (GtCO₂eq/año) desde 1970 a 2010, representados por 5 grupos de gases: CO₂ procedente de la quema de combustibles fósiles y procesos industriales, CO₂ procedente de la silvicultura y otros usos de suelo (FOLU), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O) y gases fluorados.

El Cambio Climático es un cambio significativo y duradero de los patrones locales o globales del clima, las causas pueden ser naturales o de forma antropógena (por las actividades humanas), mediante la emisión de GEI. Estos absorben y reflejan la radiación en onda larga, devolviéndola a la superficie terrestre, causando el aumento de temperatura [19]

Las emisiones de CO₂ procedentes de la quema de combustibles fósiles y los procesos productivos industriales, contribuyeron en alrededor del 78% del incremento de las emisiones de GEI totales de 1970 a 2010 como se observa en la Figura 1 y su contribución porcentual para el periodo 2000-2010 fue similar [11]

Dados los esfuerzos globales por mantener un sistema sustentable ² con el ob-

²La Cumbre de Río (1992) determinó sustentable para designar un desarrollo económico diferente. Se utilizara sustentable cuando se toma en cuenta al menos tres pilares de la susten-

jetivo de preservar la calidad de vida, es fundamental contar con herramientas gubernamentales, normas y programas globales y locales, que contribuyan a determinar la efectividad de las políticas y programas en materia, para así cumplir con el objetivo de la CMNUCC y a su vez sean la base para trascender hacia un cambio responsable en el desarrollo de las actividades antropógenas.

La categoría de energía destaca por ser la principal fuente de emisiones, esta contempla el transporte, la producción de energía, y la manufactura e industria de la construcción [19]. De no realizar acciones de mitigación, se alcanzarían concentraciones de GEI que aumentarían considerablemente la temperatura promedio del planeta, y se se enfrentarían graves consecuencias tanto ambientales, como económicas y sociales.

De acuerdo con la Perspectiva de Tecnología Energética 2015 (PTE) existen tres escenarios con el objetivo de sopesar dicha problemática. El escenario 6DS (6°C Scenario) omite esfuerzos para estabilizar concentraciones de GEI, el 4DS (4°C Scenario) considera metas voluntarias para limitar emisiones, cambios en la política y las tecnologías, finalmente el 2DS (2°C Scenario), en el cual se enfoca la PTE, asegura con base en investigaciones que existe el 80 % de probabilidad de limitar el aumento de la temperatura media mundial a 2°C. Un escenario donde se proyecta un aumento de dos grados centígrados 2DS, contempla acciones específicas en materia de electrificación donde las fuentes renovables de energía tienen un papel importante [2].

Desde 1980, la demanda energética mundial casi se ha duplicado, y de continuar esta tendencia se incrementaría otro 85 % para el año 2050, esto se traduce en un incremento de emisiones de CO₂ relacionadas con la energía, que contribuyen con dos terceras partes de las emisiones globales de GEI. El análisis de la PTE identifica que existe un vínculo entre las actividades económicas, la demanda energética y las emisiones de GEI, tal que con la transformación del sistema energético global, resultaría en consecuencias benéficas [20].

tabilidad.

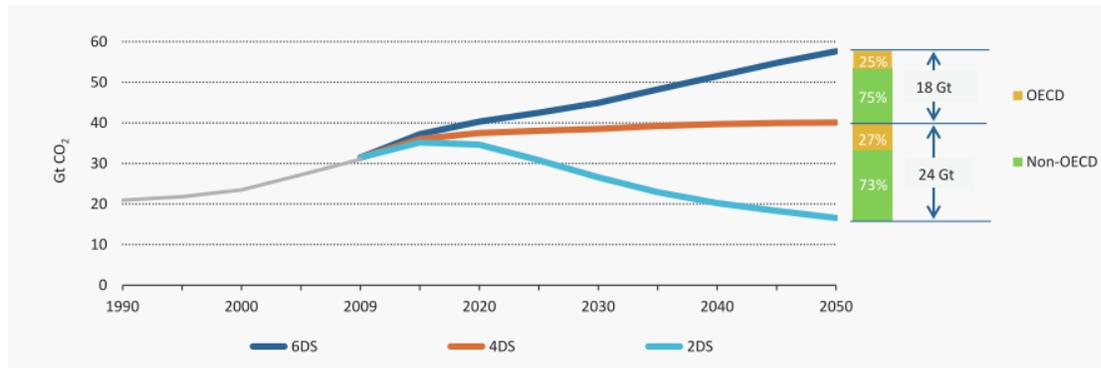


Figura 2: La gráfica representa la trayectoria de emisiones de CO_2 con respecto al escenario 6DS, 4DS y 2DS del PTE 2012

Enfrentar los retos que impone el cambio climático es globalmente una problemática que compete a cada país, México ha dedicado diferentes esfuerzos en un marco legal que permita mitigar los efectos de dicho cambio. Es por ello que una revisión del contexto mexicano en materia es de vital importancia, con el objetivo de contar con un panorama que permita analizar y comprender la dirección en que éste se ha desarrollado así como los campos que requieren de mayor investigación e inclusión.

En este contexto es importante contar con un marco legal, tanto global como nacional que permita hacer de dichos esfuerzos una realidad. Por lo tanto, es primordial medir la efectividad de las normas y programas que se han desarrollado para alcanzar las metas descritas, por lo que es necesario contar con indicadores que den a conocer el progreso hacia los retos planteados.

Para cumplir con los objetivos específicos de la investigación, es primordial conocer el panorama del marco legal mexicano en materia de desarrollo sustentable, ya que permite identificar las áreas que requieren mayor esfuerzo para conformar un sistema sólido e íntegro, que proporcione la seguridad de enfrentar los desafíos que implican el cambio climático.

En esta sección se presenta el contexto nacional referente a programas y políti-

cas, de esta manera se describen cuatro documentos primordiales, en primera instancia la Ley General de Cambio Climático (LGCC), por consiguiente la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE), después la Estrategia Nacional de Energía 2013-2027 (ENE 2013-2027) y por último el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 (PND 2013-2018). A continuación se describe el contexto bajo el cual se recopilan fundamentos que permiten abordar e impulsar el presente trabajo.

Ley General de Cambio Climático (LGCC)

La Ley General de Cambio Climático (LGCC) promulgada el 12 de Junio de 2012 en el Diario Oficial de la Federación (DOF), establece disposiciones para enfrentar los efectos desfavorables del Cambio Climático, y tiene como objetivo además de garantizar el derecho a un ambiente sano, regular las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero. Uno de los objetivos de las políticas para mitigar los GEI, es promover de manera gradual entre las dependencias y entidades de la administración pública federal, las Entidades Federativas y los Municipios, la generación de electricidad mediante el uso de fuentes renovables de energía.

Dentro de los artículos transitorios, el 2° y 3° establecen metas importantes. Por un lado, reducir para el año 2020 un 30 % de emisiones de GEI, y un 50 % para 2050 en relación con las emitidas en el año 2000.

Por otro lado el 3° estipula que para el año 2020, acorde con el artículo 2°, se deberá tener constituido un sistema de incentivos que promueva y permita hacer rentable la generación de electricidad mediante energías renovables, como la eólica, la solar y la mini hidráulica por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Lo anterior mediante la coordinación interinstitucional de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), la Secretaría de Energía (SENER) y la Comisión Reguladora de Energía (CRE). Mientras que SENER, CFE y CRE, promoverán

que la generación eléctrica proveniente de fuentes de energía limpias alcance por lo menos 35 % para el año 2024 [9].

1.1.2 Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE)

La LAERFTE se creó el 28 de Noviembre de 2008 con la función de regular el aprovechamiento de fuentes de energías renovables y tecnologías limpias para generación de electricidad, establecer estrategias nacionales, así como los instrumentos para encaminar al país hacia la transición energética.

El reglamento plantea principalmente los criterios para el uso de las fuentes renovables de energía y define el trabajo en conjunto entre la Secretaría de Energía (SENER), la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Por un lado corresponde a la SENER la elaboración del Programa Especial para el Aprovechamiento de las Energías Renovables, así como establecer y actualizar el Inventario Nacional de las Energías Renovables; mientras la CRE es responsable de expedir normas y metodologías para la generación de electricidad e interconexión al Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Por otro lado la SEMARNAT diseñará mecanismos de regulación ambiental en el aprovechamiento de energías renovables. Además se crea el Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía con una aportación inicial de 600 millones de pesos mexicanos en 2009.

Esta ley determina que la Estrategia Nacional para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía es el mecanismo mediante el cual, el país impulsará las políticas, proyectos, acciones y programas con la finalidad del aprovechamiento óptimo de las fuentes de energía renovable, las tecnologías limpias y la sustentabilidad energética. En este sentido es importante saber a qué organismos les compete cada responsabilidad para establecer la situación nacional actual sobre la dirección en que se dirigen las acciones que contribuyen al impulso

del desarrollo sustentable y las energías renovables.

1.1.3 Ley de Transición Energética (LTE)

La LTE se creó el 24 de Diciembre de 2015 con el objetivo de regular el aprovechamiento sustentable de la energía así como las responsabilidades en materia de Energías Limpias y en cuanto a la reducción de emisiones contaminantes de la industria eléctrica.

La ley establece obligaciones y metas identificando a los organismos que tienen como responsabilidad la generación de reglamentos, programas y demás lineamientos que detallan las acciones e instrumentos para asegurar el óptimo aprovechamiento de la energía. Se establecen tres instrumentos de planeación: la Estrategia de Transición para Promover el uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, el Programa Especial de Transición Energética y el Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (Pronase). La estrategia es el instrumento rector de la política nacional en materia de energías limpias y aprovechamiento sustentable de la energía, mientras que los programas están orientados a realizar acciones que logren cumplir las metas de la Estrategia, por otro lado el Pronase se enfoca en el tema de eficiencia energética y conservación de energía [4]

1.1.4 Estrategia Nacional de Energía 2013-2027 (ENE 2013-2027)

Debido a la necesidad de apoyar el crecimiento y el desarrollo económico y social en México, a través de la Estrategia Nacional de Energía (ENE) 2013-2027 se provee a la población de los beneficios que derivan del uso de la energía y la sustentabilidad a largo plazo del sector, mediante la mitigación de impactos sobre la salud y el ambiente, incluyendo la emisión de GEI. (SENER, Estrategia Nacional de Energía 2013-2027 2013)

El objetivo de la ENE es orientar la oferta y la demanda de energía para colaborar al crecimiento económico en México y amplificar el acceso a servicios energéticos de calidad a toda la población. Es por lo anterior que se establece el crecimiento del PIB y la inclusión social como los “Objetivos Estratégicos”.

Partiendo del hecho de que del año 2000 al 2011 el consumo de energía creció a un promedio anual de 2.08 %, mientras que el crecimiento anual del Producto Interno Bruto (PIB) fue de 1.82 %; y la producción de energía primaria disminuyó a una tasa anual de 0.3 %, la ENE establece que de continuar estas tendencias para el 2020, tanto en consumo como en producción de energía, México se convertiría en un país deficitario de energía.

En este sentido es importante saber que actualmente se cuenta con una capacidad de generación suficiente para abastecer la demanda, dada la inversión en plantas de ciclos combinados con base en gas natural, tecnología con la que se obtiene cerca del 50 % de la electricidad del país [32].

Dentro del punto de partida, la ENE determina que México enfrenta retos en materia ambiental, reconociendo los efectos del cambio climático, la necesidad de acciones para reducir los riesgos asociados y por consiguiente la meta sobre la reducción de GEI establecida en la Ley General de Cambio Climático.

Dentro de la metodología para consolidar un sistema energético integral, la ENE cuenta con tres elementos de integración: Sustentabilidad del sector, Eficiencia energética y ambiental y Seguridad energética. Asimismo, se incluyen cuatro “Medidas de Política” correspondientes a las tareas que deberían realizarse para alcanzar los objetivos estratégicos. Para ello se identificaron áreas críticas del sector, denominadas “temas estratégicos” sostenidas por una serie de “líneas de acción” las cuales son los instrumentos que en conjunto llevarán a cumplir los objetivos del documento en cuestión.

Como parte del seguimiento a la evolución de las denominadas “líneas de acción” la ENE propone un conjunto de “Indicadores de medición” los cuales per-

mitirán identificar y emitir señales de advertencia preventiva en caso de alguna falla en el cometido de las líneas de acción y de las políticas públicas que deban establecerse.

En este contexto, se han definido los siguientes indicadores relacionados directamente con los objetivos estratégicos, con los elementos de integración y con las medidas de política.

Objetivo estratégico		Elementos de integración		
		Sustentabilidad	Eficiencia	Seguridad
		Indicador	Indicador	Indicador
		Emisiones de GEI del sector energético	Intensidad energética	Índice de independencia energética
<i>Impulso al crecimiento del PIB</i>	Participación del sector Energético en el PIB	Participación de fuentes no fósiles en la generación de electricidad	Porcentaje de transporte de petrolíferos por ruedas	Diversidad de fuentes en la matriz energética nacional
		Emisiones de CO2	Rendimiento de gasolinas y destilados intermedios	Días de autonomía en terminales de almacenamiento críticas: gasolinas
		Crecimiento en reservas probadas de hidrocarburos / crecimiento PIB	Tasa de restitución de reservas 1P	Líneas de transmisión en situación de saturación
		Relación Reservas Probadas / Producción	Aprovechamiento de gas natural	Capacidad de transporte de gas natural
<i>Inclusión social</i>	Consumo per cápita	Brecha entre regiones del consumo per-cápita de combustibles en sector residencial	Relación precio-costo de energía eléctrica	Crecimiento en abasto de energía mediante generación distribuida
		Proporción de hogares sin acceso a la electricidad	Equipamiento energético de los hogares	Medidas con comunidades para facilitar el desarrollo de líneas eléctricas y ductos
		Cobertura del servicio de energía eléctrica	Precio medio de energía eléctrica al consumidor	Participación del sector social en proyectos energéticos

Figura 3: Indicadores de medición que la ENE propone para cada elemento de integración en relación con los objetivos estratégicos

1.1.5 Plan Nacional de desarrollo 2013-2018 (PND)

El PND tiene el fin de ser un canal de comunicación del Gobierno de la República con la ciudadanía, donde transmite de manera concisa, clara y medible la visión y estrategia de gobierno.

Dicho lo anterior, el PND traza los objetivos de las políticas públicas, establece acciones para alcanzarlos y por primera ocasión presenta indicadores que permitirán medir el progreso obtenido. Determina como Metas Nacionales: un México en Paz, un México incluyente, un México Próspero y un México con Responsabilidad Global. De igual manera se presentan estrategias transversales, líneas de acción y una serie de indicadores.

En este sentido, el PND asegura que los indicadores buscan englobar los temas contenidos en las Metas Nacionales y ser una herramienta para monitorear su cumplimiento y pretenden ser una fuente objetiva para la medición del desempeño del gobierno.

El desarrollo sustentable es un tema que el PND ha tomado en cuenta, afirmando que México se ha comprometido con la participación en más de 90 acuerdos y protocolos, así como en la agenda internacional de medio ambiente y desarrollo sustentable. Sin embargo, asegura que existe una estrecha relación entre el crecimiento económico y la emisión de compuestos de efecto invernadero en el país. Lo cual en 2011 representó un costo económico de agotamiento y degradación ambiental que representó casi el 7% del Producto Interno Bruto (PIB).

Por lo que dicho plan reconoce los retos que el país enfrenta con el objetivo de reducir la dependencia de hidrocarburos con el impulso de las fuentes renovables de energía. En este sentido establece tres estrategias referentes a ello, la primera es implementar una política integral de desarrollo que vincule la sustentabilidad ambiental con costos y beneficios para la sociedad, mientras que la segunda se refiere a fortalecer la política nacional de cambio climático y cuidado al medio am-

biente para transitar hacia una economía competitiva, sustentable, resiliente y de bajo carbono y la tercera establece asegurar el abastecimiento racional de energía eléctrica a lo largo del país.

Por consiguiente sería de esperarse que el PND incluyera en su sección de indicadores alguno o algunos que permitieran medir el progreso y cumplimiento del objetivo nacional referente a reducir la dependencia de hidrocarburos impulsado las energías renovables. Sin embargo carece de indicadores que respalden las estrategias anteriormente mencionadas.

1.2 Justificación

Las entidades gubernamentales han destinado gran cantidad de recursos orientados a la construcción de un desarrollo sustentable donde las fuentes renovables de energía juegan un rol fundamental. Por lo tanto, es muy importante determinar la efectividad y el progreso de planes y programas que permitan identificar el éxito o las dificultades que se presenten.

Una forma de hacerlo es a través de indicadores que son una herramienta que permite condensar grandes cantidades de información en un formato tal que facilita su entendimiento, dan a conocer el progreso hacia o lejos de los objetivos del desarrollo sustentable, conduce a la toma de decisiones y a la planificación en torno a dicho desarrollo. Por lo tanto, en el presente trabajo se desarrolla una extensa revisión de indicadores de desarrollo sustentable enfocados particularmente en la contribución de las energías renovables en dicho desarrollo y a distintos niveles de impacto.

1.3 Objetivo

Desarrollar una revisión de la literatura especializada en materia de indicadores de desarrollo sustentable en específico para energías renovables.

Objetivos específicos

Para alcanzar dicho objetivo se plantea:

- Presentar un panorama general de la necesidad de determinar la efectividad de los programas o planes con un enfoque de desarrollo sustentable.
- Describir el marco legal mexicano que determina los planes nacionales de desarrollo.
- Presentar una revisión de la literatura especializada en materia de sustentabilidad aplicado a tecnologías de energía renovable de baja potencia.

1.4 Estructura del trabajo

Para alcanzar los objetivos previamente descritos se plantea el presente trabajo compuesto por seis capítulos, en el primero se describe una introducción sobre la problemática actual referente al Cambio Climático, sus causas y consecuencias, además de las acciones que han tomado diversas instituciones en el sentido de plantear diversos caminos que pretenden enfrentar y minimizar los impactos que dicho cambio lleva consigo. En el mismo capítulo se presenta una revisión sobre el marco legal mexicano en materia, con el objetivo de establecer una panorama actual sobre los esfuerzos que México ha destinado.

En el segundo capítulo se habla sobre el Desarrollo Sustentable, las diversas definiciones que se han determinado, los pilares bajo los que se sustenta y los objetivos que la Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha establecido para proveer de una guía hacia una nueva dirección en las inversiones y patrones de consumo así como de producción, con la finalidad de contribuir al desarrollo humano. En este sentido, se destaca la importancia de contar con un sistema que

permita medir el progreso hacia el Desarrollo Sustentable en el tiempo, así como los esfuerzos que diversas instituciones han realizado para que dichas herramientas sean aplicables para todos los países. De esta manera sea posible lograr los objetivos establecidos, y así lograr una transición en el sistema energético y diversificar las fuentes mediante las cuales obtenemos la energía que es hoy en día una de las necesidades básicas de la sociedad.

En este sentido, el tercer capítulo se enfoca en la energía eólica al ser la fuente renovable de mayor proyección y desarrollo en México, se presentan las generalidades del recurso y la tecnología así como de la importancia sobre el potencial que ofrece y la diversidad de sus aplicaciones. Por consiguiente en el capítulo cuarto, se describe el análisis realizado con base en una revisión literaria de indicadores energéticos de sustentabilidad, así como las metodologías utilizadas actualmente por diversos autores para la obtención de indicadores.

En el quinto capítulo se habla sobre una revisión de indicadores energéticos de sustentabilidad aplicados a diversos proyectos de energías renovables en distintos niveles de impacto y algunos casos para la energía eólica. El último capítulo presenta la discusión y conclusiones obtenidos a lo largo de la presente revisión literaria.

2. Desarrollo Sustentable, un nuevo paradigma para el desarrollo humano

El desarrollo sustentable ha sido un tema de gran discusión dentro de las ideas que conforman a la sociedad contemporánea. En esta sección se revisa el concepto de desarrollo sustentable, se analiza la procedencia del mismo y los pilares que sustentan su concepto.

El concepto de desarrollo sustentable surgió en 1980 como respuesta a las consecuencias negativas en la sociedad y el ambiente debido al enfoque del desarrollo económico. Una de las primeras formulaciones del concepto se encuentra en Estrategia para la Conservación Mundial de 1980 presentada en conjunto con el Programa Ambiental de las Naciones Unidas, el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) y la Unión Internacional para la Conservación de los Recursos naturales y la Naturaleza (UICN) [22], dicha definición es la siguiente:

“Para que el desarrollo sea sustentable, se tiene que tomar en cuenta los factores sociales y ecológicos, así como los económicos; sobre la base de los recursos vivos y no vivos; y de las ventajas y desventajas de acciones alternativas a corto y largo plazo”

Sin embargo el término de desarrollo sustentable que mayor reconocimiento tiene es el descrito en el informe “Nuestro futuro común”, publicado por la Comi-

sión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (WCED) en 1987, también conocido como el Informe de Brutland, realizado por la ex-primera ministra noruega Gro Harlem Brundtland, en el cual define desarrollo sustentable como: El desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades [14].

La sustentabilidad es un proceso dinámico en lugar de un estado fijo, sin embargo el desarrollo sustentable no es un estado fijo de armonía, sino más bien un proceso de cambio en el que la explotación de los recursos, la dirección de las inversiones, la orientación del desarrollo tecnológico y el cambio institucional se hacen coherentes con futuro, así como las necesidades actuales[6].

Como resultado del Informe de Brundtland, en la Cumbre de Río de Janeiro de 1992, se proclamó mediante la Declaración de Río sobre el Medio ambiente y el Desarrollo en la cual establecieron 27 principios con el objetivo de crear una nueva alianza mundial y equitativa mediante la creación de nuevos niveles de cooperación entre Estados, los sectores claves de la sociedad y las personas [10] fue firmada por los jefes de gobierno de 178 países miembros de las Naciones Unidas con el compromiso de promover un desarrollo sustentable. Es decir, un desarrollo económico y social que comprenda la protección ambiental y el uso racional de los recursos naturales, de manera que este sea equitativo y asegure a las futuras generaciones el acceso a los recursos para satisfacer sus necesidades [38].

El desarrollo sustentable es un enfoque hacia el desarrollo que establece la integración de la actividad económica con la protección ambiental y las preocupaciones sociales [16]. En este sentido, el progreso hacia una sociedad sustentable requiere de estrategias que orienten la conciencia en el consumo y reduzcan el impacto negativo hacia el ambiente, sin afectar la calidad de vida.

Sin embargo, también se ha descrito en la literatura sobre la sustentabilidad fuerte y débil. La “Sustentabilidad Débil” asume que el capital natural (biodiversidad y ecosistemas) y el hecho por el hombre (maquinas y/o infraestructura) no son sustitutos sino complementos y la posible sustitución de productos manufacturados en el capital natural están seriamente limitados por las características ambientales.

Por otro lado la “Sustentabilidad Fuerte” asume la limitada sustitución entre el capital natural y el capital hecho por el hombre por lo que se considera un sistema sustentable, siempre que el total de existencias de capital no disminuya [15].

Dicho anterior, la Sustentabilidad Urbana ha sido un enfoque de investigación y se ha definido de diversas maneras, con diferentes criterios y énfasis. La mayoría de las definiciones son derivaciones de las de sustentabilidad, centrándose en el desarrollo humano a largo plazo, minimizando el consumo de recursos y daño ambiental, maximizando el uso de los recursos eficientemente, y asegurando la equidad y la democracia [15]. Una de las definiciones mas recientes es: La sustentabilidad urbana es el proceso de adaptación para facilitar y mantener un ciclo entre los ecosistemas y el bienestar de los seres humanos a través de determinadas decisiones en el entorno ambiental, económico y social en los cambios dentro y fuera del paisaje urbano [41].

En este contexto, la sustentabilidad es un proceso dinámico en lugar de un estado fijo, sin embargo el desarrollo sustentable es un proceso de cambio en el que la explotación de los recursos, la dirección de las inversiones, la orientación del desarrollo tecnológico y el cambio institucional se hacen coherentes con el futuro [15].

En la Cumbre de Río de Janeiro de 1992 también se adoptó un plan de acción global, la Agenda 21, la cual comprende una estrategia donde los países adquieren el compromiso de encaminar su desarrollo con iniciativas que construyen un modelo de desarrollo sustentable, además dentro de sus objetivos se encuentra la elaboración de indicadores de desarrollo sustentable, así como la promoción de su uso a nivel mundial [10].

Posteriormente en el año 2002 en la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sustentable en Johannesburgo, representantes de 183 países acordaron una amplia gama de compromisos y objetivos para alcanzar el desarrollo sustentable, entre los cuales se encuentran reducir a la mitad, para el año 2015 la proporción de personas en situación de pobreza, fomentar y promover un marco de diez años de programas

para acelerar el cambio hacia el consumo y la producción sustentable, diversificar el suministro de energía e incrementar la promoción mundial de las energías renovables, mejorar el acceso confiable, asequible y económicamente viable, social y ambientalmente aceptable de las fuentes y servicios de energía, entre otros [1].

La Cumbre de Johannesburgo consolidó la comprensión del desarrollo sustentable y lo estableció como un objetivo que influencia las actividades gubernamentales, los negocios y la economía a diferentes niveles y que afecta las decisiones para la calidad de vida individual y como sociedad [1].

Los esfuerzos mundiales continuaron en la Cumbre del Milenio de las Naciones Unidas celebrada en el año 2000, donde se declara que el principal reto es hacer de la globalización una fuerza positiva para todos, haciendo un llamado a las políticas y medidas globales correspondientes a las necesidades de los países menos desarrollados y de las economías en transición. Además los líderes mundiales comprometieron a sus naciones a una nueva alianza mundial para reducir la pobreza extrema y establecieron metas para el 2015 como fecha límite, mejor conocidos como los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM).

Los Objetivos de desarrollo del Milenio son:

1. Erradicar la pobreza extrema y el hambre
2. Lograr la enseñanza primaria universal
3. Promover la igualdad entre los géneros y el empoderamiento de la mujer
4. Reducir la mortalidad de los niños menores de 5 años
5. Mejorar la salud materna
6. Combatir el VIH / SIDA, la malaria y otras enfermedades
7. Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente
8. Fomentar una alianza mundial para el desarrollo

Como parte del seguimiento de los resultados de la Cumbre del Milenio, fue aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en octubre de 2015 [27].

La Agenda 2030 es un plan de acción a favor de las personas, el planeta y la prosperidad. Declara 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible y 169 metas voluntarias, con lo que se pretende retomar los ODM. Los objetivos y metas de la Agenda 2030 conjugan las tres dimensiones del desarrollo sustentable: económica, social y ambiental, tales que guiarán las decisiones durante los próximos 15 años entrando en vigor desde el 1 de enero de 2016 [27].

Además establece que, llevaran a cabo un proceso sistemático de seguimiento y exámenes de carácter voluntario a distintos niveles, asumiendo el compromiso de elaborar indicadores que contribuyan a dicha evaluación. Por lo cual estipula que es indispensable disponer de datos de calidad, accesibles, oportunos y fiables para ayudar a medir los progresos debido a que éstos son fundamentales para adoptar decisiones, dicho compromiso comprende también la formulación de métodos para medir los avances que sean más amplios y complementen el producto interno bruto.

Los 17 objetivos del Desarrollo Sustentable son:

1. Poner fin a la pobreza en todas sus formas y en todo el mundo
2. Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible.
3. Garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos a todas las edades
4. Garantizar una educación inclusiva y equitativa de calidad y promover oportunidades de aprendizaje permanente para todos
5. Garantizar la igualdad de género y empoderar a todas las mujeres y niños
6. Lograr la igualdad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos

7. Garantizar el acceso a la energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos
8. Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos
9. Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva, sostenible y fomentar la innovación
10. Reducir la desigualdad en los países y entre ellos
11. Logar que las ciudades y los asentamiento humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles
12. Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles
13. Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos
14. Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible
15. Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de la biodiversidad
16. Promover sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible, facilitar el acceso a la justicia para todos y construir a todos los niveles instituciones eficaces e inclusivas que rindan cuentas
17. Fortalecer los medios de implementación y revitalizar la Alianza Mundial para el Desarrollo Sostenible

Dada la serie de reuniones, acuerdos y compromisos internacionales, ha existido una variedad de interpretaciones y definiciones acerca de cada dimensión del desarrollo sustentable, que con el paso el tiempo ha ido cambiando con la finalidad de conservar y concretar su propósito.

A continuación se describen las tres dimensiones del desarrollo sustentable, en primer lugar la dimensión social, seguida de la económica, por consiguiente la ambiental y por último la institucional.

2.1 Dimensiones del Desarrollo Sustentable

Asegurar la calidad de vida de manera sostenible económica y ambientalmente a largo plazo, es lo que establece el desarrollo sustentable. Dicho lo anterior, este desarrollo abarca cuatro dimensiones: social, económica, ambiental e institucional [10]

Social

El acceso a la energía tiene una directa repercusión sobre la calidad de vida de las personas, la educación, las oportunidades de empleo y la transición demográfica, por mencionar algunas. En algunos lugares un interruptor permite el uso de calefacción, iluminación y la preparación de alimentos, mientras que en otros casos se requiere de varias horas para la recolección de leña destinada para la cocción de alimentos y calefacción. Además la quema de dicho combustible dentro de una casa puede originar enfermedades debido a la contaminación atmosférica.

La equidad y salud componen el aspecto social del desarrollo sustentable. La equidad social abarca la igualdad y la universalidad con las que los recursos energéticos son distribuidos, mientras que para garantizar la asequibilidad se requiere del acceso a los sistemas de energía y se establecen regímenes para que los precios sean factibles, de manera que se encuentre al alcance de todos.

Económica

Esta dimensión evalúa principalmete que el suministro de energía sea rentable y asequible, además requiere conocer la efectividad de costos para asegurar que la inversión es económicamente viable. Sin embargo, la asequibilidad no solo asegura la disponibilidad de la energía sino que también sea accesible a la sociedad [17].

Ambiental

La dimensión ambiental tiene el principal objetivo de reducir el impacto desfavorable debido al uso de la energía. Los daños al ambiente por parte de los sistemas de energía son tales que contribuyen considerablemente en el cambio climático existente. Es por ello que dicha dimensión busca continuar satisfaciendo necesidades energéticas sin perder de vista los retos que impone las consecuencias ambientales [17].

Institucional

El progreso hacia el desarrollo sustentable comprende un compromiso multidisciplinario, es decir, el conjunto de esfuerzos académicos, tecnológicos, sociales e institucionales para un fin común. Bajo el principio de mejorar y mantener la calidad de vida a largo plazo de los seres humanos, con el manejo responsable y seguro de los recursos. En este contexto se establece una nueva orientación hacia la toma de decisiones, las acciones y en los retos que esto implica. El ámbito institucional abarca la participación del sector encargado de crear leyes y normas que tengan el objetivo de encaminar acciones que logren contribuir al objetivo del desarrollo sustentable.

Sin embargo, cómo medir dicho progreso es un reto aun más complejo, dado que probablemente estipular metas ambiciosas es más sencillo que establecer métodos para demostrar que el progreso existe. A pesar de los actuales esfuerzos mundiales, aún quedan una serie de estrategias para alcanzar dichas metas, debido a que cada país cuenta con recursos, políticas y medios diferentes, cómo adecuar dichas estrategias para cada nación, estado o localidad dada la diversidad de la que estos se componen, es un reto aun más complejo.

Para lograr un progreso global hacia el desarrollo sustentable es indispensable el uso racional de recursos, incentivos económicos, tecnología y planificación de estrategias a nivel local y nacional; que además cuenten con una evaluación continua que compruebe si están promoviendo un desarrollo sustentable o si es necesario ajustar ciertas medidas. Es importante contar con una revisión periódica que mida

el estado de desarrollo de un país y verifique si existe el progreso esperado hacia los objetivos del desarrollo sustentable.

Por otro lado, la disponibilidad de información y datos necesarios para alcanzar los objetivos del desarrollo sustentable es una limitación importante, es por ello que valdría considerar que éste debería ser el primer reto a cumplirse, ya que sin este recurso, no hay posibilidad de medir o comparar las implicaciones positivas o negativas ante una planificación de estrategias hacia los objetivos de dicho desarrollo.

En este contexto, la adopción de estrategias, planes y políticas en la selección de la fuente de energía que cubre la demanda energética, requiere de métodos para medir y evaluar los efectos actuales y futuros sobre la sociedad, el aire, el agua y el suelo. Además es importante determinar su utilización actual contribuye al progreso hacia el desarrollo sustentable. Tal es la finalidad de la revisión de indicadores energéticos de desarrollo sustentable del presente trabajo, que pretende establecer el panorama actual con respecto a los referentes a las energía renovables.

2.2 Indicadores de Desarrollo Sustentable

En la esta sección se presenta el marco general sobre los indicadores, desde su significado, su función y qué pretenden resolver, dada su relevancia en el presente trabajo, es importante definirlos y mostrar su alcance así como sus limitantes.

Cómo medir el progreso hacia el desarrollo sustentable ha sido un tema clave a partir del desarrollo de este concepto. Es por ello que se han observado importantes esfuerzos por parte de agencias internacionales, gobiernos, organizaciones no gubernamentales y empresas para desarrollar sistemas de medición e indicadores que caractericen el progreso hacia el desarrollo sustentable o al menos el de alguna de las dimensiones que lo conforman [1].

El término indicador proviene del verbo en latín *indicare* que significa “revelar o señalar, anunciar o dar a conocer públicamente, o estimar o poner un precio algo”. Se ha probado que los indicadores son una herramienta útil para condensar

una gran cantidad de información en un formato de fácil entendimiento. Además se han utilizado ampliamente en el ámbito económico, recursos naturales, ecosistemas, salud, problemas sociales y la calidad de vida [1].

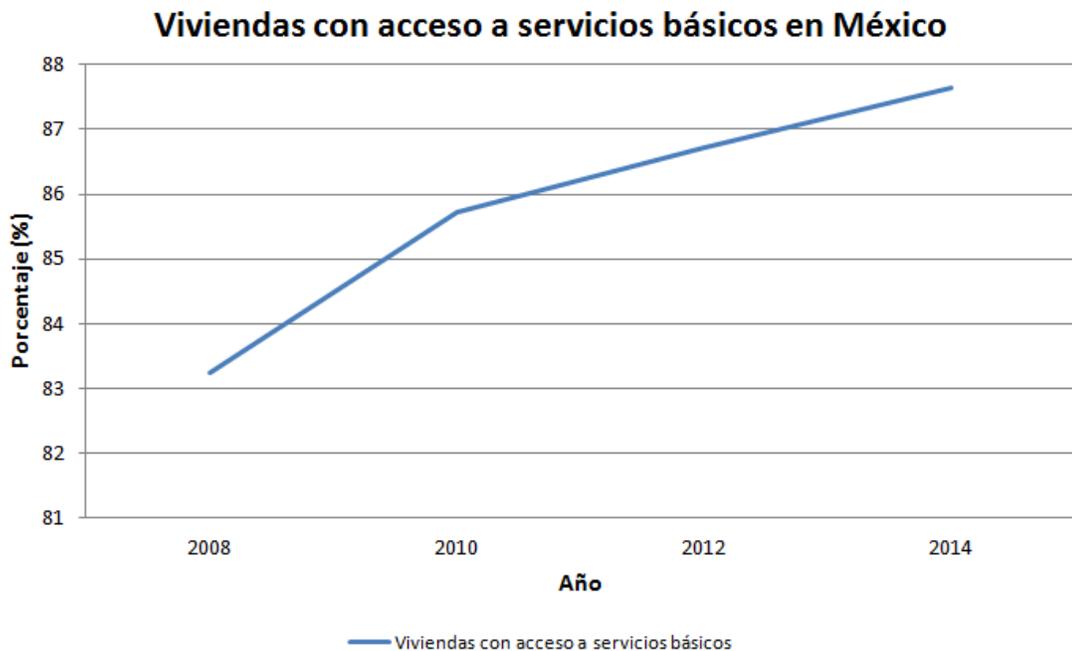


Figura 4: Porcentaje de viviendas con acceso a servicios básicos del 2008 al 2014. Elaboración propia con datos obtenidos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), fecha de consulta Mayo de 2017.

Un ejemplo de lo anterior es el indicador de Viviendas con acceso a servicios básicos, denominado así por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) que se presenta en la Figura 4, que muestra el porcentaje anual de hogares en México que cuentan con servicios, principalmente de agua entubada, drenaje y electricidad, desde 2008 al 2014.

Los indicadores de desarrollo sustentable tienen el fin de dar a conocer el progreso hacia o lejos de los objetivos de dicho desarrollo para ayudar a los tomadores de decisiones a entender el significado de éste en términos operacionales, es decir,

que los indicadores sean herramientas explicativas que permitan traducir los conceptos del desarrollo sustentable en términos prácticos.

Igualmente conducen la toma de decisiones en la política hacia este desarrollo, ya que crean vínculos entre las actividades diarias y el desarrollo sustentable, utilizando los indicadores como instrumento de planeación, proveen un sentido de dirección para elegir entre alternativas políticas. Asimismo ayudan a decidir el grado en que los esfuerzos cumplen satisfactoriamente los objetivos y metas del desarrollo sustentable, fungiendo éstos como herramientas de evaluación del desempeño [1].

Los indicadores se utilizan como parámetros que hacen una cuantificación y permiten hacer una evaluación comparativa de los avances hacia un estado deseado, dado que el desarrollo sustentable se refiere a la evolución a largo plazo de un sistema complejo y dada la naturaleza evolutiva del concepto, el propósito de los indicadores es hacer que la toma de decisiones tenga menor riesgo [17].

Contar con una base sólida y fiable de datos estadísticos exige uno de los esfuerzos primordiales para que los indicadores cumplan con ser herramientas útiles y confiables. Esto contribuye a establecer un panorama en el cual se muestren las prioridades en las que cada país deberá orientar un nuevo camino de acciones.

Los indicadores energéticos de desarrollo sustentable expresan consecuencias o situaciones actuales de la producción y el uso de la energía, y en conjunto presentan un panorama completo de todo el sistema, así como sus implicaciones a corto y largo plazo. Además permiten verificar la evolución en el tiempo del progreso realizado o la falta de éste, hacia el desarrollo sustentable [10].

Es importante destacar que el significado de un indicador energético, posiblemente no signifique lo mismo para dos países diferentes, ya que depende de la naturaleza de su economía, la disponibilidad de recursos nacionales, el desarrollo de cada país o su geografía. Lo anterior deriva en la necesidad de contar con una variedad de indicadores que permitan adecuarse a las distintas condiciones.

Es por ello que a continuación se describen los tipos de indicadores más utilizados actualmente. Así como los esfuerzos que diversas instituciones han realizado con el objetivo de contar con un conjunto de indicadores que sean útiles para todos los países.

2.3 Tipos de Indicadores

La mayoría de los indicadores de sustentabilidad son cuantitativos y se basan en mediciones cuantitativas de variables de las que se derivan otros indicadores e índices. Dado que no existen los indicadores directos, se utilizan los indirectos, que reflejan sistemas más complejos. Por ejemplo, las emisiones de GEI para representar las consecuencias del Cambio Climático, la presencia de aves como un indicador de la biodiversidad y el PIB como un indicador de bienestar [36].

Algunos tipos básico de indicadores pueden distinguirse por sus métodos de construcción y nivel de agregación:

Indicador individual

Los indicadores individuales proporcionan valores puntuales que son más fáciles de interpretar que los grupos de indicadores y con menor tendencia a la subjetividad de ponderación y otros errores de síntesis. Esto incluye los resultados del procesamiento y la interpretación de datos primarios. Sin embargo, al ser unidimensionales, puede no representar una visión amplia o dejar de lado información de vital importancia y por tanto no son adecuados para la medición de problemas multidimensionales como el desarrollo sustentable o el acceso a la energía [17]. Un ejemplo de ello son las emisiones de SO_2 para un país determinado anuales o la tasa de desempleo [36].

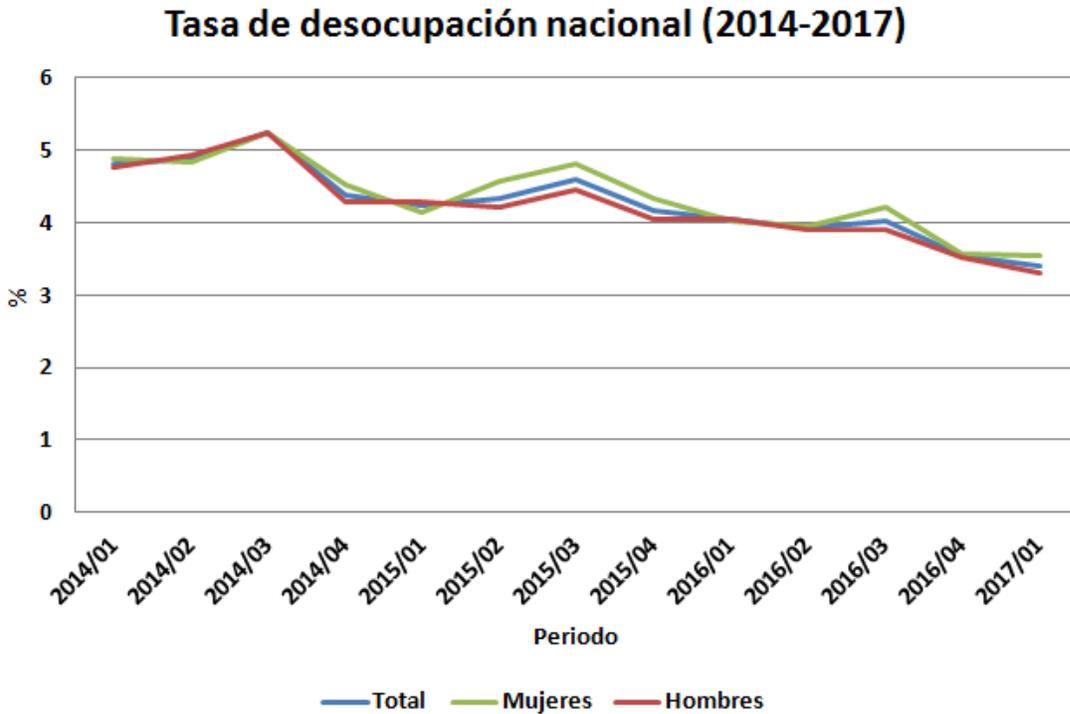


Figura 5: Tasa de desocupación del 2014 al 2017. Elaboración propia con datos obtenidos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)

La Figura 5 muestra un ejemplo de la tasa de desocupación o desempleo en México desde el 2014 al 2017, donde cada año está dividido en cuatro periodos en los que se realizan encuestas, de manera que se obtiene una serie de porcentajes que permiten conocer su progreso a lo largo del tiempo.

Indicador agregado

Se construyen mediante un método de agregación, y se define así porque generalmente combina una serie de componentes, ya sean datos o indicadores individuales, definidos en las mismas unidades, como puede ser dinero, energía o superficie. Es decir, un indicador agregado depende de indicadores que pretenden cubrir diversas dimensiones de una situación determinada. Ejemplo de éstos son el Índice de Planeta Vivo (*LPI*, por sus siglas en inglés) o Índice de Sustentabi-

lidad Ambiental (ESI , por sus siglas en inglés)[36]. El Índice de Sustentabilidad Ambiental utiliza un conjunto de datos integrados en 21 indicadores (I) dando el mismo peso (w) para cada uno y se calcula mediante la sumatoria de éstos como lo indica la ecuación 1:

$$ESI = \sum_{i=1}^{21} wI_i \quad (1)$$

Los 21 indicadores se dividen en cinco categorías que son los sistemas ambientales, reducción de afectaciones al ambiente, reducción de actividades antropógenas al ambiente, la capacidad social e institucional para responder a desafíos ambientales y la capacidad gubernamental para dichos retos. Por consiguiente entre mayor sea el valor obtenido implica que un país está mejor posicionado para mantener condiciones ambientales favorables a futuro [30].

Índice compuesto

Es una combinación de varios aspectos de un fenómeno determinado, basado en un único elemento con una unidad en común y en un concepto a veces complejo. Es denominado así ya que mide conceptos multidimensionales que no pueden ser capturados por un solo indicador, es decir requiere de un marco o metodología para seleccionar, combinar y ponderar indicadores o variables individuales de manera que refleje las dimensiones del fenómeno dado [28].

La Huella Ecológica hace una comparación entre el consumo de recursos renovables y servicios ecológicos, y el suministro de estos por parte de la naturaleza, mediante una estimación del espacio biológicamente productivo para producirlos, y finalmente se compara con el área existente o la biocapacidad de la Tierra, utilizando hectáreas globales como la unidad de medición [42]. Es así como se puede medir la demanda de las actividades humanas sobre los ecosistemas, por lo tanto el equilibrio ecológico EB se calcula de la siguiente manera:

$$EB = \sum BC - \sum FP \quad (2)$$

Si la huella total (FP) excede la capacidad biológica total (BC), entonces el país en cuestión tiene un déficit ecológico, mientras que si ocurre lo contrario, la nación tiene una reserva ecológica. Para obtener dicho índice se consideran seis categorías de demanda: tierras de cultivo, pastizales, bosques, ecosistemas marinos, espacio construido y energía [42].

Índice

Generalmente se trata de un solo número adimensional, se denomina índice ya que requiere la transformación principalmente de datos medidos en diferentes unidades para poder obtener un solo número. Ejemplo de ellos son el Índice de Desarrollo Humano y el Índice de Calidad del Aire [36]. El IDH se expresa como lo indica la ecuación 3:

$$IDH = (IEV)^{1/3} * (IE)^{1/3} * (II)^{1/3} \quad (3)$$

Donde IEV es el Índice de Esperanza de vida, IE es el Índice de Educación y por último II se refiere al Índice de Ingreso [31]. El índice de Desarrollo Humano mide el progreso de un país en tres aspectos básicos del desarrollo humano, la esperanza de vida al nacer, la educación y el ingreso per cápita. Para calcularlo es necesario contar con un índice para cada uno de dichos componentes, por lo que se cuenta con valores de referencia establecidos por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) permitiendo así comparar los logros del país o estado en cuestión, en cada dimensión.

Grupos de indicadores

Dada la complejidad de los problemas de desarrollo, este no puede ser medido por un solo indicador. Es por ello que se requiere el uso de distintas variables que capturen los diversos componentes que éste progreso contempla. En respuesta a lo anterior una variedad de indicadores se han descrito en la literatura para hacer frente a dicha problemática [17]

Por ejemplo, el conjunto de 8 Indicadores de Sustentabilidad Energética presentados por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y la Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GTZ) en 1997. Dichos indicadores pretenden señalar el conjunto de aspectos que afectan de diferente manera al sistema energético con un enfoque de sustentabilidad, considerando solamente la dimensión económica, social y ambiental [10]. En función de la disponibilidad de información, los 8 indicadores se dividen en cada dimensión de la siguiente manera:

1. Dimensión económica

- Participación de las importaciones en la oferta energética
- Aporte de las exportaciones al PIB
- Intensidad energética de PIB

2. Dimensión social

- Consumo de energía útil en hogares
- Cobertura eléctrica

3. Dimensión ambiental

- Alcance del uso de recursos fósiles y de leña
- Participación de recursos renovables en la producción de energía primaria
- Emisiones de CO_2 del sistema energético

Otra aportación más reciente son los 30 Indicadores Energéticos del Desarrollo Sostenible (IEDS) por parte de la Agencia Internacional de energía atómica (OIEA) [17].

Iniciativas globales

De acuerdo con la Agenda 21 adoptada a partir de 1992, compromete a los países que aceptaron su adopción, a la elaboración de indicadores de desarrollo sustentable y los armonicen a nivel nacional, regional y global [10]. Es por esto que a continuación se presentan los esfuerzos de diversas instituciones en el desarrollo de indicadores, con el objetivo de contar con un panorama de lo ya establecido e identificar las áreas de oportunidad existentes.

Comisión de Desarrollo Sustentable (CDS)

Como respuesta a lo estipulado en dicha Agenda, en 1995 el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (UNDESA) de la Comisión sobre el Desarrollo Sostenible (CDS) de las Naciones Unidas comenzó por definir un conjunto de 134 indicadores de desarrollo sustentable. Dicho documento estuvo a disposición de diversos tomadores de decisiones y para el año 2000 ya habían realizado pruebas voluntarias más de 20 países, sin embargo se reportaron vínculos débiles entre las políticas y el desarrollo de indicadores y la necesidad de mejorar los procesos de recolección de datos, por lo que se redujo a solo 57 indicadores clasificados en cuatro dimensiones: social, económica, ambiental e institucional [26].

Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA)

Dada la importancia que emergió en la Cumbre Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible celebrada en Johannesburgo, la OIEA diseñó un conjunto de 30 indicadores denominados “Indicadores energéticos del desarrollo sostenible” (IEDS) clasificados en 3 dimensiones (económica, ambiental y social), en colaboración con el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (UNDESA) de las Naciones Unidas, la Agencia Internacional de la Energía (AIE), la Oficina Europea de Estadística de las Comunidades Europeas (Eurostat) y la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), con el objetivo de proveer de información sobre las tendencias actuales en materia energética, de manera que simplifique la adopción de decisiones a nivel nacional y ayude a los países a evaluar políticas energéticas encaminadas al desarrollo sustentable [10]. A su vez estas dimensiones son divididas en 7 temas y 19 subtemas, sin embargo la dimensión ambiental es la

que mayores temas aborda. A pesar de que este modelo de indicadores proporciona información valiosa sobre el desarrollo sustentable de los sistemas energéticos, la cantidad de indicadores puede representar un sistema muy robusto para la evaluación de la matriz energética de cada país.

Agencia Internacional de Energía (AIE)

El proyecto encabezado por la AIE, consiste en apoyar a los países miembros de ésta en el análisis de los factores que repercuten en los cambios debido a la utilización de la energía y las emisiones de dióxido de carbono. Su propuesta de indicadores contribuye a interconectar el uso de la energía, los precios de ésta y las actividades económicas.

En 2004 la Agencia introdujo un Índice de Desarrollo Energético (EDI, por sus siglas en inglés) en el World Energy Outlook del mismo año para facilitar la comprensión del papel que la energía desempeña en el desarrollo humano. Con el objetivo de medir el progreso de un país o región en la transición hacia combustibles modernos y el grado de madurez del uso final de su energía, captando la calidad y cantidad de los servicios energéticos. En dicha publicación se realizó el primer esfuerzo en el cálculo del EDI haciendo una comparativa con el IDH [18].

Eurostat

El esfuerzo realizado por la Unión Europea (UE) comenzó en 1996 encaminando sus políticas energéticas hacia la seguridad y diversidad del suministro, la eficiencia energética y la competitividad. Lo anterior resultó en una Estrategia de Desarrollo Sostenible (*EDS*) de la UE, que se basa en el principio de que deben examinarse de manera coordinada los efectos sociales, económicos y ambientales de todas las políticas antes de tomar cualquier decisión.

Es por ello que en tras la adopción de la *EDS* y después de diversas revisiones, en 2007 se establece un listado de más de 100 indicadores donde once de ellos de consideran “indicadores principales”. Dicho conjunto se utiliza para elabo-

rar un informe sobre el seguimiento de las EDS cada dos por parte de Eurostat [26].

Por su parte la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) dedicada a generar información fiable sobre el ambiente, se encarga de calcular los indicadores de carácter ambiental que forman parte de los indicadores de la UE de desarrollo sustentable, por tanto ambas instituciones mantienen una estrecha cooperación para proporcionar información sobre el progreso hacia el desarrollo sustentable.

Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente (PNUMA)

Con el objetivo de contribuir al cumplimiento de los ODS, dicha institución en colaboración con el Instituto Internacional del Desarrollo Sustentable (IISD, por sus siglas en inglés) y la Agencia Nacional Australiana para la Ciencia (CSIRO, por sus siglas en inglés), presentaron en Marzo de 2015 una propuesta de indicadores diseñados para mostrar el ritmo al que se está avanzando hacia nuevos patrones de consumo y producción sostenible (SCP, por sus siglas en inglés) que a su vez apoya a la consecución de los ODS. Un primer análisis presentó 200 de ellos que posteriormente fueron filtrados y priorizados con el fin de favorecer su implementación. Su clasificación incluye 6 categorías: 1) La escala de uso de recursos, 2) Desacoplamiento de la actividad económica del uso de los recursos y del impacto ambiental, 3) Impacto ambiental, 4) Tecnología y estilo de vida, 5) Financiamiento e inversión para los SCP y 6) Apoyo gubernamental para los SCP, que a su vez engloban un total de 13 indicadores, que sirven de apoyo para los responsables de formular políticas y en general a los tomadores de decisiones para orientar el progreso hacia el cumplimiento de los ODS [37].

Actualmente se cuenta con esfuerzos tanto individuales como colaborativos por parte de diversas instituciones en el desarrollo de grupos de indicadores, con el fin de ser implementados en cualquier país, sin embargo es importante tomar en cuenta que con la ausencia de información fiable y de calidad, éstos no podrían ser aplicables, por ello es indispensable crear estrategias que permitan la creación de una base de datos sólida y actualizada. En este sentido un marco general de indicadores podría dejar de lado diversos aspectos de cada país dada su generalidad,

no obstante es necesario contar con un sistema que además de medir el progreso, permita comparar el ritmo en que diversas entidades logran el cumplimiento de sus objetivos vinculados a los ODS. A causa de esto también se requiere del desarrollo de indicadores de manera local, para poder considerar las distintas condiciones en las que se encuentra cada país y/o localidad que hoy en día requiera de conocer su progreso hacia el desarrollo sustentable.

Como se ha mencionado, dicho progreso requiere de una transición en el sistema energético global que permita disminuir los efectos negativos hacia el ambiente, la economía y la sociedad. Ante esta nueva dirección en los patrones de producción y consumo, en el siguiente capítulo se aborda el panorama actual y un análisis respecto a la energía eólica en particular mostrando sus impactos y particularidades como fuente de energía. Dado que es un recurso renovable que contribuye a la mitigación de GEI e impulsa a lograr dicha transición hacia un sistema energético responsable y comprometido con el desarrollo sustentable.

3. La energía eólica como impulsor del desarrollo sustentable

En el capítulo 2 se describió un panorama actual sobre el desarrollo sustentable, sus necesidades en cuanto a indicadores y los esfuerzos globales más destacados hasta ahora. En el presente capítulo se destacan las generalidades de la energía eólica para tener un punto de partida que demuestre las oportunidades que su potencial ofrece, en el sentido de contribuir en la transición hacia un modelo energético sostenible, y en el uso de sus diversas aplicaciones que permitan a la sociedad tener acceso a servicios básicos de calidad.

En primera instancia se presentan las características generales de los patrones del viento para entender cómo se forma, lo que establece el panorama para el siguiente tema que habla acerca de cómo se aprovecha éste para producir energía eléctrica con una turbina eólica. Para ello es importante describir las partes que componen dicha tecnología y las funciones que tienen cada una de ellas, y en este sentido mostrar la situación actual tanto global como nacional, en materia del recurso eólico, la capacidad instalada y finalmente la perspectiva referente al aprovechamiento de dicho recurso.

3.1 El viento

Para considerar el aprovechamiento del viento como recurso energético es importante conocer sus características generales, es por esto que a continuación se describe el patrón mediante el cual el viento es producido, las variables que se requieren conocer para saber cuánta energía se puede producir, de qué partes de conforma un aerogenerador y cuánto cuesta la producción de energía eólica. Posteriormente se presenta una breve revisión a acerca del contexto actual en aprovechamiento de dicha tecnología, así como del recurso eólico probado y finalmente de la prospectiva en materia.

3.1.1 Patrón de circulación global

El viento son movimientos del aire o corrientes convectivas que se originan por el calentamiento diferencial producido en distintos puntos geográficos que reciben diferentes cantidades de radiación solar.

En la atmósfera, el aire caliente es más ligero y menos denso que el aire frío, y este se elevará a grandes altitudes conforme sea calentado por la radiación solar. Un cinturón de baja presión se crea en el ecuador debido al aire húmedo caliente que sube desde la atmósfera hasta que alcanza la troposfera y se desplaza hacia el norte y hacia el sur.

A medida que la tierra está girando, los vientos son sometidos a un fenómeno conocido como efecto de Coriolis, lo cual causa la desviación del aire hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur; se trata de una fuerza aparente causada por la rotación de a tierra bajo la acción del movimiento del aire, dicho fenómeno se aprecia claramente en la Figura 6.

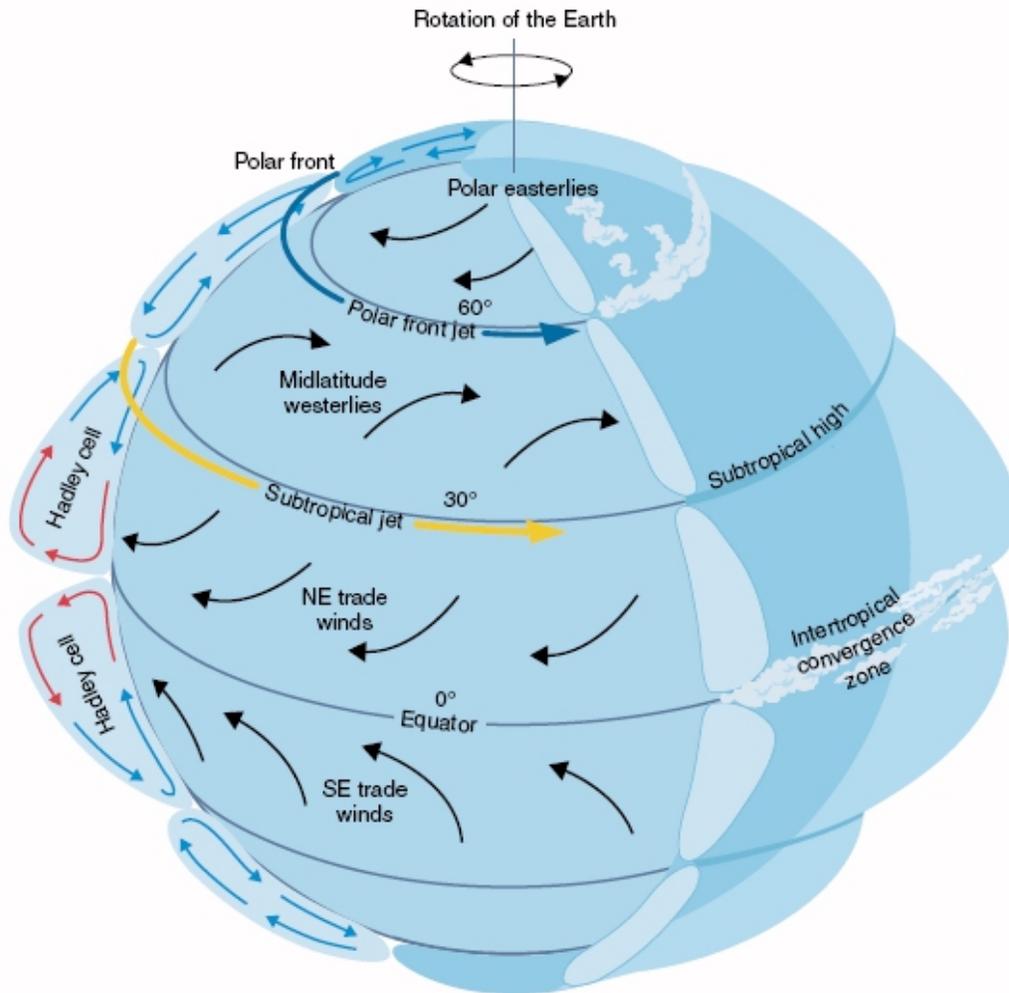


Figura 6: Debido a la radiación solar se forma un cinturón de baja presión en el ecuador y dada la menor densidad del aire caliente, este llega a la tropósfera y se desplaza hacia el norte y el sur en distintas direcciones a causa de la rotación de la Tierra, provocando el efecto Coriolis. Fuente: Satellite Applications of Geoscience Education. Obtenido de: cimss.ssec.wisc.edu (2016)

El patrón de circulación general descrito anteriormente, representa un modelo para una superficie esférica lisa. En realidad la superficie de la Tierra varía considerablemente debido a la existencia de grandes masas oceánicas y terrestres, las cuales afectan el flujo del aire debido a las variaciones de presión, la absorción de la radiación solar y la humedad disponible [3].

Dichas características afectan los vientos globales, regionales y los de menor escala, éstos últimos se pueden dividir en secundarios y terciarios. La circulación secundaria ocurre si los centros de alta o baja presión son ocasionados por los calentamientos o enfriamientos de la atmósfera baja [24] La circulación secundaria incluye los siguientes fenómenos:

- Huracanes
- Circulación Monsónica
- Ciclones Extratropicales

La circulación terciaria es de escala pequeña y son circulaciones caracterizadas por vientos locales como:

- Brisas mar-tierra
- Vientos valle-montaña
- Tormentas eléctricas
- Tornados

Bajo este contexto, las direcciones dominantes del viento así como otros factores locales, son importantes para la evaluación del recurso eólico en distintos sitios.

3.1.2 Aspectos generales de la producción de energía de una turbina eólica

Una vez conocidos los principios de generación del viento, a continuación se presentan los aspectos generales para estimar el potencial de energía eólica en una región y su capacidad de producción energética. La energía disponible en el viento es básicamente la energía cinética de grandes masas de aire que se mueven en la superficie terrestre. Las palas que componen una turbina eólica reciben dicha energía

cinética, la cual es transformada en energía mecánica o eléctrica, dependiendo de su uso final.

La energía cinética de una corriente de aire con masa (m) que se mueve a una velocidad (U) está dada por:

$$E = \frac{1}{2}mU^2 \quad (4)$$

Considerando un rotor de área (A) expuesto a una corriente de aire como se muestra en la Figura 7. La energía cinética de la masa de aire disponible para una turbina se puede expresar como:

$$E = \frac{1}{2}\rho_a v U^2 \quad (5)$$

Donde ρ_a es la densidad del aire y v es el volumen de aire disponible para el rotor con un área determinada. De la ecuación de mecánica de fluidos, la razón del flujo de masa es una función de la densidad del aire (ρ_a) y su velocidad (U), está dada por:

$$\frac{dm}{dt} = \rho AU \quad (6)$$

Por lo tanto la energía cinética por unidad de tiempo P , o potencia del flujo, está dada por:

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} U^2 = \frac{1}{2} \rho AU^3 \quad (7)$$

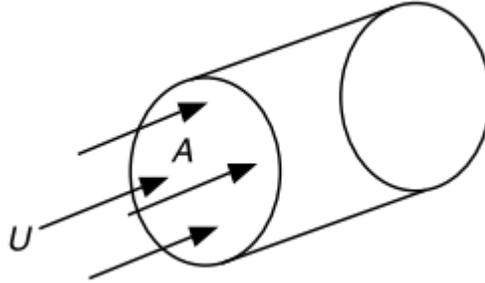
La potencia eólica por unidad de área, $\frac{P}{A}$ o densidad de potencia eólica es:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (8)$$

De las ecuaciones (7) y (8) es importante destacar los siguientes hechos:

- La densidad de potencia eólica es proporcional a la densidad del aire. Para condiciones estándares la densidad de aire se considera como $1.225 \frac{kg}{m^3}$.
- La potencia del viento es proporcional al área de barrido del rotor.
- La densidad de potencia eólica es proporcional al cubo de la velocidad del viento.

Figura 7: Flujo de aire a través del rotor de área A , y velocidad U . Fuente: [24]



Cuadro 1: Potencia por unidad de área disponible a velocidades constantes de viento. Fuente: [24]

Velocidad del viento (m/s)	Potencia/área (W/m ²)
0	0
5	80
10	610
15	2070
20	4900
25	9560

El potencial de producción real de una turbina eólica debe tener en cuenta la mecánica de fluidos que pasa a través de un rotor así como la eficiencia del rotor y generador. Sin embargo la velocidad del viento es un parámetro importante que influye significativamente, es decir, entre mayor sea esta, mayor será la potencia de producción de una turbina como se muestra en el Cuadro 1.

La potencia de salida de un aerogenerador varía con la velocidad del viento y cada turbina tiene una curva de potencia característica. La forma de una curva de potencia es influenciada por el área barrida por el rotor, la elección del perfil aerodinámico, el número de palas, la forma de las palas, la relación de velocidad de la punta, la velocidad de rotación, la velocidad de arranque, nominal y de corte del viento, la eficiencia aerodinámica y la del generador. Un ejemplo de dicha curva es la Figura 8.

La velocidad de arranque es la velocidad mínima del viento a la que la máquina entregará potencia útil, mientras que la velocidad nominal del viento es la velocidad del viento a la que se alcanza la potencia nominal (generalmente la potencia máxima de salida del generador eléctrico). Por otro lado la velocidad de corte es la velocidad máxima del viento a la que la turbina puede suministrar potencia [24].

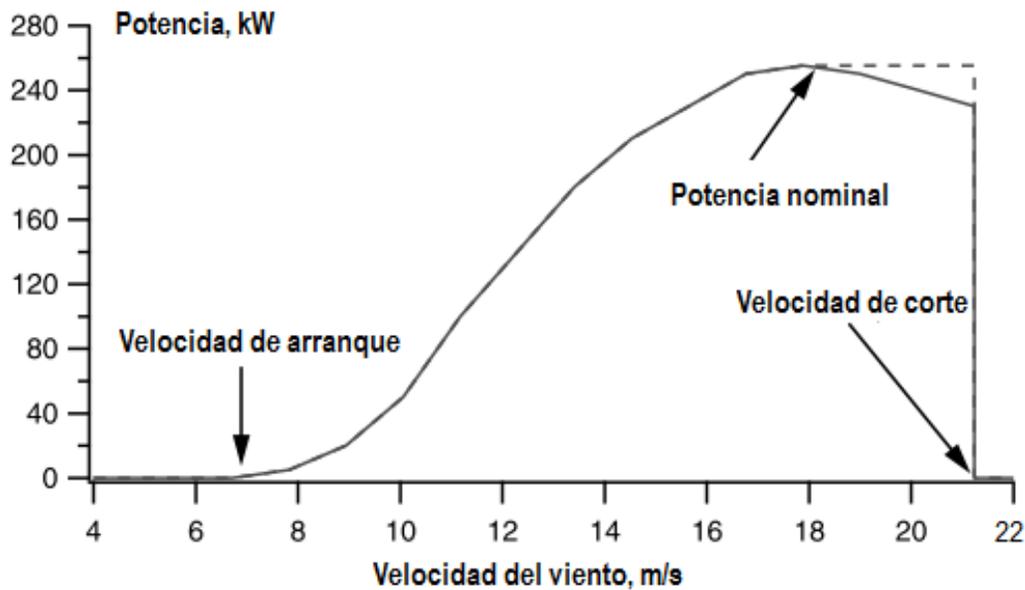


Figura 8: Ejemplo de una curva de potencia característica de un aerogenerador. Fuente: [24]

Para conocer la energía que una turbina eólica puede producir es necesario contar con un histograma (Figura 9), el cual representa la frecuencia de velocidades del viento en un determinado sitio y sirve para describir el número de horas para las que el viento se mueve a distintas velocidades durante un periodo de tiempo.

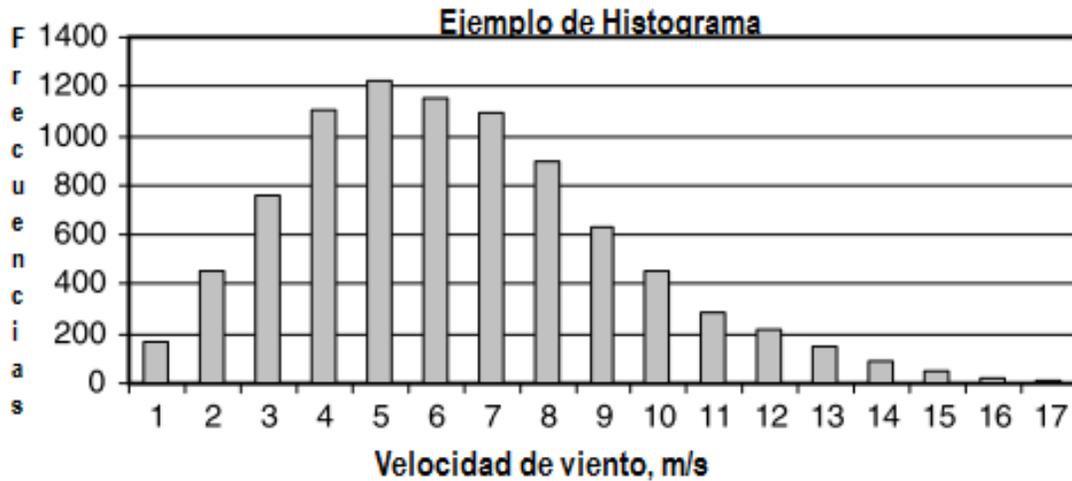


Figura 9: Histograma que representa la distribución de frecuencia de velocidades del viento. Fuente: A. James Manwell, 2009.

En este sentido, es importante contar con un histograma para seleccionar o diseñar el aerogenerador con determinadas características (que muestra su curva de potencia) para aprovechar al máximo el recurso eólico con que puede contar cualquier lugar.

3.1.3 La energía eólica moderna

Una turbina eólica, es una maquina que convierte la energía del viento en energía eléctrica. A diferencia de un molino de viento, el cual convierte la energía del viento en mecánica. Así como los generadores eléctricos, las turbinas eólicas, también denominados aerogeneradores, se conectan a las redes eléctricas; éstas pueden incluir circuitos de carga compuestos por baterías, sistemas de potencia eléctrica a escala residencial, redes eléctricas aisladas y grandes redes interconectadas.

Para comprender el funcionamiento de los aerogeneradores, es importante examinar los principios generales bajo los cuales operan. El procedimiento de transformación en las turbinas eólicas modernas utiliza el principio básico de las fuerzas

aerodinámicas para producir un torque positivo sobre un eje, resultando en energía mecánica y posteriormente su transformación a electricidad mediante un generador.

A diferencia de cualquier otro generador, las turbinas eólicas pueden producir energía sólo del viento que se encuentra disponible en el momento. De manera que la energía eléctrica de salida de dichos dispositivos es variable en el tiempo, por lo tanto es fundamental que cualquier sistema que desea emplear el uso de aerogeneradores, tome en cuenta la variabilidad de generación.

En este sentido, la explotación a gran escala de la energía eólica se desarrolla mediante la instalación de conjuntos de aerogeneradores de gran potencia en granjas eólicas con capacidades instaladas cada vez mayores (Figura 10).

De tal forma que los retos en la industria eólica consisten en diseñar aerogeneradores cada vez más grandes que operan a condiciones de vientos estables, el diseño y control, la selección de los sistemas aislados, el diseño y la integración a las edificaciones o la red eléctrica. Este tipo de aplicaciones son desarrolladas principalmente por grandes empresas o gobiernos debido al alto costo de las inversiones, la segunda vertiente es la pequeña escala o de uso domestico, que principalmente se utiliza en sistemas eléctricos aislados y están orientados a satisfacer las necesidades energéticas de dicho sector o tienen la función de ser fuentes complementarias de los sistemas de abastecimiento eléctrico tradicional como los sistemas integrados a las edificaciones.

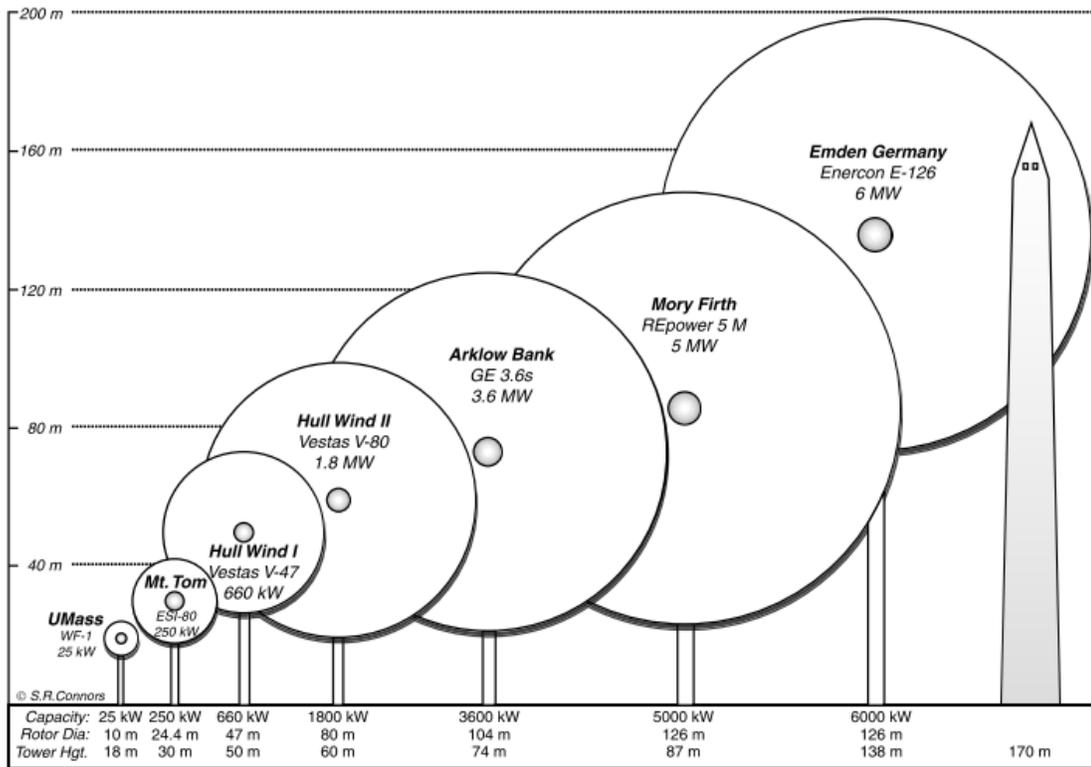


Figura 10: Representación de distintos tamaños, alturas y diámetros de aerogeneradores. Fuente: Obtenida de [24]

Actualmente no existe una definición global sobre la Energía Eólica de Baja Potencia, originalmente se definió así dado su baja producción de electricidad para aplicaciones domésticas o para cubrir diversas necesidades eléctricas en los hogares [13], sin embargo el consumo de energía promedio en los hogares difiere para cada país. Existen diversos parámetros aceptados, por ejemplo la Comisión Internacional Electrotécnica (IEC, por sus siglas en inglés) las clasifica así cuando el área del rotor no supera los $200m^2$ y tienen una potencia aproximada de 50 kW, por otro lado la Asociación de Energía y Eficiencia Energética (REEEP) de China estipula que son turbinas con menos de 100 kW, otro parámetro es el de la Asociación Alemana de Energía Eólica (BWE, por sus siglas en alemán) con un límite de 75 kW de capacidad. En este sentido, una definición universal requiere de acuerdo globales para su clasificación definitiva.

Un estudio desarrollado en Canadá [23] afirmó que el uso de turbinas de pequeña capacidad (debajo de los 10kW) de eje vertical es capaz de competir con otras energías renovables en nichos específicos del mercado. Se ha demostrado que el uso de estas tecnologías ofrece beneficios ambientales que pueden contribuir significativamente al objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al desplazar el uso de los combustibles fósiles convencionales y tomar un paso esencial al futuro sustentable.

Hoy en día las aplicaciones más comunes de los aerogeneradores de baja potencia incluyen las residenciales, comerciales e industriales, sistemas híbridos, sistemas de bombeo, desalinización, purificación, educativas, de investigación e incluso para sistemas de telecomunicaciones. A pesar de la tendencia actual hacia grandes granja eólicas conectadas a la red eléctrica, las aplicaciones fuera de la red juegan un importante papel en las áreas remotas de países en desarrollo.

Componentes

El diseño más común de una turbina eólica es la de eje horizontal o Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT), por su nombre en inglés. Es decir, el eje de rotación es paralelo al suelo, este tipo de rotores se suelen clasificar de acuerdo a las siguientes características:

- Posición del rotor, barlovento o sotavento.

- Número de palas.

- Diseño del cubo.

- Orientación, libre o activo.

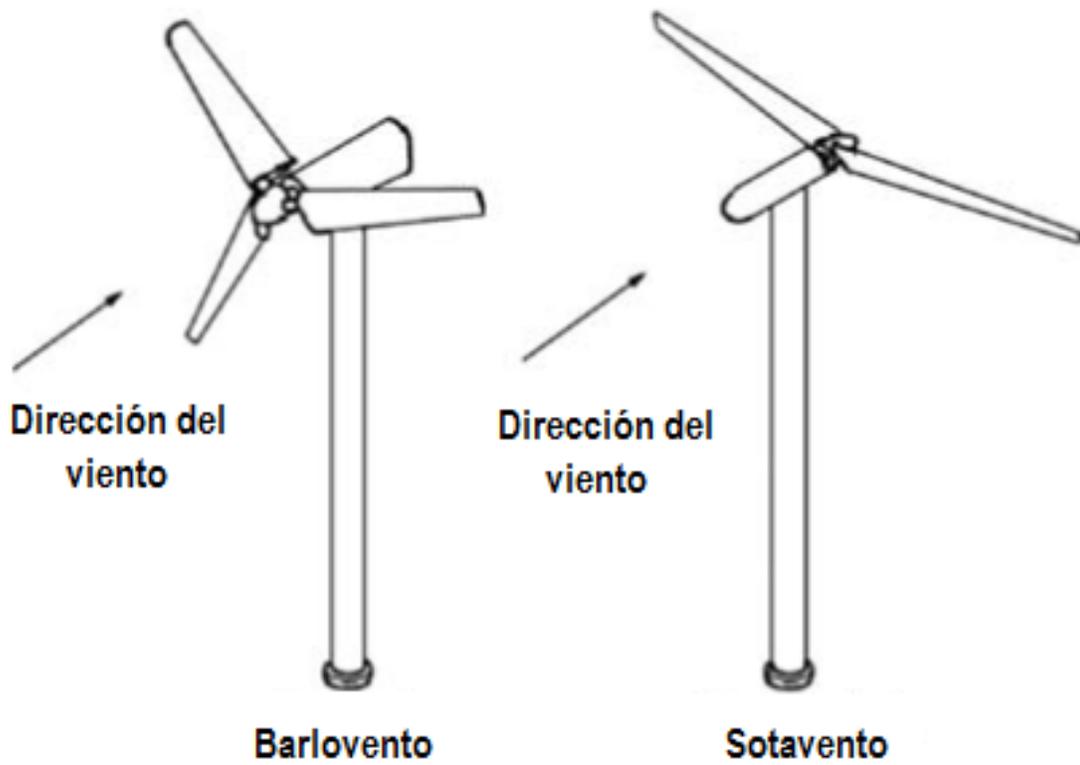


Figura 11: Posiciones del rotor Barlovento (upwind) y Sotavento (downwind).
Fuente: Tomado y modificado de [24].

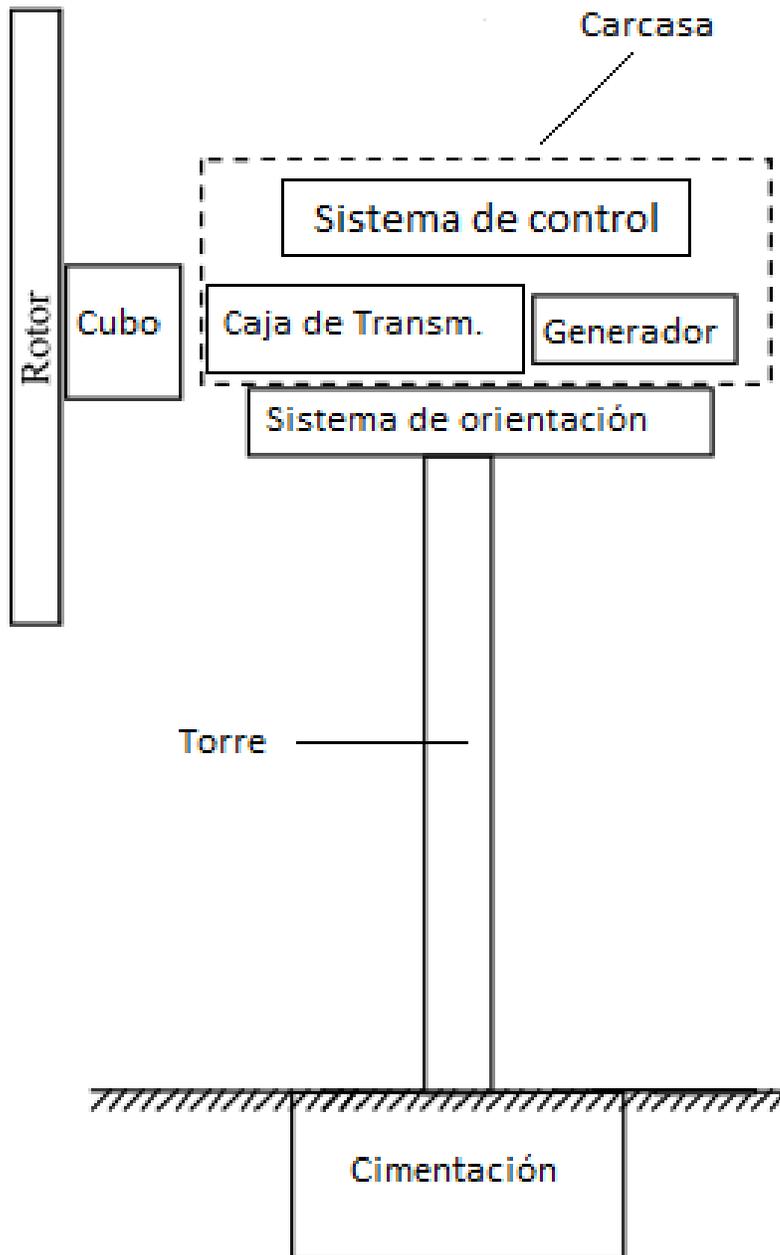


Figura 12: Subsistemas de un aerogenerador de eje horizontal. Obtenida de [24].

Los principales subsistemas de un aerogenerador (Figura 12) de eje horizontal son los siguientes: El rotor consiste en el cubo y las palas de aerogenerador, se

consideran los componentes más importantes para el rendimiento y costo total del dispositivo. Actualmente, la mayoría de las turbinas son a barlovento (Figura 11). Existen algunos diseños a sotavento y a dos aspas. Las palas en la mayoría de las turbinas son fabricadas con fibra de vidrio, plásticos reforzados y en algunas ocasiones por láminas de madera.

Caja de transmisión: está compuesta por las partes rotatorias del aerogenerador, incluyen un eje de baja velocidad, del lado del rotor, una caja de engranes y un eje de alta velocidad (del lado del generador). El objetivo de la caja de engranes es aumentar las revoluciones por minuto (entre 10 y 20 rpm) a una tasa razonable para un generador estándar (1500 a 2000 rpm).

Generador: Casi todos los aerogeneradores usan generadores de inducción o síncronos. Ambos diseños requieren una velocidad de rotación constante cuando el generador se conecta directamente a la red.

Carcasa y sistema de orientación: En esta descripción se incluyen la carcasa, el soporte estructural y el sistema engranado de orientación. El soporte estructural es la base donde los componentes mecánicos y eléctricos se sujetan y alinean. El sistema de orientación se requiere para mantener el eje del rotor alineado con el viento. El principal componente del sistema de orientación es un engranaje que se conecta al soporte estructural con la torre.

Torre y cimientos: Los principales tipos de torres usados en la actualidad son de tres tipos, tubo de metal, estructuras metálicas armadas y torre de concreto. La altura de las torres es comúnmente de 1 a 1.5 veces el diámetro del rotor, mientras que la elección de la torre está dada por las características del sitio. La rigidez de ésta es un factor importante en la dinámica de la turbina eólica debido a la posibilidad de vibraciones entre el rotor y la torre.

Controles: El sistema de control para una turbina eólica es muy importante respecto a la operación de la máquina y la producción de energía. El sistema de control incluye los siguientes componentes:

- Sensores: De velocidad, posición, flujo, temperatura, corriente, voltaje, etc
- Controles: Dispositivos mecánicos, circuitos eléctricos y computadoras.
- Amplificadores de potencia: Interruptores, amplificadores eléctricos, bombas hidráulicas y válvulas.

3.2 Recurso eólico

La energía eólica es una de las formas de energía más antiguas que se han utilizado, su uso data en el año 3.000 a. C. principalmente se usaba para moler el grano o para el bombeo de agua, mientras que en los barcos de vela el viento ha sido una fuente esencial. Desde el siglo XIII, los molinos de viento de eje horizontal fueron una parte integral de la economía rural y cayeron en desuso con la llegada de los motores de combustibles fósiles baratos, y luego la extensión de la electrificación rural para encontrar el primer uso generalizado del viento como fuente de energía.

Con la invención de la máquina de vapor durante la Revolución Industrial, los molinos dejaron de utilizarse, y el siguiente paso en la historia de la energía eólica llegó en los primeros años de ese siglo XIX. En 1802 Lord Kelvin tuvo la idea de acoplar un generador eléctrico a una máquina que aprovechara el viento. Hasta que en 1850 se inventó la dinamo, el inventor Charles F. Brush creó en 1888 la primera turbina eólica para generar electricidad.

3.2.1 Global

El potencial de la energía eólica es importante desde la perspectiva social y económica, además de la ambiental. Por ejemplo, para cualquier inversión en este tipo de energía es fundamental conocer cuánto es el recurso disponible para llevar a cabo la implementación de un proyecto en cuestiones de costo beneficio, así como considerar el tipo de beneficios hacia la sociedad y posible impacto en el ambiente.

Con base en un gran número de estudios que se han realizado sobre el potencial total mundial para la energía eólica alrededor del mundo, la Asociación Mundial de Energía Eólica (WWEA, por sus siglas en inglés) en el World Wind Resource Assesment Report [7], presenta una recopilación de éstos. La tabla 1 resume el potencial mundial para parques eólicos según las estimaciones oficiales disponibles, en la mayoría de los casos con exclusión del potencial de la energía eólica marina.

Cuadro 2: Potencial total global del recurso eólico obtenido de [7]

Lugar	Potencia (TW)
Estados Unidos	11
Unión Europea	37.5
Rusia	36
Resto del mundo	10.39
Total	94.8

En particular se observa que para en “resto del mundo” se tienen cifras significativamente bajas, considerando la diferencia de área territorial en comparación con Europa, Estados Unidos y Rusia (donde hasta el momento, es el análisis más completo que se ha realizado), en realidad el potencial eólico en dicha categoría debería ser significativamente mayor que Europa. Lo anterior radica en que para el resto del mundo, no existen análisis completos sobre el potencial eólico.

3.2.2 Nacional

En los últimos diez años diversas instituciones se han encargado de realizar estudios acerca del potencial que tiene México para aprovechar las tecnologías de energías renovables, sin embargo bastante ha sido el interés por la energía eólica dada la ubicación geográfica del país y las condiciones climatológicas. Es así como en 2013 el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), ahora Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) en colaboración con la Secretaría de Energía (SENER) realizaron un estudio mediante el cual identificaron los estados con mayor potencial eólico, donde destacan Oaxaca, Coahuila y Baja California

como se muestra en la Tabla 3 ([33]).

Cuadro 3: Capacidad instalada y potencial de generación en México. Obtenido de: Recursos Renovables para la producción de electricidad en México, CFE, SENER, México D.F., 2014

Estado	No. de sitios	Cap. Inst. (MW)	Potencial de Generación (GWh/a)
Baja California	3	528.8	1,621.85
Chiapas	1	10	27
Coahuila	3	550.6	1,933.9
Nuevo León	2	378	990
Oaxaca	9	1,175.4	4,387.4
Puebla	1	66	243.6
San Luis Potosí	1	200	620
Sonora	1	1.8	6.7
Tamaulipas	8	499.7	1,664.2
Veracruz	1	40	126
Total general	30	3,450.35	11,620.82

Con base en lo anterior, el potencial eólico probado asciende a 3,450MW de capacidad instalable. A pesar de que México cuenta con 32 entidades federativas, los resultados anteriores reflejan el potencial para 10 estados únicamente, esto se traduce en una limitante para aquellos tomadores de decisiones en la implementación de tecnología de energía eólica.

Es así como mediante el compromiso de México en cuanto a la diversificación de la matriz energética y, de acuerdo al Artículo 6 de la reforma de la LAER-FTE, corresponde a la SENER establecer y actualizar el Inventario Nacional de las Energías Renovables (INER), es por ello que surgen dos instrumentos clave para la toma de decisiones en cuanto a la inversión en energías renovables se refiere y de este modo lograr las metas establecidas en la LGCC. Los instrumentos son el Inventario Nacional de Energías Limpias (INEL) antes llamado INERE y el Atlas de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias (AZEL) ([34]).

La evaluación del AZEL propone 4 escenarios con el objetivo de obtener diferentes apreciaciones del potencial. El Escenario 1 está enfocado en identificar zonas con alto potencial para el desarrollo de proyectos de generación de energía por medio de energías limpias sin considerar la cercanía con la Red Nacional de Transmisión (RNT), el Escenario 2 se orienta hacia los sitios con alto potencial interconectados con base en energías renovables, el Escenario 3 se enfoca en identificar sitios con interconexión cercana a la RNT (a 10km) y finalmente el Escenario 4 identifica aquellos que están a más de 20km de la RNT.

Cuadro 4: Potencial aprovechable de Energía Eólica en México. Fuente: elaboración propia con datos del AZEL, 2016, fecha de consulta Mayo 2017.

<i>Energía Eólica</i>	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Capacidad instalable (MW)	583,200	290,249	158,302	297,444
Potencial de generación (GWh/a)	1,486,713	740,332	402,847	750,186
Emisiones de CO₂ evitables (Mt/a)	674,967	336,111	182,892	340,584

La Tabla 4 muestra el potencial aprovechable de energía eólica en México de acuerdo al estudio realizado por SENER y CFE, además dicha plataforma muestra los cuatro escenarios para diversos estados de la República Mexicana, donde destacan con mayor potencial de generación en el Escenario 1 el estado de Chihuahua con el 19.7% seguido por Coahuila con el 16.7% del total del país. Para el Escenario 2 es liderado también por Chihuahua seguido por Tamaulipas, en el Escenario 3, Tamaulipas ocupa el primer lugar con casi el 15% y finalmente en el Escenario 4 destaca en primer lugar Chihuahua con casi el 25% seguido por Coahuila cerca del 20%. Es notable que Coahuila, Chihuahua y Tamaulipas son definitivamente los tres estados con mayor oportunidad en México para el aprovechamiento del recurso eólico en cualquiera de los cuatro escenarios propuestos.

3.3 Situación Mundial de la Energía Eólica

En esta sección se presenta el panorama más reciente de la capacidad instalada en materia de la Energía Eólica tanto global como nacional, a fin de conocer su crecimiento en los últimos años y lo que los especialistas en materia estiman que se logrará en los próximos.

En 2015 la industria de la Energía Eólica sobrepasó los 60 GW instalados anualmente por primera vez en la historia, después del último record registrado en 2014 con poco más de 50 GW de nueva capacidad. Como resultado, al cierre de 2015 se tuvieron en total 439.9 GW acumulados, dicho crecimiento se logró en su mayoría debido a la contribución de más de 30,000 MW instalados en China, representando casi la mitad de la nueva capacidad instalada para dicho año ([12]). De esta manera ha liderado el mercado eólico en general desde 2009, situando a Asia en primer lugar, seguido de Europa y América del norte en tercer lugar en capacidad instalada.

Capacidad acumulada a Diciembre de 2015

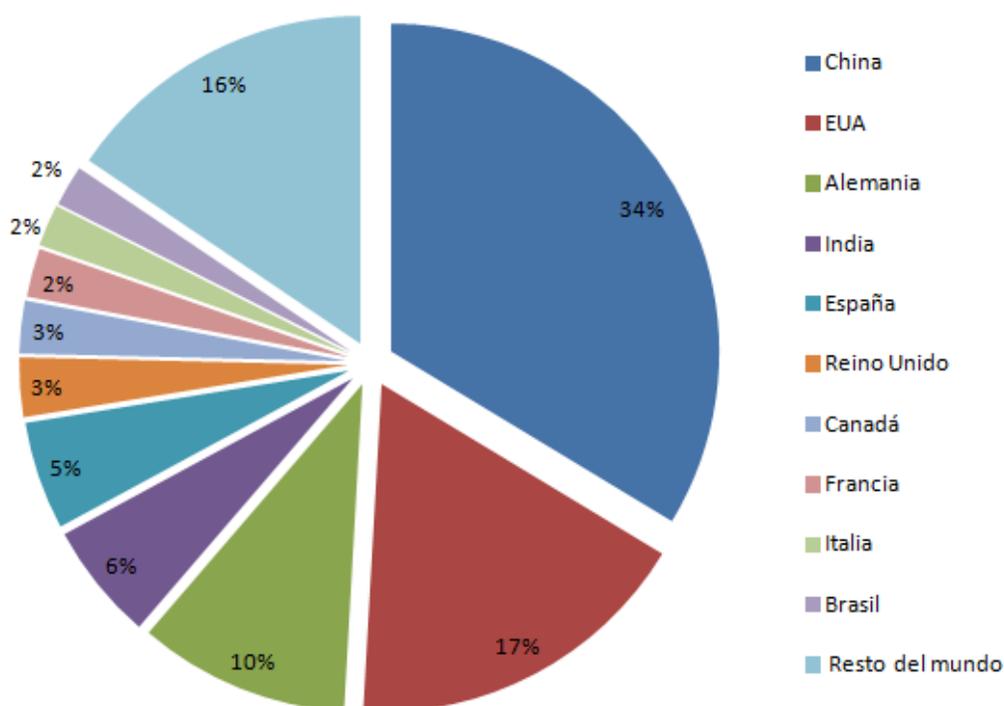


Figura 13: Países con mayor contribución global de capacidad acumulada al mes de Diciembre de 2015. Fuente: Elaboración propia con datos de [12]

A finales de 2015 los países con más de 10,000 MW de capacidad instalada fueron en primer lugar China (145,632 MW), seguido de Estados Unidos (74,471 MW), Alemania (44,947 MW), India (25,088 MW), España (23,025 MW), Reino Unido (13,603 MW), Canadá (11,205 MW), y Francia (10,358 MW) cubriendo casi el 85% del total global (Figura 13). Por otro lado fueron 26 países que en total agregaron más de 1,000 MW instalados, entre ellos Japón, Australia, Canadá, Estados Unidos, México y Brasil.

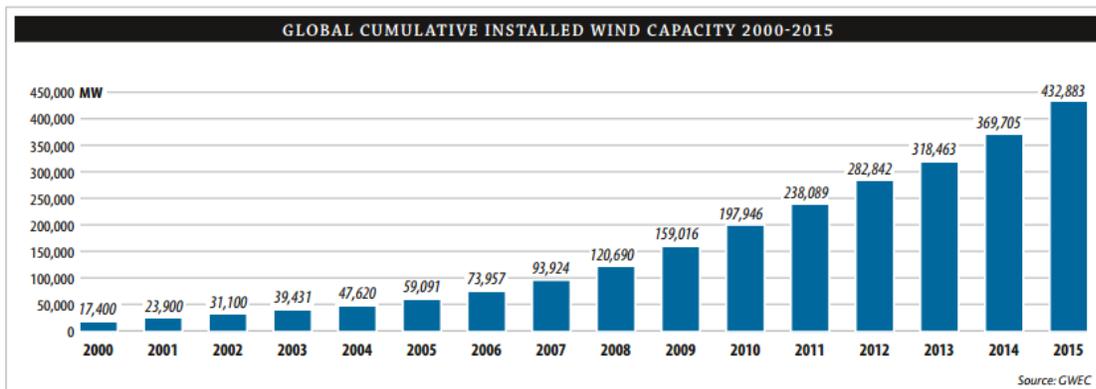


Figura 14: Capacidad instalada global acumulada de 2000 a 2015. Fuente: Obtenida de [12]

Dado que es importante conocer cómo se ha desarrollado el aprovechamiento de dicha tecnología en los últimos años, el Consejo Mundial de la Energía Eólica (GWEC, por sus siglas en inglés) presentó en 2015 ([12]) la Figura 14 que muestra el progreso en cuanto a capacidad instalada global acumulada se refiere, durante el periodo de 2000 a 2015 se tuvo un crecimiento acumulado del 17 %, y tan solo de 2014 a 2015 un 22 %.

Por otro lado la Asociación Mundial de Energía Eólica (WWEA, por sus siglas en inglés) ha dedicado esfuerzos para recopilar información sobre el progreso mundial de aerogeneradores específicamente de baja potencia. De acuerdo con el Reporte de Energía Eólica de Baja Potencia 2017 [13] publicado por dicha asociación, China lidera el mercado en términos de unidades instaladas de baja potencia representando casi el 70 % mundialmente, seguido por Estados Unidos con el 31 % y el Reino Unido con el 9 %, lo cual representó un crecimiento del 18 % de la capacidad global instalada, alcanzando 678 MW al termino del 2012. Cabe mencionar que estos tres países cuentan con turbinas de distintas capacidades, en China por ejemplo alcanzan 0.5 kW, en Estados Unidos tienen en promedio capacidad de 1.5 kW y en Reino Unido llegan a 3.7 kW.

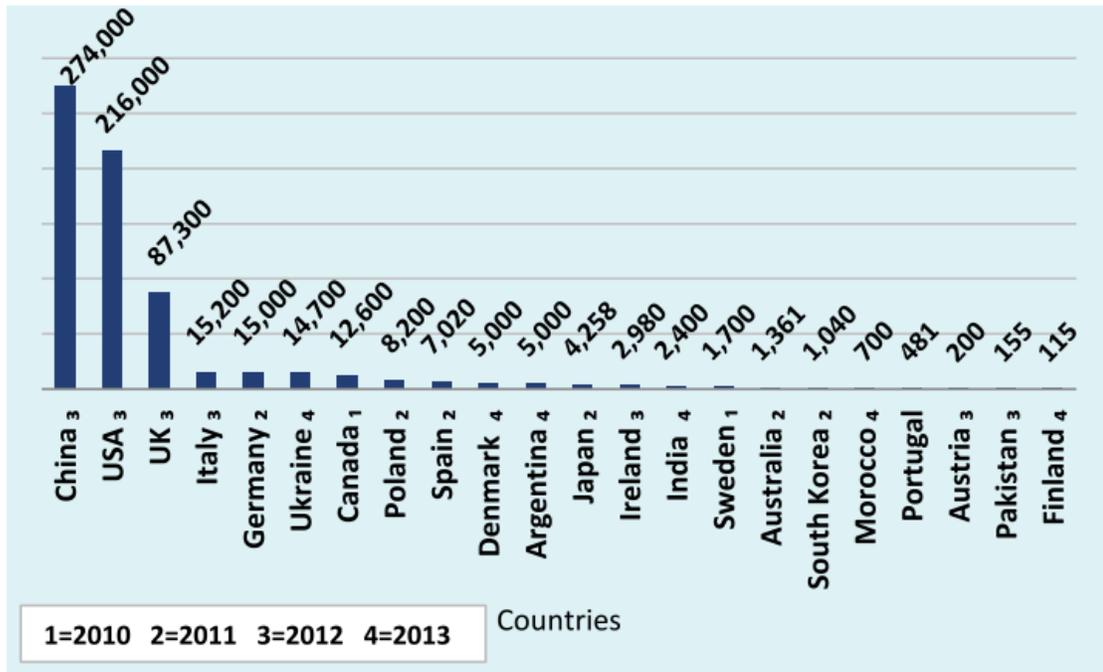


Figura 15: Capacidad acumulada instalada (kW) de aerogeneradores de baja potencia . Fuente: Obtenido de [13]

La Figura 15 describe la capacidad acumulada instalada de energía eólica de baja potencia en 22 países, sin embargo es notable que los datos no están dados para un solo año, es decir para cada país se tiene un dato en años distintos desde 2010 a 2013, situación que representa un reto en impulsar la creación de una base de datos sólida y actualizada. Dado que no existe un parámetro universalmente aceptado en cuanto a la máxima capacidad que puede tener una aerogenerador de este tipo, dicho reporte utiliza como referencia temporal aquellos con capacidad máxima de 100 kW, no obstante puntualiza la necesidad de una clasificación internacional.

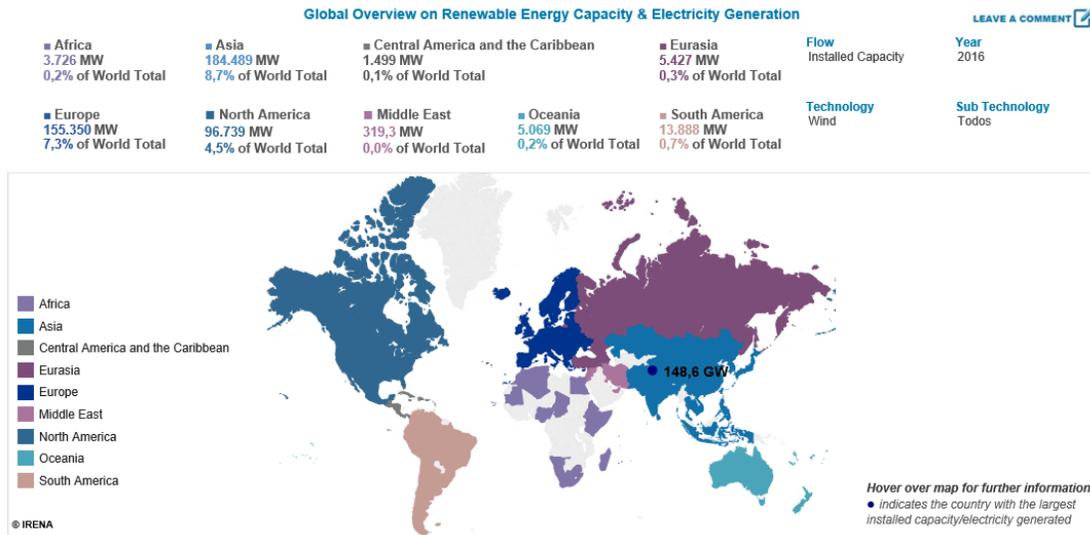


Figura 16: Panorama global de la capacidad instalada de energía eólica tanto terrestre como marina al 2016. Fuente: Recuperado de IRENA

Según cifras de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés) en 2015 las energías renovables proporcionaron el 19.3 % del consumo mundial de energía final, ésta cifra contempla las energías renovables modernas y tradicionales. La energía eólica por su cuenta contribuye con apenas el 4 % de la producción total de electricidad, de esta manera la Figura 16 muestra el panorama global de la capacidad instalada de energía eólica. Al cierre de 2016 América del Norte contribuyó con casi el 4.5 % donde México apenas cubre el 0.8 % de éste con 3,527 MW.

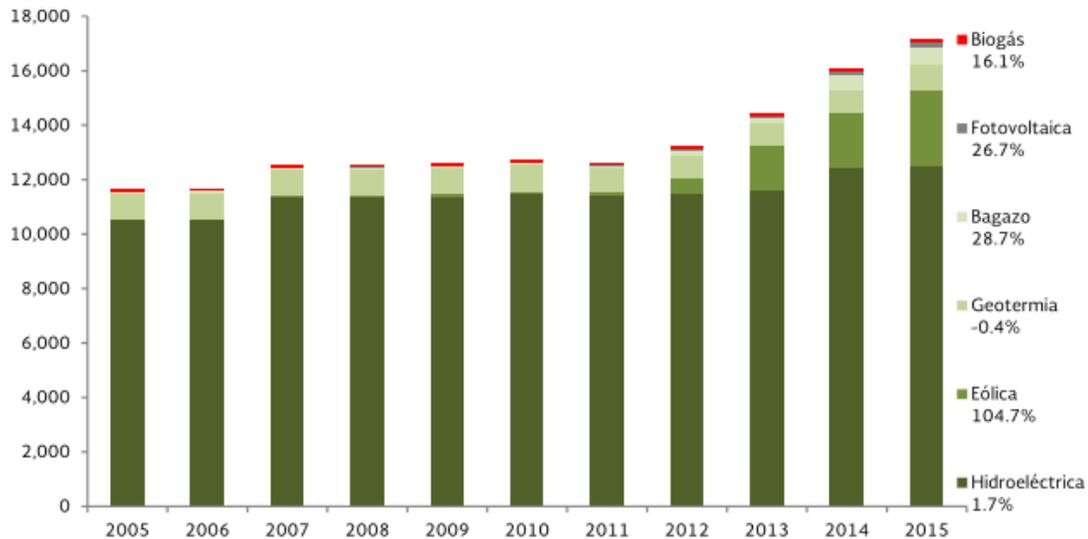


Figura 17: Evolución de la capacidad instalada en México con energías renovables de 2005 a 2015. Fuente: Obtenido de [34]

Ahora bien en México se han llevado a cabo múltiples esfuerzos para diversificar la matriz energética, desde la adecuación en el marco normativo que ha permitido la inclusión de las energías renovables en el país y ha atraído la inversión en diversas tecnologías, siendo la energía eólica una de las que mayor crecimiento ha tenido. En términos generales la capacidad de generación mediante energías renovables se incrementó 6.6 % al final del 2015 [34], llegando a los 17,140 MW (Figura 17). A pesar de que la Hidroeléctrica domina la capacidad instalada, la Eólica es la que mayor expansión ha presentado con un 104.7 % anual como lo describe Figura 17, mientras que la primera solo ha crecido 1.7 % . Asimismo el 15.3 % de la generación eléctrica total nacional fue representado por fuentes de energía renovable, donde la eólica incremento de 5.0 GWh a 8,745.1 GWh en la última década (Figura 18).

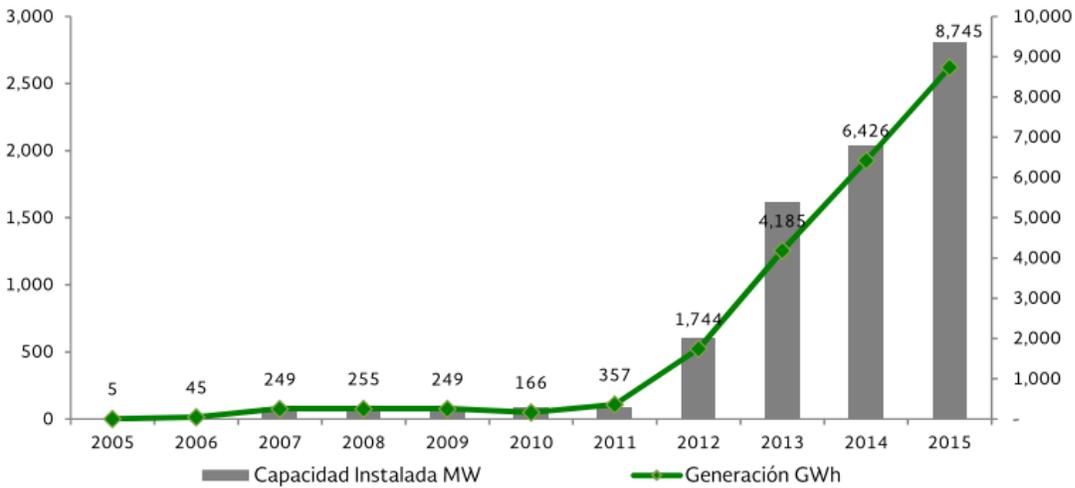


Figura 18: Capacidad instalada y generación bruta de centrales eólicas de 2005 a 2015. Fuente: Obtenida de [34].

La generación eléctrica a través de la energía eólica ha crecido significativamente desde 2005, lo cual la clasifica en la segunda fuente de generación renovable después de la Hidroeléctrica. Al 2015 se contaba con un total de 32 plantas de generación, distribuidas en 10 estados de la República Mexicana (Cuadro 5), 23 de éstas se ubican en el área Oriental (de acuerdo a la clasificación del SEN), particularmente en el estado de Oaxaca, región que cuenta con 2,308.6 MW de capacidad instalada.

Cuadro 5: Centrales eólicas en México al término de 2015. Fuente: Elaboración propia con datos de [34].

Región	Estado (s)	Capacidad instalada (MW)	Generación bruta (GWh)
Baja California	Baja California	166.0	272.6
Noroeste	Sonora	2.0	3.6
Noreste	Tamaulipas y Nuevo León	166.0	196.8
Mulegé	Baja California Sur	0.6	-
Occidental	San Luis Potosí y Jalisco	250.4	445.6
Oriental	Oaxaca y Chiapas	2,308.6	7,824.4
Peninsular	Quintana Roo	1.5	2.1

La segunda región con mayor generación eléctrica mediante Eólica es la Occidental en los estados de San Luis Potosí y Jalisco con 445.6 GWh, seguido por Baja California con 272.6 GWh de generación anual al año 2015.

3.4 Prospectiva en materia Eólica

En esta sección se presenta la situación futura que los expertos han estudiado sobre la energía eólica en materia de generación eléctrica. El objetivo de presentar dicha información radica en la importancia de confirmar que el crecimiento de dicha tecnología prevalece e incrementa como lo ha echo los últimos años. Esto además sirve para dar confiabilidad a los tomadores de decisiones en cuanto al uso de los aerogeneradores. En términos generales el Consejo Mundial de la Energía Eólica se encarga de recopilar dicha información y generar diversos reportes que expresan la situación actual de dicho recurso.

Es así como la Prospectiva Global de Energía Eólica (GWEO, por sus siglas en inglés) explora el futuro de la industria de la energía eólica mediante cuatro escenarios posibles a 2020, 2030 y hasta el año 2050. Establece como línea base el Escenario de Nuevas Políticas de la Agencia Internacional de Energía (IEA) y en la edición más reciente [8] se incluyó el Escenario 450 de la EIA, además del

Escenario Moderado y el Avanzado propios del GWEC.

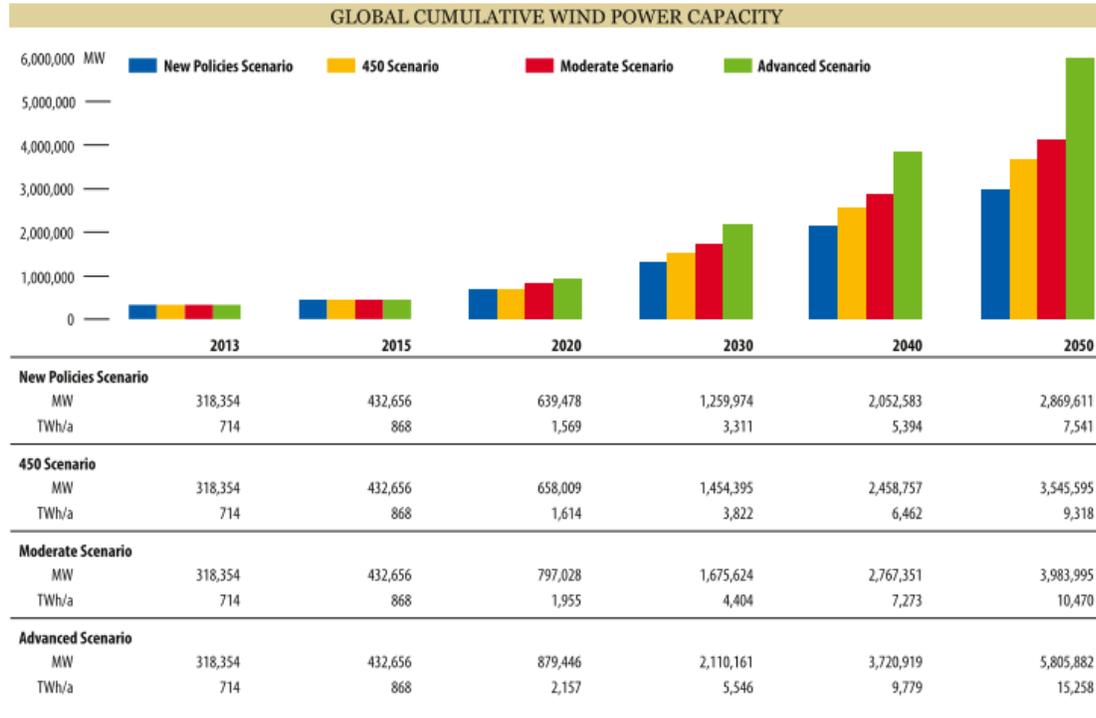


Figura 19: Capacidad global acumulada de Energía Eólica en los cuatro escenarios de acuerdo a la Prospectiva Global de Energía Eólica. Fuente: [8]

El Escenario de Nuevas Políticas (NPS, por sus siglas en inglés) está basado en una evaluación de la dirección actual en que se dirige la política energética y climática nacional e internacional, ejemplo de ello son los objetivos de reducción de emisiones adoptados en París (COP 21). Mientras que el Escenario 450 establece un camino mediante el cual existe un 50 % de probabilidad de limitar el aumento de la temperatura media a 2°C, lo cual requiere restringir la concentración de GEI en la atmósfera alrededor de 450 partes por millón de CO₂ equivalente (ppm CO₂-eq) a largo plazo. Por otro lado, el Escenario Moderado (MS, por sus siglas en inglés) asume que se cumplen todas las medidas políticas de apoyo a las energías renovables ya promulgadas o en las etapas de planificación alrededor del mundo y el cumplimiento moderado del compromiso de la reducción de emisiones acordado

por la COP 21, además se basa en la planificación de la industria así como en decremento del costo de la energía eólica y el aumento del precio por parte de las fuentes convencionales [8]. Finalmente el Escenario Avanzado (AS, por sus siglas en inglés) es el más ambicioso y describe el crecimiento de la energía eólica en el mejor de los casos, éste asume un gran compromiso con las energías renovables, supone que los gobiernos promulguen políticas claras y efectivas sobre la reducción de emisiones de CO₂, sin embargo, no considera la posibilidad de una nueva instalación nuclear.

Los resultados de la comparación de los cuatro escenarios (Figura 19) muestra que la capacidad instalada en el Escenario 450 y el NPS de 2015 a 2020 tienen un crecimiento de 52% y 50% respectivamente, sin embargo, en 2020 el primero supera al segundo por 18.5 GW y para 2040 por más de 400 GW. Por otro lado, el AS y el MS de 2015 a 2020 tienen un crecimiento del 103% y 84% respectivamente, mientras que la diferencia entre éstos en 2020 es alrededor de 82.4 GW, superando el AS al MS.

3.4.2 Prospectiva Nacional

El gobierno mexicano ha fijado el ambicioso objetivo de que las energías limpias participen con el 35% en la generación de energía eléctrica para el año 2024, y la energía eólica tiene un papel importante. Dado la entrada en operación de nuevas centrales en construcción, se espera que en los próximos años la capacidad eólica sea el triple de lo que hoy día se encuentra instalado [34]. La capacidad que se proyecta adicionar se concentra en dos periodos, 2016-2030 y 2024-2027, en el primero se instalarán 6,633.1 MW y en el segundo 5,366.9 MW.

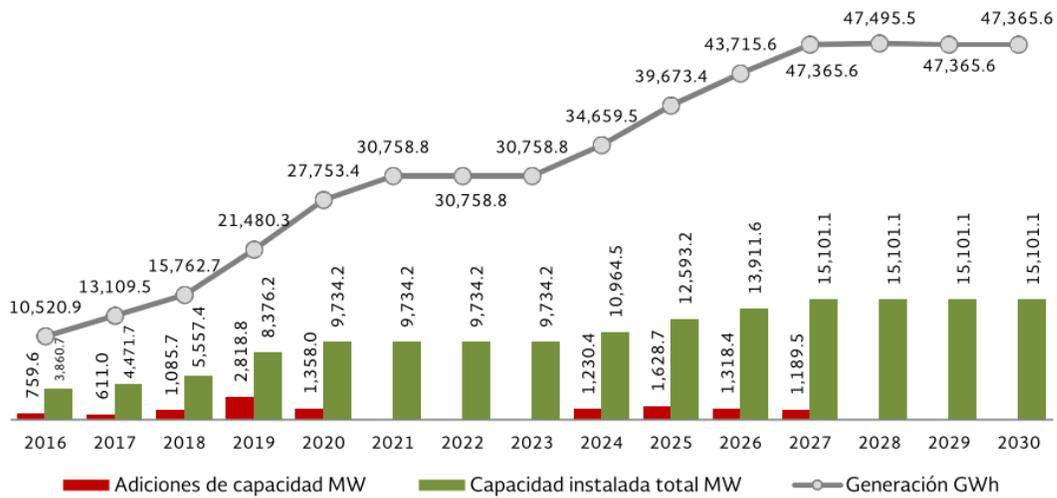


Figura 20: Evolución de la adiciones de capacidad, capacidad instalada y generación de las centrales eólicas en el periodo de 2016 a 2030. Fuente: [34]

En la Figura 20 se muestra el crecimiento planeado de la Energía Eólica en México, y se observa que la generación de energía eléctrica en 2016 era de 10,520.9 GWh y posteriormente en 2030 llegará a 47,365.6 GWh, situación que representa un crecimiento de 450.2%. Asimismo, la capacidad instalada total en 2016 era de 759.6 y al 2030 llegará a los 15,101.1 MW.

4. Los indicadores como medida del progreso hacia el desarrollo sustentable

De acuerdo a la revisión literaria, el presente capítulo se aborda el marco que describe el proceso que implica el desarrollo de indicadores, desde los marcos en los que se basan, las metodologías aplicadas, hasta el cálculo y obtención de los mismos. El proceso del desarrollo de indicadores involucra seis etapas en las cuales se pueden aplicar una variedad de metodologías para cada una. La primera etapa consiste en seleccionar los criterios de evaluación, por consiguiente la recopilación de información, seguido de la obtención de los indicadores, la normalización, los criterios de ponderación y finalmente en análisis de sensibilidad. En este sentido, dicho marco permite contar con un panorama de los esfuerzos que se han logrado para contar con una metodología sólida y confiable que permita elegir y calcular los indicadores más adecuados para cada situación.

Los indicadores son el medio para conducir desde una comunidad local hasta grandes ciudades hacia el desarrollo sustentable. Y es posible que mediante el uso de fuentes renovables de energía, tal progreso sea una realidad. Contribuyen a una planificación más realista de programas, políticas y/o proyectos que promuevan el desarrollo humano. Estos sirven para establecer un panorama actual de la situación, para definir metas, establecer medidas de prevención, medir el progreso hacia un estado deseado, comparar alternativas, establecer rutas de acción y definir el éxito o las dificultades que determinado proyecto presente.

En el contexto de las energías renovables es importante la existencia de un marco que permita guiar la selección y evaluación de criterios para comparar las alternativas basadas en una ponderación de estos.

Por otro lado, la relación entre los pilares bajo los que se rige el desarrollo sustentable, suele limitar la interpretación de los indicadores de manera integral. Por ejemplo, el crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB) se considera comúnmente como un signo positivo de desarrollo económico, sin embargo este se asocia a un mayor consumo de energía, a la explotación de recursos naturales y por tanto con consecuencias negativas sobre el ambiente [10]. Lo anterior refleja la necesidad de contar con una variedad de indicadores que además de complementarse, permitan demostrar información con una visión amplia hacia los retos que el desarrollo sustentable implica. Aunado a ello, su implementación encierra un amplio proceso realizado por diferentes etapas, que van desde la selección y obtención de criterios de evaluación, recopilación de datos e información, normalización y ponderación de los indicadores. Por otra parte, existe una variedad de métodos creados para las diferentes etapas, lo cual representa uno de los retos más importantes a considerar.

La selección de indicadores está determinada en gran medida por su propósito. Además, existen otros criterios importantes para su selección, las guías y metodologías de la División de Desarrollo Sustentable (DSD) de las Naciones Unidas recomiendan que los indicadores de desarrollo sustentable sean:

1. Principalmente de alcance nacional
2. Indicados para evaluar el progreso del desarrollo sustentable
3. Limitados en número
4. Con amplia cobertura de la Agenda 21 y de los aspectos de desarrollo sustentable
5. Comprensibles, claro y sin ambigüedades
6. Conceptualmente sólidos

7. Representativo de un consenso internacional
8. Dentro de las capacidades de los gobiernos nacionales para desarrollarlos
9. Dependientes de los datos de calidad reconocida

Los indicadores deben ser a la vez limitados y suficientemente completos como para captar la naturaleza multidimensional del desarrollo sustentable. Los indicadores tienen que ser claros e inequívocos, dado que la ambigüedad es relativa al contexto. Por ejemplo, ante la baja seguridad alimenticia de un país, incrementar las tierras de cultivo puede ser visto como una acción positiva, mientras que en un país con sobreproducción agrícola debido al subsidio, dicha acción tendría un impacto negativo [10]. Por ello es fundamental la existencia de objetivos para los indicadores a nivel nacional para evitar la ambigüedad en el contexto.

En este sentido, cómo seleccionar los indicadores que se adecuen al cumplimiento de los objetivos de la DSD es hoy día una problemática que enfrentan los tomadores de decisiones. Dada la ausencia de una metodología universal para seleccionar los indicadores, distintos autores han trabajado en establecer procedimientos que sean útiles para contrarrestar dicha limitante.

En el presente capítulo se describe la revisión realizada en cuanto a los marcos más utilizados para el desarrollo de indicadores y las metodologías más utilizadas en la literatura en cada etapa del proceso de selección de alternativas tecnológicas desde una perspectiva de sustentabilidad.

4.1 Marcos para el desarrollo de indicadores

Dado que el desarrollo sustentable apunta hacia la evolución a largo plazo de un sistema complejo encaminado hacia un estado incierto, los indicadores tienen el propósito de hacer que la toma de decisiones durante este progreso sea menos riesgosa.

Sin embargo, una de las limitantes es que la información utilizada para construir indicadores es amplia y diversa, para lo cual se requiere un marco conceptual que permita estructurarla y que facilite su acceso e interpretación.

Actualmente existen distintos marcos para organizar conjuntos de indicadores indicadores de desarrollo sustentable. Los más comunmente citados son los siguientes [17].

Presión-Estado-Respuesta (PSR, por sus siglas en inglés):

El marco PER fue propuesto por la OCDE y no intenta determinar la naturaleza de las interacciones entre las actividades humanas y la situación del ambiente, sino que trata de expresar cómo las actividades humanas ejercen presiones sobre el ambiente y los cambios que éstas provocan [29]. Y por ende la sociedad reacciona mediante cambios sobre políticas y programas ambientales que tengan el objetivo de disminuir el impacto. Los componentes de la metodología son los siguientes:

- Presión: Describe las presiones directas e indirectas de las actividades humanas que se realizan hacia el ambiente.
- Estado: Se refiere a las condiciones ambientales dadas las presiones antes mencionadas, como la contaminación atmosférica afectando en la salud humana y en la situación socio económica de la sociedad. Estos indicadores están directamente relacionados con los de "Presión" para facilitar la planificación de las acciones correctivas.
- Respuesta: Describe las acciones emprendidas para prevenir y mitigar las repercusiones ambientales así como mantener la disponibilidad de los recursos naturales.

Fuerza motriz-Estado-Respuesta (DSR, por sus siglas en inglés):

Fue desarrollado por las Naciones Unidas con el fin de monitorear el crecimiento sostenible, donde el término "Fuerzareemplazó al término "Presión" para que además fueran incorporados los indicadores sociales, económicos e institucionales. Los componentes de este marco son los siguientes:

- Fuerza motriz: Actividades y procedimientos humanos que afectan el crecimiento sostenible
- Estado: La situación predominante del crecimiento sostenible
- Respuesta: Acciones políticas y de otra índole hacia el crecimiento sostenible.

Fuerza Motriz-Presión-Estado-Impacto-Respuesta (DPSIR, por sus siglas en inglés):

El DPSIR es una derivación del modelo Presión-Estado-Respuesta, es el más amplio y más comúnmente aceptado y adoptado por la Unión Europea (UE) y proporciona un mecanismo para el análisis de los problemas ambientales [29]. Los componentes de la metodología son los siguientes:

- Fuerza motriz: Estos indicadores detallan los desarrollos sociales, demográficos y económicos de las sociedades y sus cambios relacionados con el modo de vida, el nivel de consumo y los modelos de producción.
- Presión: Estos indicadores describen la evolución en la cantidad de emisiones, el uso de suelo y de los recursos renovables.
- Estado: Dichos indicadores dan a conocer la cantidad y la calidad de los fenómenos naturales, biológicos y químicos en una región específica. Por ejemplo, la cantidad de recursos existentes en los bosques y la vida silvestre o el nivel de ruido en regiones cercanas.
- Impacto: Estos indicadores se utilizan para describir efectos que implican los cambios causados por las presiones anteriormente mencionadas.
- Respuesta: Estos indicadores se reportan en las reacciones que muestra la sociedad, así como en los esfuerzos de los gobiernos para mejorar o adaptar los cambios de la situación ambiental.

Modelo enredado para Indicadores de Sustentabilidad

El Modelo enredado para Indicadores de Sustentabilidad explora el problema de encontrar los indicadores óptimos establecidos sin la necesidad de que un experto en la materia decida el nivel apropiado de los indicadores. Es un modelo que aplica la evolución dinámica en un espacio donde los indicadores de sustentabilidad son entidades interconectadas por una matriz de interacción, y tiene el objetivo de resolver el problema de encontrar los indicadores óptimos y apropiados para un contexto específico desde el punto de vista de sistemas complejos.

Este se basa en el modelo de la ecología donde un ecosistema emerge dada la cooperación y la competencia de agentes biológicos que co existen en un ambiente determinado. De manera similar, una sociedad sustentable puede surgir desde la interacción evolutiva de los seres humanos que la forman [39].

El modelo representa cada indicador como un vector las cuatro dimensiones que comprenden la sustentabilidad como

$$I^\alpha = (I_1^\alpha + I_2^\alpha + I_3^\alpha + I_4^\alpha) = (\textit{Ambiental}, \textit{Economica}, \textit{Social}, \textit{Institucional})$$

Basada en el principio de Pareto o también conocida como la regla del 80-20, para identificar configuraciones estables de indicadores, es decir cuando más del 80 % de la fortaleza se encuentra en menos del 20 % de un grupo de indicadores durante un período de tiempo, entonces el sistema tiene la propiedad de ser impulsado por ese grupo de indicadores [39].

En el marco de este modelado, una configuración sustentable se identifica como una configuración en el cual la fortaleza total aumenta o permanece casi constante por un tiempo muy largo. Para el ejemplo de Cuernavaca se obtuvo que los indicadores que proponen el desarrollo sustentable están fuertemente relacionados con la dimensión ambiental, social e institucional. Para futuras aplicaciones se requiere identificar indicadores que puedan medir situaciones reales y que puedan servir para definir políticas y resolver problemas actuales.

4.2 Metodologías aplicadas por etapa en el desarrollo de indicadores

La importancia de la evaluación y el proceso de selección de los indicadores radica en que los resultados de los indicadores cumplan con las necesidades, objetivos, demandas y diversas consideraciones que los tomadores de decisiones generalmente toman en cuenta. Sin embargo, la fiabilidad y obtención de información es una importante limitante que muchas veces no permite que los indicadores cumplan su función.

En esta sección se describen las etapas que conforman desde la selección hasta el uso de los indicadores energéticos, comenzando por la selección de criterios de evaluación, la recopilación de información, la obtención de indicadores, la normalización y finalmente los criterios de ponderación.

Selección de criterios de evaluación

Existen métodos genéricos para simplificar la elección de criterios [40] y se clasifican en subjetivos y racionales como se indica a continuación:

a) Métodos basados en subjetividad

- Opinión propia: La elección está basada en el juicio de valor de la persona tomadora de decisiones de acuerdo a sus propias preferencias y a las metas que deben alcanzarse.
- Recomendación externa: Se basa en recomendaciones dadas por expertos externos (por ejemplo comisiones internacionales) e investigadores (literatura, métodos desarrollados, etc.)
- Panel de expertos: La elección está hecha por un panel de expertos del tema, quienes llegan a un acuerdo en conjunto para lograr los objetivos.

b) Métodos racionales

- Mínimos cuadrados: Es una técnica de análisis numérico en la que dados un conjunto de pares ordenados (variable dependiente e independiente) se intenta encontrar una función lineal a una serie de datos.

- DELPHI: Se basa en descartar/seleccionar criterios por un grupo estructurado de expertos independientes, que hacen sus propios juicios que pueden ser revisados en función de las respuestas dadas por sus colegas.

- Coeficiente de correlación: Se basa en identificar la interacción entre los criterios por medio del coeficiente de correlación, que a su vez se basa en el cálculo de covariancias entre las ponderaciones asignadas a cada elemento

- Desviación estándar: Indica que tan dispersos están los datos con respecto a la media, mientras mayor sea la desviación estándar, mayor será la dispersión de datos.

Sin embargo, se han clasificado los 41 criterios más utilizados durante los últimos 10 años para la evaluación y selección de tecnologías destinadas a contribuir al desarrollo sustentable, y fueron ordenados en criterios ambientales, económicos, sociales, técnicos y políticos [16] como se observa en la Figura 21.

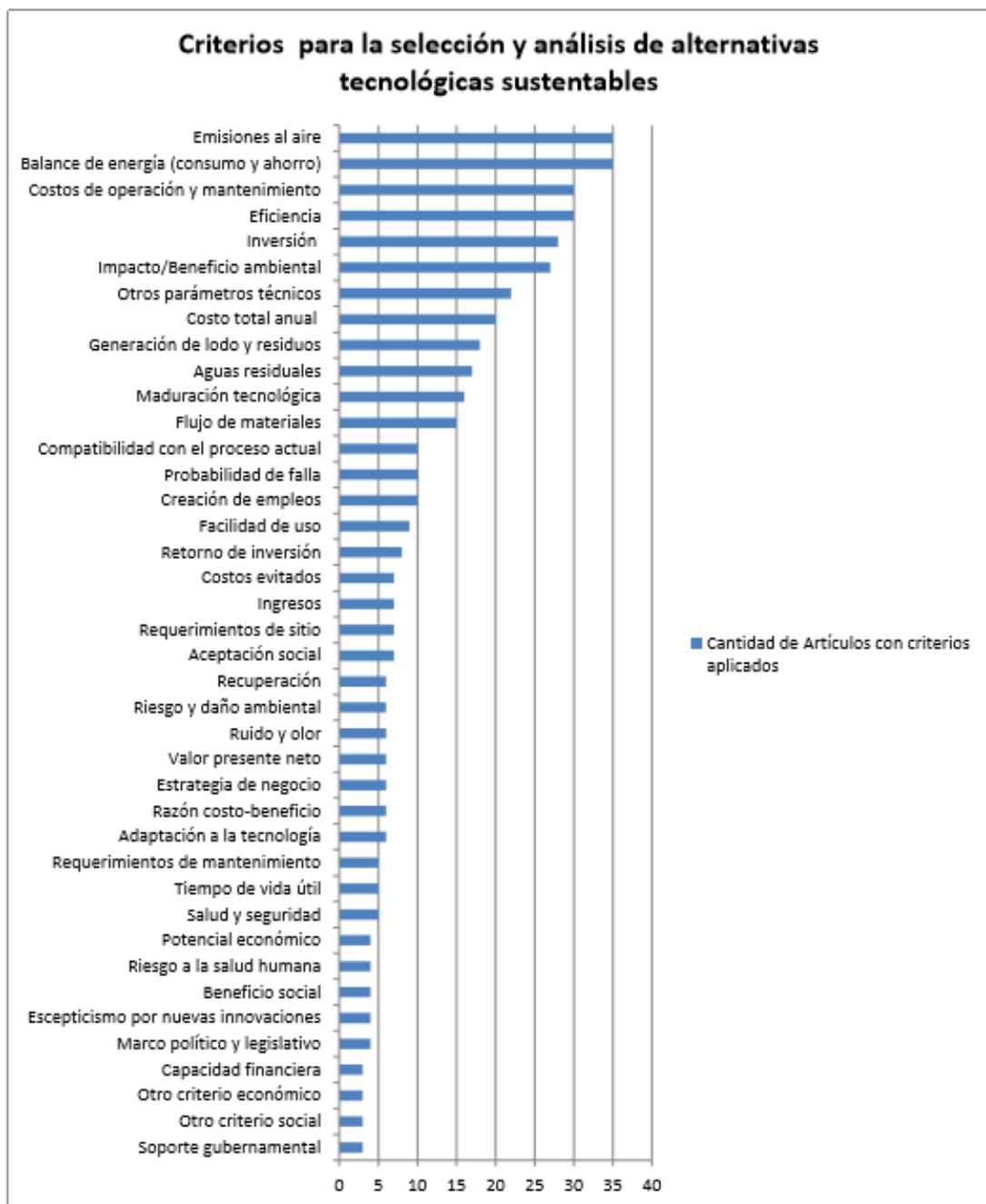


Figura 21: Criterios para la selección y análisis de alternativas energéticas sustentables.

Recopilación de información

Los indicadores tienen estrictamente una relación con los criterios de evaluación y selección elegidos, que permiten medir ya sea el comportamiento de diversas alternativas, el progreso hacia un estado deseado o el cumplimiento de determinados objetivos. Para poder construir tales indicadores es fundamental contar con información vasta y fiable, que como se menciona anteriormente, suele ser una limitante muy importante. Generalmente ésta se obtiene de organizaciones nacionales que se encargan de contar con una base de datos de distinta índole, además de información contenida en la literatura o con base en simulaciones o predicciones.

Sin embargo, aunque se seleccionen los mejores indicadores de acuerdo a cada criterio considerado, sin la información suficiente, el uso de indicadores no lograría ninguna de sus funciones. Es por ello que es necesaria que exista una sinergia entre los criterios de evaluación y la información disponible del lugar o situación en cuestión.

La información de partida se basa principalmente en 1) datos primarios extraídos directamente de la fuente, 2) datos secundarios de la literatura o de bases de datos públicas o comerciales; 3) analogías, predicciones o simulaciones utilizando información de otros procesos o productos similares; O 4) se basa directamente en el conocimiento intrínseco y las opiniones de los expertos en la materia [16].

Obtención de indicadores

La obtención de indicadores actúa como un vínculo entre el sistema que se está evaluando y el criterio a evaluar. Dicho lo anterior y para facilitar el cálculo de los indicadores, existen diferentes metodologías que se han agrupado en función de los fundamentos objetivos y metodológicos de cada uno de ellos [16]. Una clasificación de acuerdo a las metodologías más utilizadas y las agrupa en dos grandes grupos, métodos cualitativos y cuantitativos se describe a continuación:

Metodologías para calcular indicadores

1. Cualitativas

- *Cuantificación de juicios por expertos (matriz de decisiones):*

Se refiere a matrices basadas en la puntuación o calificación dada por los expertos en cada criterio seleccionado.

2. Cuantitativas

- **Evaluación ambiental**

- *Balance de entrada y salida:*

En esta categoría se clasifican dos metodologías, el Análisis de Flujo de Materiales y Energía (MEFA, por siglas en inglés) y la Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (LCIA, por sus siglas en inglés). La primera se refiere a la evaluación de todos los flujos de materiales y energía involucrados en un proceso o sistema, mientras que la segunda se refiere a la configuración y análisis del inventario de las entradas y salidas de materiales, energía, emisiones a la atmósfera, descargas y desechos sólidos en cada etapa del ciclo de vida del sistema.

- *Análisis de Ciclo de vida:*

Se refiere a un balance de impactos positivos o negativos que un proceso o sistema tiene hacia el ambiente a través de las etapas de su ciclo de vida. Los indicadores varían de acuerdo al método que se aplica.

- *Evaluación de daños y riesgos:*

Está compuesto por la Evaluación de Impacto Ambiental y la Evaluación de Riesgo, la primera se refiere a la evaluación de los impactos positivos y negativos que el sistema tendrá en el ambiente y a su vez el económico y social, mientras que la segunda determina el valor del riesgo asociado a cierto sistema o proceso mediante el

calculo de la magnitud de las posibles pérdidas y de la probabilidad del daño ocurrido.

■ **Evaluación económica:**

● *Costo social:*

Se divide en dos grandes clasificaciones el costo social y los balances internos. El costo social involucra tres metodologías que tienen una estrecha relación con la Evaluación de daños y riesgos, el primero es el Análisis Financiero Dinámico (DFA, por sus siglas en inglés), el segundo es Monetización y el tercero es el Costo Externo.

El DFA se refiere un proceso de análisis económico que identifica y analiza procesos que implican emisiones contaminantes o cargas asociadas con daños al ambiente. La Monetización y el Costo Externo son procesos que se utilizan para evaluar monetariamente los efectos positivos o negativos en la sociedad y el ambiente producidos por un sistema. Es decir, los efectos colaterales debido a la introducción de nuevos procesos desde una perspectiva de costo beneficio.

● *Balances internos:*

Se conforma de cuatro metodologías que son el Análisis del Costo de Ciclo de Vida (LCCA, por sus siglas en inglés), Parámetros Económicos, Modelo MIOW+ y el Flujo de Fondos.

El LCCA es una herramienta para calcular el costo económico asociado a la implementación de un proyecto, proceso o servicio a través de su ciclo de vida, por otro lado los Parámetros Económicos se refieren a el cálculo de parámetros que determinan la rentabilidad de una inversión. El Modelo MIOW+ sirve para evaluar las consecuencias económicas de las medidas ambientales, el cual obtiene datos mediante un análisis de de la situación económica de

una empresa antes y después de incorporar un avance tecnológico. Por último el Flujo de Fondos se refiere a un balance económico de los flujos de entrada y salida resultantes de una inversión.

- **Eco eficiencia:**

Esta categoría la conforman el Análisis Costo-Beneficio (CBA, por sus siglas en inglés) y el Análisis de Rentabilidad, los cuales realizan un balance entre el costo económico sobre la inserción de una medida o un proceso y el beneficio ambiental o el daño resultante.

- **Valores límite e instalaciones de referencia:**

Se basa en obtener indicadores que pueden ser preestablecidos por instalaciones de referencia con características similares o basados en valores límite requeridos por la legislación.

- **Métodos analíticos:**

Se refiere a métodos para calcular indicadores basados en funciones matemáticas que son estandarizados o creados especialmente para cada caso o para una característica en particular.

- **Uso directo de datos primarios:**

El uso directo de datos primarios o secundarios se utiliza para indicadores sin algún tipo de procesamiento de la información o para calcular otros parámetros.

- **Modelos de simulación:**

Se basa en la simulación de un proceso o fenómeno para un número ilimitado de datos o para simplificar una serie de datos.

Claramente existe una variedad de metodologías en el caso del enfoque cuantitativo, sin embargo los métodos cuantitativos más aplicados se basan en el cálculo de los indicadores ambientales y económicos mediante el Análisis de Ciclo de Vida

y el Costo del Ciclo de Vida [16]. Por otro lado, las metodologías cualitativas se utilizan en su mayoría para evaluar las características técnicas y sociales de las alternativas. No obstante, la mayoría de los autores combinan ambos enfoques.

Normalización

Para poder comparar todos los indicadores de sustentabilidad es necesario que exista la normalización de los indicadores, es decir, unificar expresarlos en una escala común. En este contexto, la normalización es una etapa que tiene el objetivo de poder comparar los indicadores aun cuando son de diferente tipo.

Actualmente existen distintos métodos para llevar a cabo la normalización, los cuales se describen a continuación:

1. *Métodos analíticos propios:*

Se basan en funciones matemáticas propias, las cuales generalmente están configuradas por una combinación de métodos preestablecidos y orientadas hacia la agregación de varios parámetros calculados dentro de un indicador o índice individual.

2. *De distancia al objetivo:*

Este método está basado en el concepto de una frontera eficiente, la cual es usada para mostrar el valor de un indicador de acuerdo a su distancia desde una referencia ideal o preestablecida.

3. *Normalización lineal:*

Esta conformada por dos métodos, el min-max y el proporcional. El primero es un método que traspone los valores en una escala del 0 al 1, donde el 0 es denominado como el valor más bajo y el 1 como el mejor valor. El segundo método es un proceso basado en obtener un grado de relación entre los resultados, es decir, cada valor es normalizado con respecto al "mejor" valor, denominando el valor máximo cuando se basa en que entre más alto sea mejor, o el valor mínimo cuando se basa en que entre más bajo sea mejor.

Los métodos descritos anteriormente son los principalmente utilizados en el tema de evaluación y selección de tecnologías encaminadas a contribuir al desarrollo sustentable. Sin embargo, el 70 % de los estudios no se normalizaron frente al 30 % que si lo hicieron [16]. Hecho que se debe principalmente a que distintos estudios aplican metodologías de permitieron obtener indicadores en unidades directamente comparables.

Criterios de ponderación

De acuerdo a las características y prioridades definidas por las personas tomadoras de decisiones, es esencial que después de haber obtenido los indicadores, se les determine el peso o la importancia relativa que cada uno de ellos tiene. Es decir, el peso será asignado dada su importancia relativa para identificar tales prioridades de manera efectiva.

Esta etapa del proceso es de suma importancia ya que de los resultados se obtienen conclusiones, planes o decisiones que pueden variar significativamente dependiendo de la importancia o peso asignado a cada criterio. Es por esto que existen diversos métodos que han sido aplicados y se pueden clasificar en dos rubros: la ponderación igualmente distribuida y valores por orden de rango [16].

La ponderación igualmente distribuida considera por un lado los estudios que no realizaron ningún tipo de ponderación y los que hicieron una comparación directa de todos los indicadores obtenidos mediante métodos gráficos o numéricos, o aquellos que asignaron el mismo valor o peso a todos los indicadores.

Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es la última etapa del proceso de evaluación y selección de la mejor alternativa. Es posible realizar dicho análisis en todas la etapas y parámetros variables del proceso completo. Este análisis evalúa cómo cambiarían los resultados obtenidos al variar diferentes parámetros a lo largo del proceso y

de esta manera asegurar y confirmar que los resultados obtenidos son fiables y robustos [16].

De acuerdo a la revisión, el sector energético seguido del tratamiento de agua, son aquellos que mayor interés reciben, por otro lado los criterios ambientales, seguidos de los económicos y técnicos son los más ampliamente utilizados en la evaluación y selección de tecnologías. En las cuestiones económicas principalmente consideran los costos y las inversiones de capital, para los criterios ambientales se evalúan principalmente las emisiones a la atmósfera, mientras que dentro de los criterios sociales, los primordiales son la creación de empleo y la aceptación social. Sin embargo, la cuestión social no debe perder importancia, ya que contribuye en gran medida a lo exitoso que pueda resultar ya sea el proyecto, política o medida que se desee implementar.

Hasta ahora el cuarto capítulo muestra una síntesis de trabajos orientados al desarrollo y selección de indicadores en materia energética, no obstante la variedad de metodologías demuestra claramente que no existe un método universal establecido. En el siguiente capítulo se presenta un análisis del empleo de indicadores de desarrollo sustentable desde una macro escala hasta casos de estudio en determinadas comunidades mediante el empleo de energías renovables de pequeña escala.

5. Análisis

El presente capítulo describe la ruta que se llevó a cabo en cuanto a la revisión literaria de indicadores de desarrollo sustentable a distintos niveles de impacto. La búsqueda permitió elegir cinco artículos de los cuales se identificó la necesidad de utilizar indicadores no solamente de impacto global, sino también nacional y local. Los artículos seleccionados se enlistan a continuación:

1. Definición y medición de la Sustentabilidad Urbana: Revisión de indicadores, L. Huang, J. Wu. L. Yan, 2015.
2. Índice Multidimensional para la Sustentabilidad Energética: Un indicador multidimensional para medir la sustentabilidad energética, I. Iddrisu, S. Bhattacharyya, 2015.
3. Revisión y recomendaciones de Indicadore de Política Energética Sustentable, K. Paltlitzianas, H. Doukas, A. Kagiannas et al., 2008.
4. Una revisión transversal sobre los impactos y la sustentabilidad de los proyectos de energía renovable a pequeña escala en países de desarrollo, J. Terrapon-Pfaff, C. Dienst, J. König et al., 2014.
5. Fabricación local de aerogeneradores para la electrificación rural, J. Leary, A. While, R. Howell, 2012.

En este sentido, los artículos fueron clasificados de acuerdo al nivel de impacto mostrado en la Figura 22.

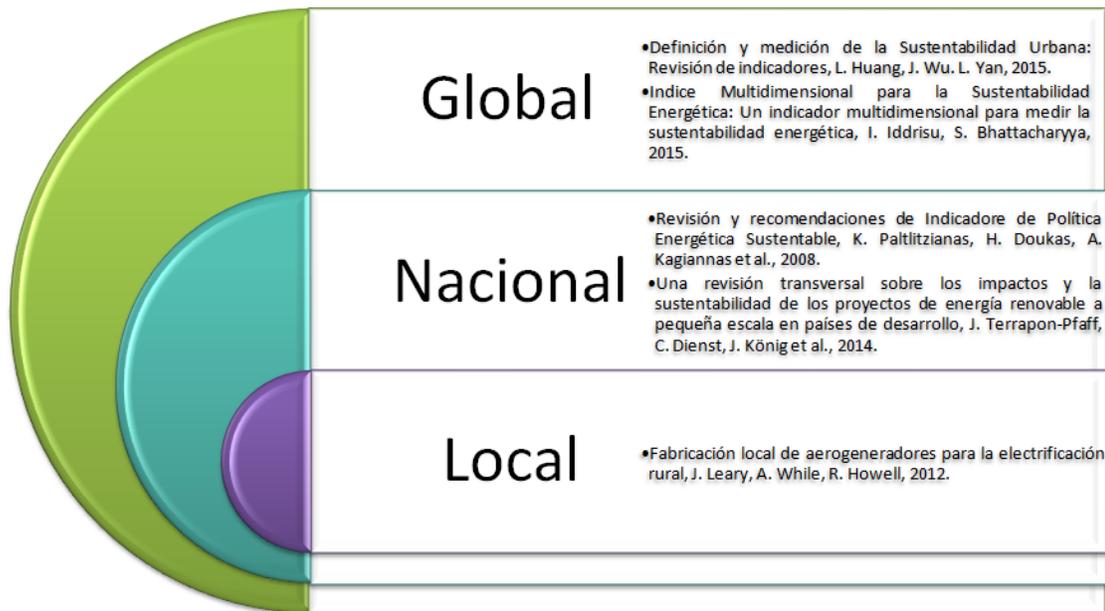


Figura 22: Clasificación de los artículos de revisión.

De acuerdo al análisis, es claro que los desafíos que implica el cambio climático han sido generalmente debatidos y analizados globalmente, sin embargo corresponde a más de una sola organización tomar acciones para reconducir al mundo hacia la sustentabilidad y la resiliencia. Es necesario trascender la problemática y la transformación del sistema hacia distintos niveles, dadas las diversas necesidades, objetivos, circunstancias y culturas alrededor del mundo.

Es así como la Organización de las Naciones Unidas presentó en 2015 en la Cumbre de Desarrollo Sostenible, la Agenda de Desarrollo 2030, en la que establecieron 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), 169 metas y 230 indicadores conjugados en las tres dimensiones del desarrollo sostenible, económica, social y ambiental.

Dicha institución hace un llamado a trabajar mediante una alianza de colaboración, a proteger nuestro planeta y a las personas, a crear alianzas y conducir el mundo hacia la prosperidad y el desarrollo. Desde esa perspectiva, los ODS con-

templan un enfoque hacia la integridad de las políticas públicas, con respecto a las tres dimensiones del desarrollo sostenible a través de sus metas y objetivos, que son medibles gracias a los indicadores correspondientes.

Sabiendo que la principal causa del cambio climático es debido a las emisiones de los GEI y recordando que la categoría de energía es la principal fuente de emisiones, el objetivo 13 referente a combatir el cambio climático dirige una de sus metas a incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales. Por otro lado, el objetivo 7 establece garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos, y dentro de sus metas estipula incrementar el porcentaje de energías renovables, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios de energía modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados y los pequeños Estados insulares en desarrollo.

En materia global, [15] realiza una revisión de indicadores de Sustentabilidad Urbana más utilizados, donde hace una selección de ellos basándose en su relevancia con la sustentabilidad, aquellos que cubren mas de uno de sus tres pilares y los cuales están desarrollados en los marcos mas citados como los mencionados en el Capitulo 4 [15].

Los Índices Compuestos más destacados para medir la sustentabilidad urbana son:

1. Huella Ecológica: Determina el área de tierra o agua necesarios para generar los recursos y asimilar los residuos por cada población o por actividad.
2. Índice de Ciudad Verde: Incluye cerca de 30 indicadores en 9 categorías que incluyen esencialmente las emisiones de CO_2 , uso de suelo, manejo de residuos, calidad del aire y consumo de agua.
3. Índice de Desempeño Ambiental: Está basado en dos objetivos, la protección de la salud de los seres humanos y los ecosistemas, que conforman 20 indi-

cadores con 9 áreas de enfoque que son la agricultura, la calidad del aire y del agua, la biodiversidad, la energía, los bosques, etc.

4. Índice de Progreso Real (Genuine Progress Indicator, GPI): Resultado de lograr un PIB "verde", este índice se compone de más de 20 indicadores que representan tanto las transacciones económicas convencionales como los beneficios naturales y no comerciales del mercado, distinguiendo explícitamente entre los impactos positivos y negativos de las actividades económicas en el bienestar humano.
5. Índice de Ahorros Legítimos (Genuine Savings, GS): Mide el cambio neto en toda la gama de activos importantes para el desarrollo económico, incluidos los activos producidos, los recursos naturales, la calidad ambiental, los recursos humanos y los activos externos. GS y GPI son conceptualmente similares, pero técnicamente diferentes. GPI se enfoca en los "flujos" de transacciones, mientras que GS mide los cambios en acciones o diferentes tipos de capital, mostrando los recursos disponibles para el futuro.
6. Índice de Desarrollo Humano: Contempla tres sub-índices, la esperanza de vida al nacer, la educación y el PIB per cápita o poder adquisitivo.
7. Índice de Bienestar: Se calcula como el promedio de años de bienestar, se basa en la suposición de que el bienestar humano además de medirse en términos de longevidad, debe medirse en calidad de vida.
8. Índice de Desarrollo de la Ciudad: Tiene dos dimensiones, las personas y los ecosistemas, los cuales se consideran igualmente importantes, de manera que el bienestar del sistema humano-ambiental se determina simultáneamente por el bienestar de las personas y los ecosistemas de los que estas dependen.

Sin embargo, la serie de indicadores anteriores requiere de un esfuerzo global que implica como primer paso contar con la información necesaria y confiable y en principio conocer el panorama actual de la ciudad o región en cuestión. Mientras que estos están creados para un fin específico, se omite la dimensión de la sustentabilidad energética. Por ejemplo, un país que tiene un alto IDH y un acceso moderno a la energía, puede tener poca auto-suficiencia, es decir, un alto IDH no

necesariamente significa que sus recursos energéticos sean sostenibles en el futuro.

Dicho lo anterior, es notable que no se ha considerado indicadores que permitan medir la tasa de sustitución de recursos agotables por renovables. En este sentido, diversos esfuerzos se han enfocado en la definición y planteamiento de un índice que permitan medir todas las dimensiones que cumplan con el objetivo de la sustentabilidad energética. Como es el artículo [17], el cual propone el Índice del Desarrollo Sustentable de la Energía (SEDI, por sus siglas en inglés) para medir el desarrollo sustentable de la energía para evaluar la sustentabilidad de suministro de energía existente, primero se debe evaluar el proceso que compone el ciclo de suministro de energía para identificar los puntos clave de este. En el caso particular de la energía, se compone de dos partes principales: la oferta y la demanda. El punto de entrada es el Suministro Total de la Energía Primaria (STEP) el cual engloba la producción y las importaciones, mientras que la salida es el Consumo Total Final (CTF). La capacidad de reiniciar el ciclo de la generación de energía depende de la productividad de los fines del CTF y de la intensidad energética la cual define la eficiencia del uso de la energía. Estos dos parámetros pueden definir la capacidad productiva de un país por unidad de energía consumida [15].

El SEDI se enfoca en cinco dimensiones de la sustentabilidad: la técnica, la económica, la social, la ambiental y la institucional. Por lo que realiza una selección de indicadores (Cuadro 6) con la finalidad de definir cada dimensión expresada en un valor del 0 al 1, donde el 0 significa que no hay sustentabilidad y el 1 que la sustentabilidad se ha logrado totalmente.

Para situar el ciclo de suministro de energía desde la perspectiva de dichas dimensiones, comprendido desde la entrada de recursos a través del sistema de conversión al CFT, forman la dimensión técnica, lo cual determina la cantidad de energía que se puede producir desde el sistema en un tiempo determinado. El CFT per cápita define la dimensión económica, mientras que la manera en que este sea distribuido a la sociedad define la dimensión social, es decir, si la energía disponible es física y económicamente accesible para todos, entonces la dimensión de la sustentabilidad social se contempla. Por otro lado, el impacto en el ambiente y la biodiversidad debido al uso de la energía definen la dimensión ambiental. Final-

Cuadro 6: Conjunto de indicadores para el desarrollo energético sustentable [15]

Dimensión	Indicador
Técnica	Proporción de las energías no renovables en el suministro total de la energía
	Coefficiente de agotamiento de los recursos energéticos locales
	Eficiencia total de conversión de energía del sistema
Económica	Consumo comercial de energía per cápita
	Intensidad energética final
	Proporción del uso productivo de la energía
Social	Consumo residencial de energía per cápita
Ambiental	Proporción de los recursos no renovables en el consumo de energía residencial
	Intensidad del carbono
Institucional	Autosuficiencia general

mente la institucional define básicamente la estructura del sistema y determina la manera en que se gestionan y controlan el resto de las dimensiones para asegurar la mejor situación costo beneficio.

El Índice de Desarrollo de Sustentabilidad Energética fue calculado para 20 países que en principio contaban con la información suficiente y adecuada para el año 2009, lo que resultó en la clasificación de estos en una base global (Figura 23).

Cabe mencionar los enfoques que otros índices también proponen como el Índice de Desarrollo Energético (EDI, por sus siglas en inglés) que trata de monitorear la transición de un país hacia la modernización de combustibles para la cocción de alimentos y la electricidad en el tiempo, midiendo el nivel de acceso a estos combustibles y el nivel del desarrollo económico indicado por el consumo per cápita en un tiempo determinado. Mientras que el IDH, que no está enfocado en el ámbito energético, mide el desarrollo tanto social como económico, por otro lado el Índice Multidimensional de Pobreza Energética (MEPI, por sus siglas en inglés) estima el grado de privación de combustibles modernos y electricidad a los hogares. Sin embargo, estos índices están basados en resultados que muestran la disponibilidad final para el consumo de la sociedad y por lo tanto dependen de la demanda. El SEDI tiene el objetivo de medir la capacidad de cada país de garantizar que el nivel de acceso a la energía no limite la capacidad de suministrar a las generaciones futuras el mismo o un mejor nivel de acceso [15].



Figura 23: Clasificación de 20 países de acuerdo al Índice de Desarrollo de Sostenibilidad Energética. Fuente: [15]

Con la información que los indicadores de energía proporcionan es posible la planificación de futuras acciones y establecer prioridades, así como la comprensión sobre los cambios que implican las políticas y estrategias.

Dado que la formulación de las políticas está dirigida por los objetivos y prioridades específicas de cada país, además de un marco analítico confiable también lo es la selección de criterios, el tipo de indicadores y el nivel de análisis, sin olvidar la disponibilidad de información.

En este contexto el tercer artículo [29] propone una serie de indicadores a partir de tres objetivos de política energética para el caso de Europa. El primero es la seguridad de suministro, seguido de la competitividad del mercado energético y finalmente la protección del ambiente, de esta manera determina cuatro criterios para cada uno, y con base en ellos selecciona ocho indicadores por objetivo, ejemplo de ellos se muestra en la Figura 24.

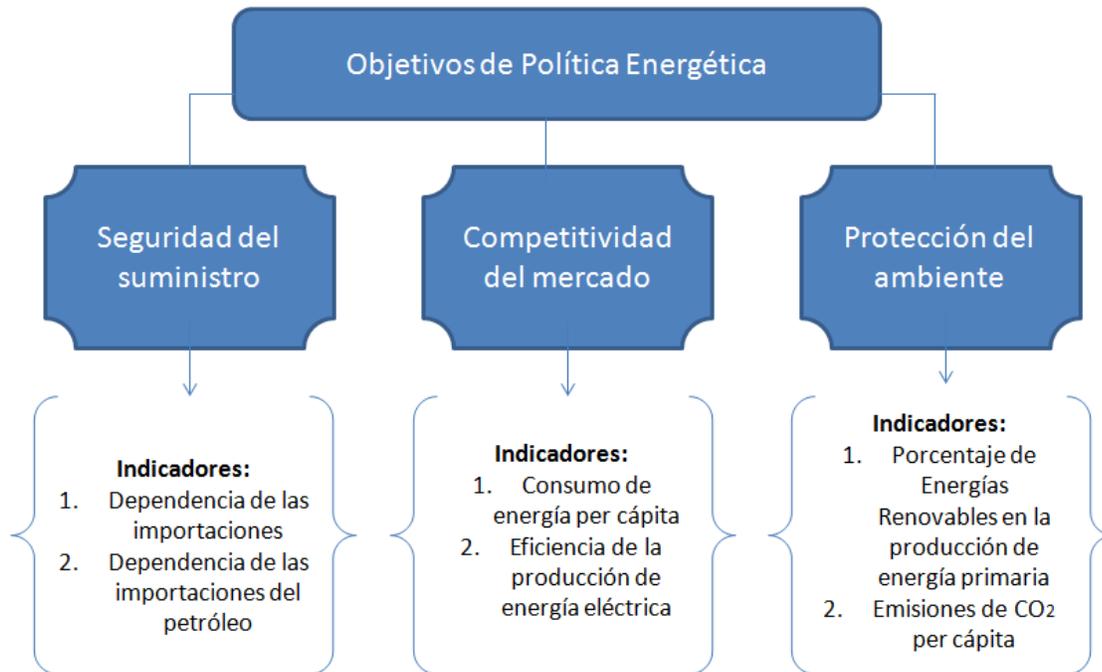


Figura 24: Propuesta de indicadores de política energética. Fuente: Elaboración propia con información de [29]

En este sentido, la elaboración de políticas energéticas es un importante paso hacia el desarrollo del sector energético, por lo que es necesario un profundo análisis sobre las necesidades, objetivos y prioridades del lugar en cuestión, ya sea una comunidad, un estado, una ciudad, un país o un continente. Es por ello que se han realizado esfuerzos internacionales en el desarrollo de indicadores energéticos, sin embargo son limitados aquellos a nivel local o nacional.

La importancia de que existan esfuerzos nacionales y locales radica en que para conseguir uno de los ODS más importantes, que es erradicar la pobreza, y sabiendo que el acceso asequible y sustentable a la energía es un factor crucial, se requieren indicadores energéticos que sean incluyentes conforme a las necesidades y objetivos del lugar en cuestión, a la disponibilidad de datos y sobre todo que permitan que exista un vínculo de comunicación entre la información obtenida, la situación

actual y el progreso hacia el estado deseado.

Es por ello que las tecnologías de energía renovable han sido la clave para proveer de servicios energéticos a las comunidades menos favorecidas, mediante el desarrollo de diversos proyectos, los cuales tienen el objetivo de proporcionar soluciones a pequeña escala que satisfagan las necesidades de poblaciones con mayor pobreza energética. Sin embargo, su implementación exige retos sociales, económicos y estructurales que requieren comprender cuáles son los factores de éxito y las barreras para lograr que sean un éxito.

Lo anterior ha derivado en la necesidad de evaluar diversos proyectos de energía renovable a pequeña escala en países en desarrollo, con respecto a su impacto en las condiciones de vida locales y la sostenibilidad posterior a su implementación. Ejemplo de ello es la revisión hecha por J. Terrapon-Pfaff et al [35] donde se evalúan 23 proyectos de desarrollo local, con el apoyo de tecnologías de energías renovables como la energía solar, eólica, hidráulica y biomasa, así como medidas de eficiencia para satisfacer necesidades como preparación de alimentos e iluminación en mas de 17 países en vías de desarrollo.

Dicha evaluación toma como marco de referencia tres Objetivos de Desarrollo del Milenio (MDG, por sus siglas en inglés):

1. MDG 1. Reducir la pobreza extrema y el hambre
2. MDG 7. Asegurar la sustentabilidad ambiental
3. MDG 8. Promover el desarrollo global de la sociedad

El estudio realiza una evaluación tipo ex post (Figura 25) donde se logra identificar lo que funciona y por qué, dando así una guía hacia futuras mejoras, reconociendo los factores de éxito y las fallas existentes. Sin embargo, el estudio se basa en datos empíricos de encuestas realizadas y datos secundarios de la literatura, estadísticas nacionales y los informes finales de cada proyecto.

La revisión mostró que la mayoría de los proyectos tuvieron un impacto favorable en el acceso a la energía, la salud, el empleo, el costo de la energía, a comunicación y el acceso a la información, y con la aplicación de tecnologías de energía renovables se contribuyó a la agenda de cambio climático global. El estudio reveló además que los proyectos de pequeña escala pueden tener un impacto en el desarrollo de políticas de energía si las organizaciones que los desarrollan promueven activamente las tecnologías. La Figura 25 muestra algunos de los impactos con respecto a cada ODM.

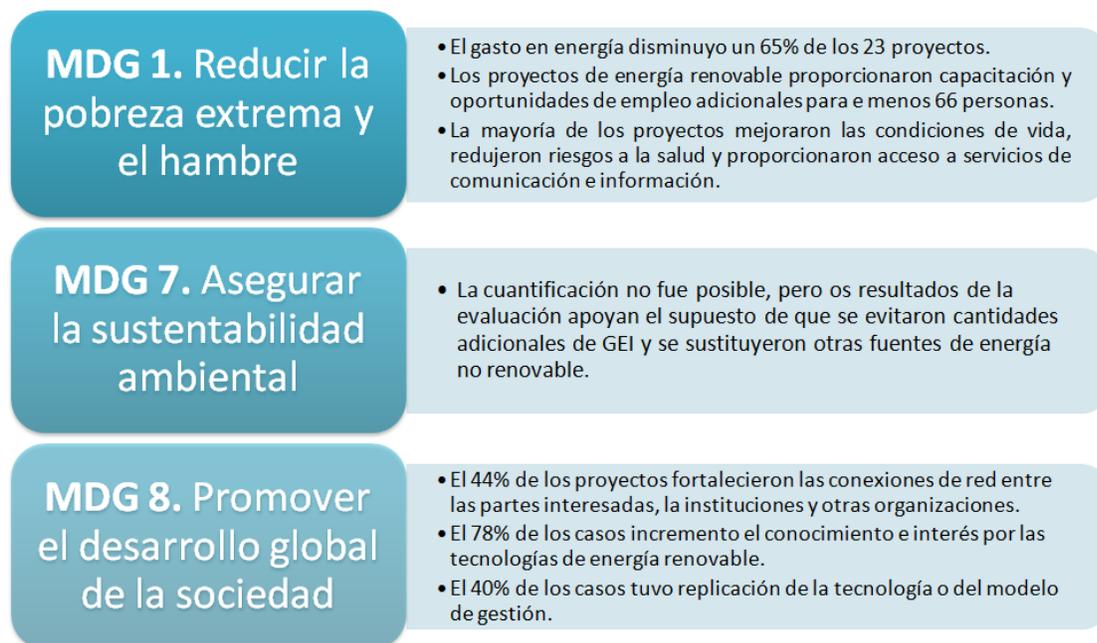


Figura 25: Impactos asociados a cada MDG. Fuente: [35]

En este contexto, a pesar de que la mayoría de los proyectos afirman que la energía renovable a pequeña escala mejora la calidad de vida de una población local mediante el acceso a los servicios básicos de energía, la calidad de vida no se mide fácilmente y la ausencia de información y datos confiables, limita ampliamente la posibilidad de proporcionar resultados cuantificables.

Lo anterior resulta en una cadena donde algunos eslabones carecen de solidez, es por ello que los esfuerzos deben empezar desde el aseguramiento de la información, para que exista una base a partir de datos que permitan medir el progreso y el éxito o las dificultades de los proyectos de energías renovables de baja escala.

Por otro lado, factores como el sentido de propiedad de la población, el grado de satisfacción y el compromiso de los beneficiarios con el proyecto o la tecnología fueron factores que también determinaron las dificultades y logros dentro de dicha revisión. Es por ello que los proyectos de energías renovables de baja escala deben estar adaptados a las necesidades locales, donde exista una organización ejecutora comprometida con la región y la tecnología incluso después de la implementación del proyecto.

Por lo anterior es necesario crear capacidad local en el sentido de que se pueda asegurar un crecimiento económico, que no solo beneficie a la población local en cuanto a servicios se refiere, sino que exista el potencial para crear empleos y contribuir al desarrollo humano. La producción local tiene el potencial para impulsar la economía local, reducir costos y producir sistemas que generen un valor agregado propio de la localidad. Contribuyendo también a crear una red de conocimiento que permita la inclusión de una nueva tecnología que desarrolle un compromiso con ésta, así como un sentido de propiedad y de integración social.

Casos como éste se han desarrollado en distintas localidades del mundo, y dada la complejidad que implica su análisis, J. Leay, A While et al [25] ha realizado una comparación de tres iniciativas específicas de producción de tecnología local, para analizar los factores sociales, económicos y técnicos que podrían facilitar la adopción de la tecnología por parte de la localidad.

En análisis se basa en tres casos de estudio donde la fabricación local de aerogeneradores se llevó a cabo, las iniciativas ocurrieron en Magnolia (Caso I), Perú (CSO II) y Nicaragua (Caso III). Es decir, se realizó una comparación guiada por los factores sociales y técnicos que influyen en la sostenibilidad a largo plazo de las iniciativas de electrificación rural con energía eólica. Cabe mencionar que el

Caso I empleó un modelo de aerogenerador propio en los años 70's con el apoyo de diversas universidades, mientras que el Caso II y III en los años 2000 emplearon el modelo de Piggott de eje horizontal.

El Caso I adecuó su diseño de aerogenerador doméstico a las necesidades de la localidad y logró venderlo en el mercado a un precio accesible. Para 1997 se habían instalado 137,000 unidades con capacidad de cubrir 18.5 MW, el éxito de esta iniciativa radicó en que el énfasis en la manufactura local dio la flexibilidad para adaptar la tecnología al contexto local y se identificó además que los beneficios económicos no fueron inmediatos, sin embargo la mejora de la calidad de vida y el acceso al entretenimiento, como la televisión o la radio; implicó que la energía eólica fuera muy valorada por parte de la comunidad.

En el Caso II la fabricación local benefició con iluminación al 57% de los hogares, además de que contaban con una estación donde las personas podían cargar dispositivos a un precio accesible y se logró abastecer directamente a un hospital y una escuela. Sin embargo, en esta iniciativa la tecnología tenía un costo más elevado que el Caso I y además el recurso eólico era menor (velocidad media anual de 3-4 m/s), lo cual implicaba mayor costo cubrir la demanda del lugar.

En el Caso III se instalaron aerogeneradores en cinco comunidades de la costa del Caribe, donde el 80% de la población no tenía acceso a la electricidad y el acceso a dichas comunidades únicamente era marítimo. BlueEnergy decidió instalar una sola turbina y un sistema híbrido de energía eólica y paneles fotovoltaicos, lo que permitió conectar directamente una escuela y crear un espacio de acceso a la comunidad para cargar baterías. Sin embargo, el recurso eólico era limitado (velocidad media anual de 3-4 m/s), había problemas de corrosión y salinidad del agua dada la ubicación de la comunidad.

Desafortunadamente, la cantidad y el costo de la energía disponible para un hogar no representa que el acceso a ella sea asequible. Ya que transportar una batería a una estación de carga no corresponde al mismo nivel de acceso a la energía que la disponibilidad inmediata desde la red eléctrica. En este sentido, la

Figura 26 muestra una comparación de los tres casos de estudio.

	Caso I	Caso II	Caso III
Estrategia de distribución de la energía	N/A	Conexión directa	Conexión directa
Recurso eólico	Alto y uniformemente distribuido	Altamente variable	Uniformemente distribuido pero bajo
Sistemas híbridos	Ninguno	Ninguno	Uniformemente distribuido pero bajo
Costo por cubrir la demanda del usuario	Doméstico: 0.36	Doméstico: 1.63 Edificio comunitario: 0.96	Comunitario: 0.56
Conocimiento transmitido al usuario final	Instrucciones impresas, entrenamiento formal, centros de demostración e instalaciones realizadas por el usuario final.	Instrucciones impresas, entrenamiento formal, centros de demostración y participación en instalaciones.	Instrucciones impresas, entrenamiento formal, centros de demostración y participación en instalación y construcción.
Ambiente externo	Desértico	Montañoso	Clima tropical, costa, relámpagos frecuentes y huracanes
Aerogeneradores instalados	>100,00	<100	<10

Figura 26: Comparación de Caso I, II y III (Costo en US/kWh). Fuente: [25]

El estudio comprobó que es primordial contar con una oferta continua que responda a la fiabilidad tecnológica y meteorológica para fortalecer así la cadena de suministro. También es de suma importancia evaluar el potencial en este caso eólico de la zona en cuestión, lo que permite dirigir con seguridad las iniciativas de electrificación rural. El acceso a la electricidad es un elemento esencial para el desarrollo humano y las energías renovables descentralizadas son una solución que permite dirigir a las comunidades menos favorecidas hacia éste.

A partir de la diversidad y cantidad de factores que influyen en el éxito continuo de dichos proyectos, es de suma importancia analizar los aspectos sociales, ambientales y económicos y técnicos que conlleva, con el fin crear una sinergia entre ellos y que permitan llevar a cabo la implementación de energías renovables de pequeña escala de manera exitosa desde cualquier perspectiva. Es por esto que los indicadores energéticos son la clave que permite medir los aspectos que rigen el camino hacia el desarrollo sustentable.

Con base en la revisión se identificó que contar con información es una cuestión primordial al utilizar indicadores de cualquier tipo. Por otro lado, es claro que resulta complejo comparar mediante indicadores el desarrollo de un país con el de una localidad, debido a que las necesidades, costumbres, ubicación y condiciones son completamente distintas. Dicho lo anterior, es evidente que no se cuenta con una clasificación de indicadores por nivel de impacto, lo que permitiría tener un monitoreo a distintas escalas.

Índice/Indicador	Ambiental	Social	Económica	Institucional
Intensidad energética			x	
Proporción de las energías renovables en el suministro total de energía	x			
Proporción del uso productivo de la energía	x		x	
Consumo per cápita de energía proveniente de las Energías Renovables	x			
Porcentaje de uso de recursos no renovables en el sector residencial	x	x		
Consumo residencial de energía per cápita		x		
Huella Ecológica	x	x		
Índice de Ciudad Verde	x	x		
Índice de Desempeño Ambiental	x	x		
Índice de Progreso Real		x	x	
Índice de Bienestar		x		
Índice de Ahorros Legítimos			x	
Índice de Desarrollo de la Ciudad			x	
Dependencia de las importaciones			x	x
Eficiencia de la producción de energía eléctrica			x	
Emisiones de CO ₂ per cápita	x			
Consumo de energía per cápita	x			

Figura 27: Ejemplos de índices e indicadores y el pilar o pilares del desarrollo sustentable que contempla. Fuente: Elaboración propia a partir de la revisión literaria.

La Figura 27 muestra una breve recopilación de los índices e indicadores encontrados en la literatura que son aplicados en su mayoría para medir el progreso hacia el desarrollo sustentable. Asimismo muestra las dimensiones del desarrollo sustentable que contempla cada uno. Es notable que el ámbito institucional no es tomado en cuenta en casi ninguno de ellos, sin embargo los mas contemplados son el ámbito económico y social.

6. Conclusiones

Trascender hacia un cambio global que permita enfrentar el Cambio Climático depende esencialmente de las medidas y objetivos que tenga cada entidad gubernamental, sin embargo es necesario que éstas sean medibles en el tiempo, para que sea posible tomar decisiones que aseguren el cumplimiento de los objetivos que se establezcan.

Actualmente existen diversos esfuerzos por contar con una serie de indicadores de sustentabilidad que permitan medir el progreso, sin embargo, la revisión literaria permitió identificar que la principal limitante para ser utilizados es que no se cuenta con información o no siempre está actualizada, lo cual es indispensable para que éstos logren su acometido.

Se desarrolló una revisión de indicadores de sustentabilidad para energías renovables, como caso de análisis se seleccionó la energía eólica. De dicha revisión podemos decir que los indicadores pueden medir impactos y desarrollo en distintos niveles debido a que pueden ser utilizados desde comunidades pequeñas hasta el nivel global, pero en su mayoría están diseñados para medir el impacto a nivel global, lo cual limita una comparación a nivel local, además de la disponibilidad de la información; las necesidades, recursos, costumbres y cultura son distintos en un país desarrollado y en un municipio, por ejemplo. En otras palabras, los indicadores no cuentan con una clasificación en cuanto a nivel de impacto se refiere, esto permitiría monitorear el progreso del desarrollo sustentable en distintos entornos y además fortalecer la toma de decisiones específicamente para cada sitio.

Para el nivel global, los indicadores no difieren entre las energías renovables, es-

to se debe principalmente a que el tipo de tecnología de energía renovable depende principalmente de la ubicación y el recurso que favorezca al aprovechamiento de estas. Además, los objetivos y prioridades son distintas en un país, en un estado y en una comunidad. Es decir, cada uno cuenta con necesidades, condiciones y culturas distintas, por lo tanto resulta más preciso poder hacer una comparación en cuanto a los impactos en el mismo nivel.

Para el nivel nacional, los indicadores identificados en la revisión coinciden en términos generales con los que se presentan en la ENE 2013-2027, es decir su elección se desarrolló a partir de objetivos estratégicos y se considera principalmente las tres dimensiones del desarrollo sustentable. Sin embargo, en mi opinión es necesario abarcar la dimensión técnica e institucional, como lo hace el SEDI, agregando indicadores como la eficiencia total de conversión de energía. Lo anterior resultaría en un panorama más completo sobre la capacidad del país para tener y mantener un ciclo de generación de energía que sea sustentable y una estructura gubernamental que gestione y controle la distribución de los recursos energéticos.

La propuesta del presente trabajo es en principio contar con una clasificación de indicadores que se adecuen a las necesidades y circunstancias del entorno y permitan hacer una comparación más realista, por ejemplo una clasificación de indicadores globales, nacionales y locales de acuerdo a la cantidad de habitantes, y por otro lado contar un catálogo de indicadores que permitan identificar qué tipo de energía renovable es la que más y mejores beneficios traería a un lugar en particular y la que más contribuya al desarrollo sustentable tomando en cuenta todas sus dimensiones.

Por otro lado, los casos de estudio permitieron identificar que los indicadores actualmente requieren de información que a un nivel local difícilmente se tiene y por ende no pueden ser aplicados. Esto es una limitación importante para aquellas localidades que cuentan con sistemas de energías renovables y se requiere medir su contribución o progreso hacia el desarrollo sustentable.

Dicho lo anterior se propone que exista en principio una campaña de recopi-

lación y actualización de información para contar con una base sólida y accesible que contribuya al éxito del uso de indicadores. Asimismo es indispensable también concientizar a las personas tomadoras de decisiones con relación a la importancia que tiene contar con información que permita establecer un punto de partida para futuras estrategias, programas y políticas que dirijan al país hacia el desarrollo sustentable.

Con base en la revisión también se identifico que aquellos programas que introducen las energías renovables descentralizadas necesitan hacer un estudio previo al proyecto para adecuarlo a la comunidad en cuestión y no adecuar la comunidad al programa. Es decir, no cualquier proyecto de esa índole contribuirá al desarrollo sustentable de la misma manera en cualquier comunidad. En este sentido, se propone que aquellos programas con finalidad de introducir energías renovables a pequeña escala, se diseñen a partir de las características del lugar en cuestión.

A nivel local, el uso particular de una fuente renovable de energía, en este caso la eólica, ayuda a identificar que el acceso a la electricidad es un elemento esencial del desarrollo, por lo que es clave la necesidad de ver la energía eólica como una tecnología socialmente integrada. Se encontró que el uso de energías renovables descentralizadas ayuda a identificar impactos como la aceptación social, el desarrollo de la comunidad y sobre todo la importancia que tiene el estudio del recurso eólico que asegure una cadena de suministro y adecuar la tecnología a las necesidades que caracterizan una población determinada.

En general, identificar que un país, estado o localidad contribuye al desarrollo sustentable no es tarea fácil, sin embargo su intangibilidad requiere de ser presentado de forma numérica para determinarlo. Es evidente que existe una gran variedad de indicadores que distintos autores aseguran poder medirlo, pero aún faltan esfuerzos para establecer un mecanismo que determine cuáles son las características de un lugar para usar un indicador en específico, qué se necesita para poder llevar a cabo una comparación entre dos países o dos estados.

Bibliografía

- [1] Roland Clift Adisa Azapagic, Slobodan Perdan. *Sustainable development in practice: Case studies for Engineers and Scientists* . 2012.
- [2] International Energy Agency. *Energy Technology Perspectives 2015 Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action*. 2015.
- [3] Godfrey Boyle. *Renewable energy : power for a sustainable future* . Oxford, 2nd edition, 2004.
- [4] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. *Ley de transición energética*. pages 1–31, 2015.
- [5] CMNUCC. *Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el . . .*, 1992.
- [6] World Commission. *Report of the World Commission on Environment and Development : Our Common Future*. 1987.
- [7] WWEA Technical Committee. *World Wind Resource Assessment Report*. (December), 2014.
- [8] Global Wind Energy Council. *Opening up new markets for business*. 2016.
- [9] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. *Ley General de Cambio Climático*. pages 1–44, 2012.
- [10] Organismo Internacional de Energía Atómica. *Indicadores energéticos del desarrollo sostenible : directrices y metodologías*. 2007.

- [11] Ottmar Edenhofer, Ramón Pichs-Madruga, Youba Sokona, Agrawala Shardul, Igor Gabriel Blanco (Argentina) Alexeyevich Bashmakov, John Broome, Thomas Bruckner, and Steffen Brunner. CAMBIO CLIMÁTICO 2014 Mitigación del cambio climático. page 40, 2014.
- [12] Global Wind Energy Council. Opening up new markets for business. 2015.
- [13] Stefan Gsanger and Jean Pitteloud. Small Wind World Report 2014. pages 1–20, 2014.
- [14] United Nations Headquarters. Sustainable Development : From Brundtland to Rio 2012. *New York*, page 26, 2012.
- [15] Lu Huang, Jianguo Wu, and Lijiao Yan. Defining and measuring urban sustainability: a review of indicators. *Landscape Ecology*, 30(7):1175–1193, 2015.
- [16] V. Ibáñez Forés, M.D. Bovea, and V. Pérez-Belis. A holistic review of applied methodologies for assessing and selecting the optimal technological alternative from a sustainability perspective. *Journal of Cleaner Production*, 70:259–281, 2014.
- [17] Insah Iddrisu and Subhes C. Bhattacharyya. Sustainable Energy Development Index: A multi-dimensional indicator for measuring sustainable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50:513–530, 2015.
- [18] IEA. WORLD ENERGY OUTLOOK 2004.
- [19] INEGI. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010. Technical report, 2013.
- [20] International Energy Agency. *Energy Technology Perspectives 2012*. 2012.
- [21] IPCC. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático- Unidos por el Cambio. 2007.
- [22] IPCC. *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. 2012.

- [23] Mazharul Islam, David S K Ting, and Amir Fartaj. Assessment of the small - capacity straight - bladed VAWT for sustainable development of Canada. Assessment of the small-capacity straight-bladed VAWT for sustainable development of Canada. 7233, 2017.
- [24] Anthony Rogers James Manwell, Jon McGowan. *Wind Energy Explained*. Wiley, segunda ed edition, 2009.
- [25] J. Leary, A. While, and R. Howell. Locally manufactured wind power technology for sustainable rural electrification. *Energy Policy*, 43:173–183, 2012.
- [26] Quiroga Mart and Proyecciones Econ. *Indicadores ambientales y de desarrollo sostenible: avances y perspectivas para América Latina y el Caribe*. 2007.
- [27] Naciones Unidas. Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. pages 1–40, 2015.
- [28] OECD. *Handbook on Constructing Composite Indicators*. 2008.
- [29] K. D. Patlitzianas, H. Doukas, A. G. Kagiannas, and J. Psarras. Sustainable energy policy indicators: review and recommendations. *Renewable Energy*, 33(5):966–973, 2008.
- [30] J Ram Pillarisetti and Jeroen C J M Van Den Bergh. Sustainable Nations : What Do Aggregate Indicators Tell Us ? 2008.
- [31] PNUD. Desarrollo Humano Indicadores de y Género en México : Desarrollo Humano nueva metodología y Género en México : Identificar las barreras para lograr la igualdad. 2014.
- [32] SENER. Estrategia Nacional de Energía 2013-2027. page 73, 2013.
- [33] SENER. Recursos Renovables para la producción de energía en México. page 55, 2014.
- [34] SENER. Prospectiva de Energías Renovables. pages 0–131, 2016.

- [35] Julia Terrapon-Pfaff, Carmen Dienst, Julian König, and Willington Ortiz. A cross-sectional review: Impacts and sustainability of small-scale renewable energy projects in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40:1–10, 2014.
- [36] Arthur Lyon Dah Tomás Hák, Bedrich Moldan. *Sustainability Indicators: A Scientific Assessment*. 2012.
- [37] UNEP. SUSTAINABLE CONSUMPTION AND PRODUCTION INDICATORS FOR THE FUTURE SDG ´S. (March):1–89, 2015.
- [38] Victor L. Urquidi. *Desarrollo Sustentable y cambio global*. 2007.
- [39] Pável Vázquez, Jesús A Río, Karla G Cedano, and Manuel Martínez. An Entangled Model for Sustainability Indicators. pages 1–12, 2015.
- [40] Jiang-jiang Wang, You-yin Jing, Chun-fa Zhang, and Jun-hong Zhao. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy. 13:2263–2278, 2009.
- [41] Jianguo Wu. Landscape sustainability science : ecosystem services and human well-being in changing landscapes. pages 999–1023, 2013.
- [42] WWF. *Planeta Vivo Informe 2016 Riesgo y resiliencia*. 2016.